

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**COMPOSTO ORGÂNICO DE LODO DE REATOR  
UASB E CASCA DE CAFÉ: QUALIDADE E  
OPORTUNIDADES PARA PRODUÇÃO E USO  
AGRÍCOLA EM MINAS GERAIS**

**Renata Leandro Rodrigues Bortolini**

**Belo Horizonte**

**2018**

**COMPOSTO ORGÂNICO DE LODO DE REATOR  
UASB E CASCA DE CAFÉ: QUALIDADE E  
OPORTUNIDADES PARA PRODUÇÃO E USO  
AGRÍCOLA EM MINAS GERAIS**

**Renata Leandro Rodrigues Bortolini**

**Renata Leandro Rodrigues Bortolini**

**COMPOSTO ORGÂNICO DE LODO DE REATOR  
UASB E CASCA DE CAFÉ: QUALIDADE E  
OPORTUNIDADES PARA PRODUÇÃO E USO  
AGRÍCOLA EM MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientador: Cesar Rossas Mota Filho

Co-orientador: Antonio Teixeira de Matos

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

B739c

Bortolini, Renata Leandro Rodrigues.

Composto orgânico de lodo de reator UASB e casca de café [manuscrito] : qualidade e oportunidades para produção e uso agrícola em Minas Gerais / Renata Leandro Rodrigues Bortolini. – 2018. xii, 115 f., enc. : il.

Orientador: César Rossas Mota Filho.

Coorientador: Antonio Teixeira de Matos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: 101-115.

Bibliografia: f. 96-100.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Lodo de esgoto - Teses. 4. Casca de café - Teses. 5. Adubos compostos - Teses. 6. Nutrientes - Teses. I. Mota Filho, César Rossas. II. Matos, Antônio Teixeira de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Composto Orgânico de Lodo de Reator Uasb e Casca de Café: Qualidade e Oportunidades Para Produção e Uso Agrícola Em Minas Gerais

**RENATA LEANDRO RODRIGUES BORTOLINI**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. CESAR ROSSAS MOTA FILHO

Prof. ANTÔNIO TEIXEIRA DE MATOS

Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO

Prof. CLEVERSON VITÓRIO ANDREOLI

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento  
Coordenador

Prof. Cesar Rossas Mota Filho  
Orientador

Belo Horizonte, 05 de abril de 2018.

*A glória de Deus é ocultar certas coisas; tentar descobri-las é a glória dos reis*

*Rei Salomão (Provérbios 25:2)*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de todas as coisas, agradeço ao meu Deus e SENHOR a quem amo com todo o meu coração e entendimento e de quem sou completamente dependente. A Ele agradeço por tantas experiências e oportunidades de aprendizado que me proporcionou até aqui e por tantas pessoas maravilhosas que colocou em meu caminho. Agradeço a Ele por estar comigo em todos os momentos, especialmente naqueles em que éramos só nós dois, por renovar as minhas forças a cada manhã e por me dar coragem para superar os desafios.

Agradeço ao meu orientador Cesar Mota e ao meu co-orientador Antonio Matos. Agradeço por dispor de seu tempo, conhecimento e experiência para me ajudar em vários momentos. Por acreditarem no meu trabalho e por tantos direcionamentos que me deram no decorrer da pesquisa. Agradeço também pela autonomia que me permitiram ter ao longo do mestrado, a qual me proporcionou muito amadurecimento enquanto pesquisadora e profissional.

Reconheço também a importância dos demais professores e mestres do PPG-SMARH nesta minha trajetória acadêmica, com os quais tive diversas oportunidades de aprendizado, seja nas disciplinas cursadas, nas correções dos Seminários e, especialmente, no exemplo dado por vocês. Além do seu trabalho de excelência e reconhecimento internacional, percebo em vocês um espírito de coleguismo, cooperação mútua, respeito e humildade uns com os outros e também conosco, alunos do programa.

Sou grata aos técnicos dos laboratórios, Cíntia, Érico e Gabriel por toda ajuda e apoio que me deram em vários momentos. Obrigada pela paciência com minha inexperiência, por me ajudarem em algumas análises e esclarecerem minhas inúmeras dúvidas. Agradeço também aos colegas do laboratório que compartilharam comigo seu conhecimento e tempo. Em especial à Bruna Coelho, à Taiana Cestonaro e ao Andrés Felipe. Reconheço, igualmente, a colaboração da aluna de iniciação científica Yasmine Caldeira, obrigada por ser sempre tão cuidadosa, dedicada e precisa nos trabalhos. Sem a ajuda de vocês, esta etapa teria sido muito mais árdua.

Agradeço aos funcionários do CEPTS, ao senhor Raimundo pela cooperação e disponibilidade e ao Ronald pela preciosa ajuda no momento inicial de montagem das leiras. Demonstro também minha gratidão ao Giordany, que me forneceu a casca de café para o desenvolvimento da etapa experimental e ao Walney, motorista da Escola de Engenharia, que viabilizou o transporte deste material. Ao Társis, funcionário da CONAB, agradeço pela

prontidão em contribuir com a disponibilização das informações geoprocessadas das lavouras de café de Minas Gerais.

Sou grata e muito feliz pela convivência com os amigos e colegas do programa, a companhia de vocês no decorrer destes dois anos permitiu que os dias fossem mais alegres. Em especial à Edilaine, à Laura, ao Fábio e ao Matheus pela amizade compartilhada desde à graduação, e ao Lucas, com quem pude contar com ajuda em diversas situações e de diversas formas, seja para conseguir sacos de ração para buscar casca de café, seja compartilhando conhecimento e experiência que me permitiram refletir e amadurecer no tema da pesquisa.

Também expresso minha gratidão aos colegas do projeto *Minas Gerais Sustainable Sewage Treatment* pelos meses de convivência e aprendizado. A minha participação neste projeto e a convivência com esta equipe me trouxeram muito aprendizado e crescimento. Obrigada especialmente Fábio e Thiago pelos conselhos, incentivo e por muitas vezes me fazerem enxergar as circunstâncias sob outra perspectiva.

Agradeço também aos funcionários da UFMG, especialmente aos funcionários do DESA, que direta ou indiretamente, contribuem muita com as pesquisas desenvolvidas no programa. Ao Júlio e à Eliane por cumprirem suas tarefas administrativas e estarem sempre dispostos a esclarecer minhas diversas dúvidas, à Fernanda, à Susane por providenciar, dentre outras coisas, o transporte aos CEPTS, aos funcionários da limpeza e todos que, de alguma forma, contribuem para o bom funcionamento do departamento. Agradeço à CAPES pela bolsa concedida e aos demais programas de fomento pelo auxílio na compra de diversos materiais.

Por fim, mas de maneira nenhuma menos importante, agradeço às pessoas mais valiosas e queridas da minha vida, pois sem elas eu não teria sido capaz de chegar até aqui. Ao meu amado marido, Leonardo Bortolini, pelo suporte, apoio, incentivo e por me ajudar a viver um dia de cada vez. À minha querida mãe, Maria Rita, pelos sacrifícios e esforço que fez para cuidar das filhas e permitir que tivéssemos boas oportunidades de estudo. Ao meu pai, Gilvan Leandro, pelos conselhos e conversas encorajadoras, por sempre me impulsionar a ir além e a não desanimar. À minha irmã, Josianne Rodrigues que, desde criança, foi um exemplo de dedicação aos estudos para mim. Aos meus amigos e irmãos em Cristo que estiveram sempre cuidando de mim da maneira mais preciosa, através de suas sinceras orações.

A todos vocês expresso minha sincera gratidão e amor!

## RESUMO

O lodo de esgoto, subproduto sólido gerado no tratamento dos esgotos sanitários, possui grande potencial para uso agrícola, devido ao seu elevado teor de matéria orgânica e nutrientes. No entanto, seu aproveitamento deve ser feito de forma sanitariamente segura, realizando-se sua higienização prévia, devido à presença de microrganismos patogênicos, e com aplicação de doses que não causem desequilíbrios químicos no solo e poluição de águas subterrâneas. Nesta pesquisa, avaliou-se a técnica de compostagem para a higienização de lodo proveniente de um reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), sendo utilizada a casca de café como material estruturante. Foi avaliada ao final do processo de compostagem a qualidade microbiológica e química do material orgânico, por meio do monitoramento dos indicadores microbiológicos estabelecidos na Resolução CONAMA 375/2006 e referenciais de qualidade de adubos orgânicos. Os teores dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio no composto orgânico foram analisados em relação às necessidades de adubação do próprio cafeeiro. Adicionalmente, foram identificadas as áreas de plantação de café localizadas no entorno das ETEs mineiras compostas por reatores UASB e a compatibilidade destas áreas como fornecedoras de casca de café e receptoras do adubo orgânico produzido. Os resultados apontaram que a técnica de compostagem se mostrou eficiente para produção de um composto sanitariamente seguro, pois não foi identificada a presença de ovos viáveis de helmintos, salmonela e colifagos (como indicadores da presença de vírus entéricos) e a concentração de coliformes termotolerantes foi inferior a  $10^3$  NMP/gST em todas as amostras analisadas do composto orgânico produzido. Os resultados relativos aos teores dos macronutrientes no composto orgânico revelaram que o material tem no potássio seu elemento químico referência para definição da dose de sua aplicação no solo (caso o aproveitamento agrícola fosse feito nas próprias lavouras de cafeeiro). Além disso, verificou-se que o nitrogênio e o fósforo aportados ao solo com a aplicação do composto são capazes de suprir 42% e 56%, respectivamente, das necessidades do cafeeiro em relação a esses nutrientes. Por fim, verificou-se, a partir da estimativa das áreas de lavouras de cafeeiro existentes no entorno das ETEs, da produção de casca de café nessas áreas e da proporção adequada entre as matérias-primas para a compostagem, que 38% das estações teriam condição de compostar todo o volume de lodo de reator UASB gerado em suas unidades, o que representa 17% de todo o lodo de reator UASB produzido em Minas Gerais. De acordo com a qualidade do composto orgânico produzido e a dose de aplicação recomendada, constatou-se que a totalidade do adubo orgânico passível de ser produzido no estado, poderia ser utilizada na fertilização dos próprios cafezais localizados nas proximidades das ETEs.

**Palavras-chave:** lodo de reator UASB, casca de café, compostagem, reciclagem de nutrientes, aproveitamento agrícola de lodo de esgoto

## ABSTRACT

Sewage sludge is a solid byproduct generated during the treatment of sanitary sewage which has great potential for agricultural use due to its high organic matter and nutrients content. However, their use must be made in a sanitary safe way by the definition of doses that do not cause chemical imbalances in the soil and groundwater pollution and by hygienization due to the presence of pathogenic microorganisms. This research evaluates the sanitation of sludge from an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor through the composting technique, and the coffee husk was used as the structuring material. The microbiological and chemical quality of the organic material was evaluated at the end of the composting process by monitoring the microbiological indicators established in CONAMA Resolution 375/2006 and organic fertilizers quality benchmarks. The contents of macronutrients nitrogen, phosphorus and potassium in the organic compound were compared to the fertilization needs of the coffee plant. In addition, the research identified the coffee plantation areas located around the STP composed by UASB reactors and the compatibility of these areas as suppliers of coffee husks and receiver of the fertilizer. The results showed that the composting technique was efficient for the production of a sanitary safe compost, once there was not identified the presence of viable helminth eggs, salmonella and coliphages (as indicators of the presence of enteric virus) in the organic compost and the concentration of fecal coliforms was less than  $10^3$  MPN/gTS in all samples analysed. Regarding the analysis of the macronutrients present in the compost, the results revealed that the organic compost have the potassium as a reference element to determine the application rate of the fertilizer in the soil (if the agricultural use was made in the coffee plantations). Furthermore, it was verified that the content of nitrogen and phosphorus in the compost could supply 42% and 56%, respectively, of the nutrients demanded by coffee plantation. Finally, according to the estimation of the areas of coffee plantations in the vicinity of the STPs, to the production of coffee husks in these areas and to the appropriate proportion among the raw materials for the composting process, were verified that 38% of the STPs could compost the entire volume of UASB sludge generated in their units, which represents 17% of all UASB sludge produced in Minas Gerais. According to the quality of the organic compost produced and the application rate recommended, it was verified that the totality of the fertilizer that can be produced in the state could be used to fertilize the coffee plantations located in the vicinity of Minas Gerais' STPs.

**Keywords:** UASB reactor sludge, coffee husk, composting, nutrient recycling, agricultural use of sewage sludge.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
3.1 LODO DE ETE.....	18
3.1.1 <i>Subprodutos sólidos do tratamento de esgotos</i> .....	18
3.1.2 <i>Produção de lodo nos processos de tratamento de esgotos sanitários</i> .....	20
3.1.3 <i>Qualidade do lodo de esgoto sanitário</i> .....	21
3.1.4 <i>Possíveis destinações para o lodo de esgoto sanitário</i> .....	22
3.2 USO DO LODO DE ESGOTO SANITÁRIO NA AGRICULTURA .....	24
3.2.1 <i>Aproveitamento agrícola do lodo de esgoto sanitário no Brasil e no mundo</i> .....	24
3.2.2 <i>Impactos positivos e negativos da disposição do lodo no solo</i> .....	28
3.2.3 <i>Legislação Nacional.....</i>	30
3.2.4 <i>Técnicas de higienização do lodo de esgoto</i> .....	34
3.3 CAFÉ.....	40
3.3.1 <i>O Café em Minas Gerais</i> .....	40
3.3.2 <i>Resíduos do processamento do fruto do cafeeiro</i> .....	41
3.3.3 <i>A casca de café.....</i>	42
3.3.4 <i>Necessidade de adubação das lavouras de cafeeiro</i> .....	43
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>45</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO.....	45
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DO LODO DE REATOR UASB, DA CASCA DE CAFÉ E DO COMPOSTO ORGÂNICO .....	48
4.2.1 <i>Resumo dos métodos de análises laboratoriais empregados</i> .....	48
4.2.2 <i>Caracterização física e química.....</i>	49
4.2.3 <i>Caracterização microbiológica.....</i>	50
4.2.4 <i>Amostragem.....</i>	52
4.3 PREPARAÇÃO E OPERAÇÃO DAS LEIRAS DE COMPOSTAGEM .....	53
4.3.1 <i>Preparação das leiras de compostagem.....</i>	53
4.3.2 <i>Montagem das leiras de compostagem</i> .....	54
4.3.3 <i>Critérios operacionais das pilhas de compostagem.....</i>	56
4.4 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE LODO DE REATOR UASB E CASCA DE CAFÉ QUE PODERIAM SER COMPOSTADOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS .....	59
4.4.1 <i>Estimativa da produção de lodo nas ETEs mineiras.....</i>	59
4.4.2 <i>Estimativa das áreas de lavoura de cafeeiro localizadas próximas a ETEs</i> .....	60
4.4.3 <i>Estimativa da produção de casca de café</i> .....	61
4.4.4 <i>Estimativa da quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais.....</i>	62
4.5 ESTIMATIVA DA ÁREA DE CAFEZAL PASSÍVEL DE SER FERTILIZADA COM O COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO.....	63
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO LODO DE ESGOTO SANITÁRIO, DA CASCA DE CAFÉ E DO COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO .....	65
5.1.1 <i>Lodo de esgoto sanitário e casca de café.....</i>	65
5.1.2 <i>Composto orgânico.....</i>	66
5.2 CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO DE ESGOTO SANITÁRIO E DO COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO.....	70
5.2.1 <i>Lodo de esgoto de UASB.....</i>	70
5.2.2 <i>Composto orgânico produzido.....</i>	72

5.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO MATERIAL ORGÂNICO AO LONGO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM.....	75
5.3.1	<i>Perfil de temperatura</i> .....	75
5.3.2	<i>Potencial hidrogeniônico</i> .....	76
5.3.3	<i>Decaimento da relação C/N</i> .....	77
5.3.4	<i>Redução de massa do material em compostagem</i> .....	78
5.3.5	<i>Necessidade de adição de água</i> .....	79
5.4	ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE LODO DE REATOR UASB E CASCA DE CAFÉ QUE PODERIAM SER COMPOSTADOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS .....	80
5.4.1	<i>Estimativa da produção de lodo nas ETEs mineiras</i> .....	80
5.4.2	<i>Estimativa das áreas de lavouras de cafeeiro localizadas próximas a ETEs e da produção de casca de café nessas áreas</i> .....	83
5.4.3	<i>Estimativa da quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais</i> .....	88
5.5	ESTIMATIVA DA ÁREA DE CAFEZAL PASSÍVEL DE SER FERTILIZADA COM O COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO.....	90
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> – Partes constituintes do fruto do cafeeiro. ....	41
<b>Figura 4.1</b> – Localização do CEPTS (destaque em vermelho). Fonte: Google EARTH .....	46
<b>Figura 4.2</b> – Foto do CEPTS (com destaque para o reator UASB utilizado no experimento)	46
<b>Figura 4.3</b> – Reator UASB cujo lodo foi utilizado no experimento. Fonte: (DESA, [s.d.]) ...	47
<b>Figura 4.4</b> – Leitos de secagem onde foram formadas e mantidas as leiras de compostagem	47
<b>Figura 4.5</b> – Amostrador para coleta e pontos de coleta .....	52
<b>Figura 4.6</b> – Etapas para obtenção das amostras das leiras de compostagem .....	53
<b>Figura 4.7</b> – Divisão do volume de lodo entre os dois leitos de secagem.....	55
<b>Figura 4.8</b> – Disposição da casca de café nos leitos de secagem .....	55
<b>Figura 4.9</b> – Detalhe da etapa de mistura e divisão do material orgânico em duas pilhas .....	56
<b>Figura 4.10</b> – Detalhe das pilhas de compostagem prontas.....	56
<b>Figura 4.11</b> – Detalhe do reviramento do material constituinte das pilhas .....	57
<b>Figura 4.12</b> – Ferramentas utilizadas para reviramento do material .....	57
<b>Figura 4.13</b> – Termômetro utilizado nas medições de temperatura do material .....	58
<b>Figura 4.14</b> – Exemplo da medição de temperatura do material das pilhas .....	58
<b>Figura 4.15</b> – Adição de águas ao material das pilhas em compostagem .....	59
<b>Figura 5.1</b> – Teste para determinação de coliformes totais e <i>E. coli</i> a partir de diferentes diluições.....	70
<b>Figura 5.2</b> – Ovos de larvas dos gêneros <i>Ancilostoma</i> (a) e <i>Ascaris</i> (b e c) encontrados nas leituras sob a lente do microscópio .....	71
<b>Figura 5.3</b> – Vista das placas de petri com material submetido à menor diluição possível ( $10^1$ ) .....	73
<b>Figura 5.4</b> – Vista da placa de petri e tubos para contagem de <i>Salmonella</i> em amostra coletada na pilha 3 .....	73
<b>Figura 5.5</b> – Perfis de temperatura máxima no material das pilhas 1, 2, 3 e 4 ao longo do período de sua compostagem.....	75
<b>Figura 5.6</b> – Comportamento do pH do material ao longo do processo da compostagem.....	76
<b>Figura 5.7</b> – Decaimento da relação C/N ao longo do período de compostagem do material	77
<b>Figura 5.8</b> – Vista das pilhas de material após 127 dias de compostagem.....	78
<b>Figura 5.9</b> – Quantidade de água adicionada ao material das pilhas durante o período de sua compostagem .....	79
<b>Figura 5.10</b> – Número de ETes por faixa de produção de lodo de reator UASB .....	82

<b>Figura 5.11</b> – Diagrama de Pareto da quantidade de lodo de reator UASB produzido pelas ETEs mineiras .....	82
<b>Figura 5.12</b> – Mapa com localização das ETEs no estado de Minas Gerais .....	85
<b>Figura 5.13</b> – Mapa com localização das lavouras de cafeeiro no estado de Minas Gerais....	86
<b>Figura 5.14</b> – Mapa com identificação de lavouras de cafeeiro localizadas nas proximidades de ETEs .....	87
<b>Figura 5.15</b> – Número de ETEs, por faixa do percentual da área de lavoura de cafeeiro que poderia ser fertilizada com o composto orgânico .....	91

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Origem e características dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos sanitários .....	18
<b>Tabela 3.2</b> – Quantidade de lodo produzido por tipo de processo de tratamento de esgotos sanitários.....	20
<b>Tabela 3.3</b> – Características da matéria seca do lodo anaeróbico encontradas na literatura .....	21
<b>Tabela 3.4</b> – Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição de lodo de esgoto sanitário comumente adotadas.....	23
<b>Tabela 3.5</b> – Percentual atual de reciclagem agrícola do lodo de esgoto sanitário em países de média e alta renda .....	25
<b>Tabela 3.6</b> – Realidade da gestão do lodo e perspectivas relacionadas a legislação em alguns países .....	26
<b>Tabela 3.7</b> – Percentual do número de distritos com tratamento de esgoto sanitário por destino do lodo gerado.....	27
<b>Tabela 3.8</b> – Possíveis impactos positivos e negativos da disposição do lodo no solo .....	29
<b>Tabela 3.9</b> – Limites de concentração de patógenos conforme classes de lodo de esgoto.....	30
<b>Tabela 3.10</b> – Período de tempo e temperatura necessários para higienização dos resíduos sólidos orgânicos durante o processo de compostagem .....	34
<b>Tabela 3.11</b> – Comparação entre tecnologias de higienização do lodo .....	35
<b>Tabela 3.12</b> – Síntese de estudos que avaliaram a qualidade microbiológica do lodo compostado.....	37
<b>Tabela 3.13</b> – Síntese de estudos que avaliaram o teor de nutrientes no composto orgânico produzido com lodo de esgoto sanitário. ....	38
<b>Tabela 3.14</b> – Representatividade, em termos monetários e de área cultivada, do café em Minas Gerais.....	40
<b>Tabela 3.15</b> – Características físicas e químicas da casca de café.....	43
<b>Tabela 3.16</b> – Doses de nitrogênio, K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> recomendadas em função da produtividade da lavoura, fertilidade do solo e teor de nitrogênio foliar. ....	44
<b>Tabela 4.1</b> – Análises utilizadas para determinação dos parâmetros de interesse.....	48
<b>Tabela 5.1</b> – Caracterização física e química do lodo de reator UASB e da casca de café.....	65
<b>Tabela 5.2</b> – Caracterização física e química do composto orgânico.....	66
<b>Tabela 5.3</b> – Nutrientes totais e disponibilizados do composto orgânico (matéria seca a 65 °C).....	68

<b>Tabela 5.4</b> – Contagem de coliformes e ovos de helmintos no lodo de reator UASB (em relação à matéria seca a 105 °C).....	71
<b>Tabela 5.5</b> – Caracterização microbiológica do material das pilhas de compostagem e limites em relação à contaminação (em relação à matéria seca a 105 °C).....	72
<b>Tabela 5.6</b> – Eficiência de redução na contagem de coliformes e ovos de helmintos proporcionada pela compostagem do lodo de reator UASB com casca de café .....	74
<b>Tabela 5.7</b> – Redução de massa seca do material (%) nas pilhas de compostagem.....	78
<b>Tabela 5.8</b> – Quantidade total de lodo seco produzida por cada tecnologia de tratamento de esgoto.....	80
<b>Tabela 5.9</b> – Estatística descritiva das áreas de lavoura de cafeeiro no entorno das ETEs e respectiva produção de casca de café .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA: Agência Nacional da Águas

ATP: Adenosina Trifosfato

CEPTS: Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento

CFSEMG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

COT: Carbono orgânico total

DESA: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

DNA: Ácido Desoxirribonucleico

EP: Equivalente populacional

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

EUA: Estados Unidos da América

ha: hectare

hab: habitantes

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IN: Instrução Normativa

INAES: Instituto Antonio Ernesto de Salvo

$K_{disp}$ : Potássio disponível

$K_T$ : Potássio total

MAPA: Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento

$N_{amo}$ : Nitrogênio amoniacal

$N_{disp}$ : Nitrogênio disponível

NMP: número mais provável

$N_{Nit}$ : Nitrito e nitrato

N<sub>T</sub>: Nitrogênio total

NTK: Nitrogênio Kjeldahl

ONU: Organização das Nações Unidas

PAM: Pesquisa Agrícola Municipal

P<sub>disp</sub>: Fósforo disponível

pH: Potencial hidrogeniônico

PNSB: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

P<sub>T</sub>: Fósforo total

SNIS: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

ST: Sólidos totais

t: tonelada

TM = Taxa de mineralização

UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors* (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo)

UE: União Europeia

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

UFP: Unidade formadora de placa

# 1 INTRODUÇÃO

Dentre as interferências humanas causadas no meio ambiente está o despejo de esgoto sanitário nos cursos d'água, o qual contribui para introdução de diversos poluentes nas águas, causando deterioração da qualidade da mesma. Neste contexto, o tratamento de esgoto sanitário consiste em uma atividade essencial para a preservação do meio ambiente, pois, através das variadas técnicas existentes, é possível promover uma diminuição do aporte de matéria orgânica e de nutrientes que seriam lançados diretamente nesses cursos d'água. Além disso, o acesso aos serviços de esgotamento sanitário consiste em um importante fator para garantia da qualidade de vida, diminuição da desigualdade social e promoção da saúde pública.

Entretanto, apesar da inquestionável importância do setor, em Minas Gerais, segundo é informado pelo Ministério das Cidades através do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2015, 78% da população era atendida com esgotamento sanitário. Além disso, do volume total de esgoto coletado, apenas 48% recebe algum tipo de tratamento. Tal cenário mostra o potencial e a urgência de expansão do setor.

Há de se destacar que nos diversos processos de tratamento de esgoto são gerados subprodutos. Dentre os subprodutos sólidos gerados está o lodo de esgoto. Entretanto, nota-se que a atual concepção das estações de tratamento de esgotos (ETE) é voltada para o tratamento da fase líquida, ou seja, pouco é pensado e planejado no que se refere ao tratamento e à destinação final da fase sólida. “Os projetos de Estações de Tratamento de Esgotos raramente detalham a forma de gerenciamento e disposição final do lodo, justamente a etapa mais complexa e cara de um sistema de tratamento”. (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Assim, tendo em vista o potencial e a urgência de expansão do setor de esgotamento sanitário, bem como a atual despreocupação com o tratamento da fase sólida, destaca-se a importância da busca pelo desenvolvimento de estações de tratamento projetadas com um olhar mais atento à necessidade de tratamento e destinação correta do lodo e, especialmente, às possibilidades de aproveitamento do mesmo.

Dentre as alternativas de destinação final do lodo de esgoto está o seu aproveitamento agrícola e conseqüente reciclagem de matéria orgânica e nutrientes. No entanto, para se

garantir o aproveitamento sanitariamente seguro do lodo, tanto para o solo como para a vegetação, consumidores e trabalhadores que farão sua manipulação e aplicação, faz-se necessário o uso de técnicas para sua higienização e diminuição no aporte de microrganismos patogênicos. Dentre as técnicas existentes com esta finalidade está a compostagem, processo por meio do qual se obtém a decomposição biológica controlada de resíduos orgânicos. Este processo acontece em condições termofílicas, as quais proporcionam, pelo aumento da temperatura, mecanismos de inativação de patógenos e higienização do composto.

Além dos aspectos sanitários, é fundamental que também se atente em relação às quantidades de nutrientes/poluentes aportados ao solo, tendo em vista que, caso sejam utilizadas doses acima das recomendáveis poderá haver desequilíbrio químico do solo e possível risco de contaminação de águas subterrâneas.

Deve-se considerar, porém, ao se propor a mudança de pensamento da atual forma de conceber estações de tratamento de esgoto para uma nova que considere as possibilidades de aproveitamento do lodo, a grande importância da interação do aproveitamento com as atividades econômicas regionais e como estas últimas podem representar oportunidades de efetivação dessa mudança. Essa estratégia operacional e de gerenciamento do lodo de esgoto pode proporcionar diminuição nos custos de tratamento e destinação final, impulsionando atividades econômicas regionais. Sendo assim, nesta pesquisa, investiga-se a associação do tratamento e da disposição final do lodo com a atividade agrícola mais importante do estado de Minas Gerais: o café.

O estado de Minas Gerais destaca-se como o maior estado produtor de café no Brasil, sendo o responsável, em média, pela metade da produção brasileira (INAES, 2010). Além disso, segundo a pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), denominada Produção Agrícola Municipal (PAM), em 2015, a área destinada a plantações de cafezais representava 89% de toda a área destinada à plantação de culturas permanentes e 19% da área destinada à plantação de culturas permanentes e temporárias. Reconhece-se, portanto, a importância da cultura para o estado.

Durante o beneficiamento do café são gerados resíduos, dentre eles a casca do café. Tradicionalmente, os possíveis usos para esse resíduo estão associados à sua utilização como adubo orgânico, alimentação animal e compostagem. Entretanto, critica-se o fato de essas

alternativas destinarem apenas uma pequena fração desse resíduo, diante da grande quantidade gerada (MURTHY; NAIDU, 2012).

Dentre as diversas características desse resíduo, destaca-se a sua alta concentração de potássio, nutriente presente no lodo em pequenas quantidades e que, portanto, seria um excelente complemento nutricional para uma mistura com esse resíduo. Assim, propõe-se o uso desse subproduto como matéria prima para compostagem do lodo e posterior oferecimento do composto orgânico para fertilização dos próprios cafezais. Tal proposta seria capaz de proporcionar a associação do setor de saneamento com a atividade econômica através do oferecimento de uma alternativa para destinação da casca de café e do lodo de esgoto sanitário, além de possibilitar o oferecimento do composto orgânico como insumo agrícola para utilização no próprio cultivo do cafeeiro.

Diante de todo o cenário apresentado, nesta pesquisa, pretende-se investigar as seguintes hipóteses:

- i) a compostagem da casca do café com o lodo de reator UASB pode resultar em um composto nutricionalmente equilibrado passível de ser utilizado em cultivos agrícolas – considerando-se as características químicas individuais de cada um dos resíduos constituintes do material a ser compostado;
- ii) o composto produzido apresenta-se adequadamente higienizado após o processo – uma vez que a compostagem consiste em um processo de higienização já consagrado;
- iii) há disponibilidade de casca de café para compostar a maior parte do lodo de reator UASB gerado em Minas Gerais – visto que grandes volumes desse resíduo são gerados no processamento do café;
- iv) o composto produzido pode ser aproveitado, em sua totalidade, nos próprios cafezais localizados próximos às ETEs.

Finalmente, justifica-se a relevância desta pesquisa no fato de que a partir da grande geração de dois resíduos no Estado de Minas Gerais, a casca de café e o lodo de esgoto sanitário, e através de um processo de higienização e mineralização já consagrado, a compostagem, é possível produzir um composto orgânico com boa qualidade química e microbiológica. Além disso, este composto orgânico pode ser aproveitado como adubo orgânico dos próprios cafezais, agregando-se valor ao lodo de esgoto, gerando-se viabilidade econômica ao seu

aproveitamento e proporcionando uma integração do setor de saneamento com a atividade agrícola mais importante no estado de Minas Gerais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 *Objetivo Geral***

Avaliar a qualidade química e microbiológica do composto orgânico produzido a partir do lodo de esgoto de UASB e casca do café, bem como as oportunidades para sua produção e as possibilidades de seu aproveitamento agrícola na fertilização de cafezais cultivados no entorno das ETEs de Minas Gerais.

### **2.2 *Objetivos Específicos***

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Analisar a qualidade nutricional do composto orgânico com base nos principais macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), sua conformidade com a legislação pertinente e se a proporção entre os macronutrientes é equilibrada diante das necessidades nutricionais do cafeeiro;
- Analisar a qualidade microbiológica do composto orgânico produzido com lodo de reator UASB e casca de café e sua conformidade com as legislações vigentes;
- Estimar a quantidade de lodo de reator UASB e de casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais, considerando-se a proximidade espacial de ETEs e lavouras;
- Avaliar se a quantidade de composto orgânico que seria possível produzir, a partir da associação desses dois resíduos, pode ser utilizada, em sua totalidade, na fertilização de lavouras de cafeeiro localizadas próximas às ETEs.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Lodo de ETE

#### 3.1.1 Subprodutos sólidos do tratamento de esgotos

O tratamento de esgotos sanitários consiste em uma atividade de extrema importância para a preservação do meio ambiente e da saúde pública, pois, através, das variadas técnicas existentes, é possível promover a diminuição no aporte de matéria orgânica, de organismos patogênicos e, em alguns casos, de nutrientes que seriam lançados diretamente no curso d'água. No entanto, nas diferentes etapas do tratamento de esgotos geram-se subprodutos sólidos, como material gradeado, areia, espuma e lodo.

Sabe-se que os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos sanitários têm características distintas, conforme a etapa e tecnologia em que foi gerado. Na Tabela 3.1 estão apresentadas, de forma resumida, a origem e descrição dos subprodutos gerados.

**Tabela 3.1** – Origem e características dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos sanitários

Subproduto sólido	Origem	Descrição
Sólidos grosseiros	Grade	Os sólidos removidos no gradeamento incluem todos os sólidos, orgânicos e inorgânicos, com dimensões superiores ao espaço livre entre as grades.
Areia	Desarenador	A areia usualmente compreende os sólidos inorgânicos mais pesados, que sedimentam com velocidades relativamente elevadas.
Escuma	Desarenador, decantador primário, decantador secundário, lagoa de estabilização, reator anaeróbio.	A espuma removida nos decantadores primários consiste de materiais flutuantes, contendo graxa, óleos vegetais e minerais, gordura animal, sabões, resíduos de comida, cascas de vegetais e frutas, cabelo, papel, algodão, pontas de cigarro, dentre outros. No tratamento secundário, os reatores biológicos também produzem espuma, contando, em sua composição, com a presença de bactérias que se desenvolvem em condições ambientais específicas.
Lodo primário	Tanque séptico, decantador primário.	Os sólidos removidos por sedimentação nos decantadores primários constituem o lodo primário. O lodo primário removido em tanques sépticos permanece por tempo suficiente para que ocorra sua digestão anaeróbia, em condições controladas (tanques fechados).
Lodo biológico aeróbio (não)	Lodos ativados convencionais, reatores	O lodo biológico excedente (lodo secundário) compreende a biomassa de microrganismos aeróbios

<b>Subproduto sólido</b>	<b>Origem</b>	<b>Descrição</b>
estabilizado)	aeróbios com biofilme – alta carga	gerada às custas da remoção da matéria orgânica (alimento) dos esgotos. Estes sólidos não de encontram estabilizados (digeridos).
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	Lodos ativados – aeração prolongada, reatores aeróbios com biofilmes – baixa carga	Esse lodo biológico é, da mesma forma, predominantemente constituído por microrganismos aeróbios. No entanto, nos sistemas de baixa carga, a disponibilidade de alimento é menor. Em decorrência disso, a biomassa utiliza as próprias reservas de matéria orgânica de composição do protoplasma celular, resultando em um lodo com menor teor de matéria orgânica (lodo digerido).
Lodo biológico anaeróbio (estabilizado)	Lagoas de estabilização, reatores anaeróbios	Nos reatores anaeróbios e no lodo de fundo de lagoas de estabilização predominam condições anaeróbias. A biomassa anaeróbia também cresce e se multiplica às custas de matéria orgânica. Nesses processos, a biomassa fica retida um longo tempo, no qual ocorre a digestão anaeróbia do próprio material celular.
Lodo químico	Decantador primário com precipitação química, sistemas com precipitação química de fósforo	Esse lodo é usualmente resultante da precipitação química com sais metálicos ou com cal. A taxa de decomposição do lodo químico nos tanques é menor que a do lodo primário.

Fonte: Von Sperling, 2005

Embora muitos sejam os resíduos sólidos gerados no tratamento de esgotos sanitários, nesta pesquisa se aterá ao estudo do lodo, tendo em vista o seu potencial aproveitamento agrícola. Será estudado, especificamente, o lodo de reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB), uma vez que 80% das ETEs de Minas Gerais contam com estes reatores em seu fluxograma de tratamento da fase líquida (ANA, 2017).

Nos reatores UASB, o processo de tratamento consiste no escoamento ascendente de esgotos através de um leito de lodo denso e de elevada atividade. A acumulação dos sólidos que formam esse leito de lodo denso, deve-se, basicamente, à presença de precipitados minerais, como carbonato de cálcio, e à produção de biomassa, a qual se desenvolve a partir da degradação da matéria orgânica presente nos esgotos. A alta atividade dessa biomassa é um dos princípios fundamentais do processo de tratamento de esgoto utilizando-se essa tecnologia. Periodicamente, é necessário fazer o descarte do lodo excedente, pois, caso contrário, seu acúmulo no interior do reator poderá provocar a perda excessiva de sólidos no efluente líquido, havendo a deterioração da qualidade do mesmo. Algumas características

importantes do lodo proveniente de reatores UASB são: elevado grau de estabilização, elevada concentração e facilidade de desidratação (CHERNICHARO, 2007).

### 3.1.2 Produção de lodo nos processos de tratamento de esgotos sanitários

A quantidade de lodo produzida durante o tratamento de esgoto sanitário varia em função do processo de tratamento empregado. Algumas faixas de valores da massa de lodo produzida por processo, bem como o teor de sólidos secos do lodo e o intervalo de remoção são apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** – Quantidade de lodo produzido por tipo de processo de tratamento de esgotos sanitários

Sistema	Intervalo de remoção do lodo primário	Intervalo de remoção do lodo biológico	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gST/(hab.d))
Tratamento primário (Tanques sépticos)	meses	-	3-6	20-30
Lagoa facultativa	-	décadas	5-15	12-32
Reator UASB	-	semanas	3-6	12-18
Lodos ativados convencional	horas	~ contínuo	1-2	60-80
Lodos ativados – aeração prolongada	-	~ contínuo	0,8-1,2	40-45
Filtro biológico percolador de baixa carga	horas	horas	1,5-4,0	38-47
Filtro biológico percolador de alta carga	horas	horas	1,5-4,0	55-75

Fonte: adaptado de Von Sperling, 2005

No ano de 2001, Machado estimou que a produção de lodo no Brasil foi de 151.725 toneladas de sólidos secos por ano e, no estado de Minas Gerias, seria de 2.048 toneladas de sólidos secos por ano. Em 2005, segundo é reportado em atlas publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU) (UN-HABITAT, 2008), considerando o acréscimo da população atendida com tratamento de esgoto no Brasil, esse valor estaria em torno de 372.000 toneladas de sólidos secos por ano. Ou seja, a produção de lodo teria mais que dobrado no decorrer de 5 anos. Estes dados reforçam o aumento na produção de lodo no Brasil devido à expansão dos serviços de tratamento de esgotos sanitários. Considerando que esta tendência de aumento na população atendida com tratamento de esgotos permanece, uma vez que o déficit de

tratamento de esgoto no Brasil e em Minas Gerais ainda é alto, ressalta-se a importância de se pensar e planejar alternativas sustentáveis para destinação deste subproduto.

### 3.1.3 Qualidade do lodo de esgoto sanitário

A qualidade do lodo de esgoto sanitário varia em função de diversos fatores, pode-se dizer que os principais deles são: origem do efluente e tecnologia de tratamento da fase líquida. Por exemplo, um lodo gerado a partir do tratamento de um efluente doméstico e industrial, possivelmente conterá um teor de metais pesados maior do que o lodo proveniente de um efluente estritamente doméstico. Outro exemplo que pode ser citado é a concentração de ovos de helmintos, a qual está diretamente associada à saúde da população geradora do esgoto.

Assim, sabe-se que a qualidade do lodo gerado em diferentes regiões por diferentes processos de tratamento irá variar, sendo importante realizar a caracterização do lodo de esgoto sanitário em cada situação, a depender do propósito de seu gerenciamento. Ainda assim, é possível definir a partir da literatura valores típicos de diversos parâmetros de qualidade do lodo. Na Tabela 3.3 buscou-se apresentar valores encontrados na literatura sobre algumas características de lodos anaeróbios.

**Tabela 3.3** – Características da matéria seca do lodo anaeróbio encontradas na literatura

Parâmetro	Valor	Descrição do lodo	Referência
Carbono orgânico (dag/kg)	23,1 a 39,9	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Rosa; Chernicharo; Melo, 2015
	20,1	Lodo de reator UASB	Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001
	29,3	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Fernandes, 2001
	20,3 a 38,1	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Batista, 2015 Nascimento, 2016
Nitrogênio total (dag/kg)	2,5 a 7,9	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Rosa; Chernicharo; Melo, 2015
	2,2	Lodo de reator UASB	Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001
	5,4	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Batista, 2015
Fósforo total (dag/kg)	0,67	Lodo de reator UASB	Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001
	0,95 a 2,05	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Nascimento, 2016
Potássio total (dag/kg)	0,95	Lodo de reator UASB	Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001
	0,11	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Batista, 2015
	0,05 a 0,11	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Nascimento, 2016
Ovos de helmintos (ovos/gST)	1,3 a 6,3	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Batista, 2015
	0,9 a 6,9	Lodo de reator UASB	Fernandes; Silva, 1999
	~48,0	Lodo de reator UASB	Passamani; Keller; Gonçalves, 2002
Ovos de helmintos	0,3 a 13,0	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001
	1,2 a 5,2	Lodo aeróbio digerido anaerobicamente	Fernandes, 2001

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Descrição do lodo</b>	<b>Referência</b>
viáveis (ovos/gST)	0,4 a 2,67	Lodo de reator UASB	Batista, 2015 Fernandes; Silva, 1999
Coliformes termotolerantes (NMP/gST)	10 <sup>5</sup> a 10 <sup>6</sup> 10 <sup>3</sup> a 10 <sup>5</sup> 10 <sup>7</sup>	Lodo de reator UASB Lodo aeróbio digerido anaerobicamente Lodo de reator UASB	Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001 Batista, 2015 Passamani; Keller; Gonçalves, 2002

Constatou-se, a partir da pesquisa realizada, que a disponibilidade de dados é maior para lodos aeróbios digeridos anaerobicamente do que para lodos estritamente anaeróbios. Além disso, no que diz respeito à presença de coliformes, normalmente é reportada apenas a concentração de coliformes termotolerantes, sem ser informada a contagem de coliformes totais. Acredita-se que isto se deva ao fato de a contagem de coliformes termotolerantes, e não a contagem de coliformes totais, ser o indicador utilizado para atestar a segurança sanitária do lodo.

A partir dos dados apresentados, confirma-se o que foi dito sobre a variabilidade dos parâmetros de caracterização de diferentes lodos de esgoto sanitário. Ainda assim, de maneira geral, é possível afirmar que os valores de cada parâmetro convergem para intervalos aproximados. Uma variabilidade maior é observada especialmente na contagem de ovos de helmintos, o que se deve, conforme dito anteriormente, à forte relação desse parâmetro com a saúde da população geradora de esgoto.

### **3.1.4 Possíveis destinações para o lodo de esgoto sanitário**

Em se tratando de um subproduto gerado durante o processo de tratamento de esgotos sanitários, a gestão do lodo destaca-se como uma relevante questão a ser considerada na concepção das estações de tratamento de esgotos. Essa gestão não é nem economicamente nem institucionalmente trivial. Por exemplo, um estudo realizado em várias estações de tratamento de esgotos na Áustria mostrou que a gestão do lodo de esgoto sanitário representa entre 49 e 53% dos custos operacionais totais de uma ETE (KROSS, 2004 apud; MURRAY; HORVATH; NELSON, 2008).

Dentre os diversos itens relativos a essa gestão, merece atenção a destinação final do lodo, para a qual existem variadas alternativas, tais como disposição em aterros sanitários, descarga oceânica, incineração, recuperação de áreas degradadas e reciclagem agrícola. Cada uma dessas alternativas apresenta diferentes vantagens e desvantagens, sendo necessário buscar opções que potencializem os usos benéficos do lodo e minimizem os possíveis impactos

negativos relativos à sua gestão. Na Tabela 3.4 são enumeradas algumas vantagens e desvantagens das técnicas mencionadas.

**Tabela 3.4** – Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição de lodo de esgoto sanitário comumente adotadas

<b>Alternativa de disposição</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Descarga oceânica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poluição das águas, flora e fauna oceânica</li> </ul>
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução drástica de volume</li> <li>• Esterilização</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos elevados</li> <li>• Disposição das cinzas</li> <li>• Poluição atmosférica</li> </ul>
Aterro sanitário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de grandes áreas</li> <li>• Localização próxima a centros urbanos</li> <li>• Características especiais de solo</li> <li>• Isolamento ambiental</li> <li>• Produção de gases e percolado</li> <li>• Dificuldade de reintegração da área após desativação</li> </ul>
Recuperação de áreas degradadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxas elevadas de aplicação</li> <li>• Resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odores</li> <li>• Limitações de composição e uso</li> <li>• Contaminação do lençol freático, fauna e flora</li> </ul>
Reciclagem agrícola	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande disponibilidade de áreas</li> <li>• Efeitos positivos sobre o solo</li> <li>• Solução de longo prazo</li> <li>• Potencial como fertilizante</li> <li>• Resposta positiva das culturas ao uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitações referentes à composição e taxas de aplicação</li> <li>• Contaminação do solo com metais</li> <li>• Contaminação de alimentos com elementos tóxicos e organismos patogênicos</li> <li>• Odores</li> </ul>

Fonte: Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2001

Constata-se que a reciclagem agrícola consiste na técnica que apresenta maior número de vantagens em relação às demais. Além disso, é possível enquadrar a reciclagem agrícola do lodo num importante e emergente conceito denominado economia circular.

Linguisticamente, o termo economia circular é o antônimo de economia linear, podendo, este último, ser traduzido como a conversão de recursos naturais em lixo. Este processo causa a degradação do meio ambiente por duas vias: a remoção dos recursos naturais e a poluição causada pelo lixo. Adicionalmente, o conceito de economia circular está intrinsecamente relacionado aos ciclos bioquímicos. Os ciclos biogeoquímicos podem lidar com as mudanças provocadas pelo homem, porém, importa a taxa em que esta mudança acontece. Assim, na economia circular preocupa-se com o gerenciamento deste fluxo, reduzindo a remoção

excessiva do material de um ciclo e a liberação excessiva do material em outro ciclo (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

A prática da reciclagem agrícola, por sua vez, retorna o lodo ao sistema produtivo como recurso ao invés de considerá-lo como lixo, diminuindo, assim, a exploração dos recursos naturais e a produção de mais lixo. Por exemplo, ao retornar ao solo o fósforo presente no lodo de esgoto, evita-se a exploração de rochas fosfatadas para produção de fertilizantes fosfatados. Há de se considerar ainda que os nutrientes presentes no lodo de esgoto sanitário têm origem principalmente dos alimentos consumidos pelo homem, os quais, em algum momento do ciclo produtivo, retiraram estes nutrientes do solo. Assim, com o intuito de integrar novamente esses nutrientes aos seus respectivos ciclos biogeoquímicos, o mais assertivo seria retorná-los ao solo.

## **3.2 Uso do lodo de esgoto sanitário na agricultura**

### **3.2.1 Aproveitamento agrícola do lodo de esgoto sanitário no Brasil e no mundo**

As excretas foram utilizadas como fertilizantes em algumas partes do mundo por milênios e, atualmente, as excretas e lodos tratados, ou "biossólidos", são amplamente utilizados na agricultura em todo o mundo. O paradigma ambiental atual de eliminar o conceito de "resíduos" e substituí-lo pelo de "reciclagem de recursos" resultou no aumento do uso benéfico de biossólidos em muitas partes do mundo. Mesmo em países onde a maioria dos biossólidos são tradicionalmente descartados em aterros sanitários, pesquisas estão sendo feitas para encontrar formas de aumentar o uso agrícola desse material (UN-HABITAT, 2008).

Sumariamente, segundo é reportado no *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management*, publicado pela UN-Habitat (2008), nos países em desenvolvimento, o foco no acesso ao saneamento básico exige melhorias nos sistemas para gerenciar os resíduos coletados. Nos países de renda média e alta, a tendência é o afastamento da prática de disposição em aterros e o aumento das práticas de incineração ou o uso do lodo nos solos. Em países de alta renda, a aplicação agrícola do lodo minimamente tratado é lentamente substituída por compostagem e outros tratamentos avançados para produzir biossólidos para uso em ambientes não agrícolas. Na Tabela 3.5 apresenta-se o percentual de lodo destinado à reciclagem agrícola em países de média e alta renda.

**Tabela 3.5** – Percentual atual de reciclagem agrícola do lodo de esgoto sanitário em países de média e alta renda

~5% crescente	e > 30% crescente	e > 60% e crescente	Estável	Diminuindo	Pouco usado e sem tendência de crescimento
Brasil (15%)	Canadá (33%)	Austrália (81%)	Itália (69%)	Áustria (65%)	Japão (14%)
Bulgária (5%)	China (50%)	República Checa (67%)	EUA (55%)	Alemanha	Nova Zelândia
Jordânia (0%)	UE (~40%)	Nova Zelândia (66%)	Noruega (~95%)		Suíça (0%)
México (~0%)	Hungria (39%)	Eslováquia (69%)			
Turquia	Portugal				

Fonte: UN-Habitat, 2008

Christodoulou e Stamatelatou (2016), após avaliarem a legislação relativa ao tratamento e disposição final de biossólidos de diversos países desenvolvidos (Japão, Estados Unidos da América (EUA), Austrália, Nova Zelândia, países da União Europeia (EU), Reino Unido, Alemanha e Grécia) concluíram que as mudanças observadas prevalecem, na maioria dos casos, no sentido de explorar o valor nutritivo e energético do lodo. A Tabela 3.6 apresenta, de forma sucinta, as principais práticas de destinação do lodo de esgoto sanitário nos países estudados pelos autores mencionados anteriormente, juntamente com as perspectivas de mudanças legais relacionadas ao tema.

**Tabela 3.6 – Realidade da gestão do lodo e perspectivas relacionadas a legislação em alguns países**

<b>Destinação</b>	<b>Japão</b>	<b>EUA</b>	<b>Austrália</b>	<b>Nova Zelândia</b>	<b>UE27</b>	<b>Reino Unido</b>	<b>Alemanha</b>	<b>Grécia</b>
<b>Disposição oceânica</b>	Banido (2004)	Banido (1982)	Sendo banido (1% em 2010)	Desencorajado (10% em 2010)	Banido (1999)	Banido (1998)	Banido	Banido (2000)
<b>Aterro</b>	Permitido apenas para cinzas de incineração	Desencorajado	Abandonado na maioria dos estados	Principal método de disposição	Restrito e a ponto de ser banido	Quase abandonado (<1% em 2010)	Aplicável apenas se teor de matéria orgânica <3%	Desencorajado
<b>Uso na agricultura</b>	Escassamente utilizado	Principal uso	Principal uso	Encorajado, mas uso ainda escasso	Principal uso	Principal uso	Usos significante, mas em declínio	Encorajado e em crescimento
<b>Outras formas de uso no solo</b>	Nenhuma	Biossólido (compostagem) comercializado para paisagismo	Silvicultura, recuperação de áreas degradadas, mineração	Silvicultura, recuperação de áreas degradadas, mineração	Composto para paisagismo	Silvicultura, recuperação de áreas degradadas	Composto para paisagismo	Adubo de biossólidos
<b>Tratamento térmico</b>	Principal uso (>70%)	Uso moderado	Não preferido, aplicação limitada	Não aplicado	Em crescimento	Não preferido	Principal uso (quase > 50%)	Principal uso recentemente (>50%)
<b>Expectativas de mudança na legislação</b>	Inclusão de recuperação de fósforo e aproveitamento energético	Regras para disposição em aterro mais restritas. Promoção dos métodos térmicos e aproveitamento energético	Minimização da disposição no oceano e em aterros. Extensão do uso agrícola e aproveitamento energético	Minimização da disposição no oceano e em aterros. Extensão do uso agrícola e aproveitamento energético	Regras de disposição em aterros mais restritas. Promoção do aproveitamento energético	Recuperação do fósforo do efluente líquido	Regras restritas para o uso na agricultura. Regras para recuperação de fósforo e aproveitamento energético.	Minimização da disposição em aterros. Extensão do uso agrícola e aproveitamento energético

Fonte: Adaptado de Christodoulou e Stamatelatu (2016)

Observa-se na Tabela 3.6 que nos Estados Unidos, na Austrália, países da União Europeia e Reino Unido, o uso agrícola do lodo caracteriza-se como a principal prática de destinação final do mesmo. Na Nova Zelândia e na Grécia essa prática tem sido encorajada e crescente. Em relação às expectativas de mudanças legais, percebe-se que em muitos países as práticas seguem no intuito de restringir a disposição do lodo em aterros e promover o uso agrícola, a recuperação de fósforo e o aproveitamento energético.

No que diz respeito aos países em desenvolvimento, é revelado na publicação da *UN-Habitat* (2008) que, devido ao aumento do número de infraestruturas de tratamento de esgoto e, conseqüentemente, do volume de lodo gerado, esses países tem se deparado com o desafio da gestão e destinação desse subproduto. Em países como China, Rússia, México, Colômbia e países do Oriente Médio, os avanços seguem no sentido de desenvolver a regulamentação sobre o uso agrícola do lodo. Alguns dos desafios enfrentados por esses países têm sido a deficiência da prática de tratamento do lodo nas estações de tratamento de esgoto, os custos associados a esse tratamento, bem como o fato de não haver condições de mercado estabelecidas para sua comercialização. Destaca-se, dentre os países em desenvolvimento, o desempenho da China, onde a aplicação do lodo de esgoto sanitário no solo tem sido a principal forma de disposição desse subproduto. Nos demais países, esta prática é observada apenas pontualmente.

No Brasil, se dispõe de poucas informações sobre o destino final do lodo de esgoto. Os dados oficiais mais recentes relativos a este tema são do ano de 2000, publicados pelo IBGE através da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB). Os dados dessa pesquisa são exibidos na Tabela 3.7 discriminados por região geográfica, sendo apresentados também os dados para o país e para Minas Gerais. Os valores são expressos como o percentual de distritos com tratamento de esgoto, conforme o destino do lodo gerado.

**Tabela 3.7** – Percentual do número de distritos com tratamento de esgoto sanitário por destino do lodo gerado

<b>Região</b>	<b>Aterro sanitário</b>	<b>Reaproveitamento</b>	<b>Disposição inadequada<sup>1</sup></b>	<b>Outro</b>	<b>Sem declaração</b>
Brasil	24	12	28	29	11
Minas Gerais	16	12	40	28	7
Norte	21	16	16	37	11
Nordeste	13	6	60	24	1
Sudeste	30	5	19	31	17
Sul	17	36	25	23	4
Centro-Oeste	23	18	25	33	4

<sup>1</sup>Disposição oceânica, fluvial ou em terreno baldio. Fonte: IBGE, 2000 (PNSB).

Observa-se que, no ano de 2000, grande parte dos distritos destinavam o lodo de esgoto sanitário inadequadamente, especialmente em Minas Gerais e no Nordeste. Cabe lembrar que, como os valores referem-se ao número de distritos por destino do lodo, caso se considerasse o volume de lodo conforme sua destinação, estes percentuais seriam diferentes. A região Sul do país é a que mais se destaca na prática de reaproveitamento do lodo. Presume-se que este destaque possa ser devido ao pioneirismo e avanço do aproveitamento agrícola do lodo no estado do Paraná.

Adicionalmente, Machado (2001) estimou que o percentual de lodo destinado à agricultura no Brasil é de 15%, enquanto 50% seriam destinados à disposição em aterros sanitários. No estado de Minas Gerais, por sua vez, não foi reportada a prática de aproveitamento agrícola do lodo na pesquisa realizada por esse mesmo autor. Alméri (2010) (apud MATTA, 2011), todavia, estimou que apenas 3% do lodo de esgoto sanitário no Brasil seja aplicado no solo, especialmente na agricultura. Diante disso, destaca-se que, apesar do grande potencial agrícola do Brasil e de Minas Gerais e da vasta quantidade de área destinada à essa atividade econômica, o percentual do lodo destinado ao uso agrícola ainda é baixo.

Por fim, destaca-se que um aspecto importante no processo de uso de lodo na agricultura é a integração de muitas pessoas envolvidas nos processos (geração, transformação, transporte, incorporação de solo), tais como empresas de saneamento, institutos de produção rural e assistência técnica, empresas de controle ambiental, agricultores e pessoas em geral. Diante disso, se reconhece a grande necessidade e a importância de integração para a cooperação técnica e operacional entre as partes envolvidas no processo para que haja um crescimento da prática de aproveitamento agrícola do lodo no Brasil (UN-HABITAT, 2008).

### **3.2.2 Impactos positivos e negativos da disposição do lodo no solo**

A disposição do lodo no solo pode causar impactos positivos e impactos negativos nesse meio. Esses impactos podem ser potencializados ou minimizados a partir das diversas decisões a serem tomadas a respeito da sua aplicação no solo, tais como dose aplicada, forma, período e local de aplicação. Por essa razão, torna-se muito importante listar e compreender os possíveis impactos associados à prática, de forma a possibilitar o uso benéfico e consciente do lodo no solo.

Apresentam-se então, na Tabela 3.8, alguns possíveis impactos associados à disposição do lodo no solo:

**Tabela 3.8** – Possíveis impactos positivos e negativos da disposição do lodo no solo

<b>Impactos positivos</b>	<b>Impactos negativos</b>
Aumento da superfície específica da fração sólida do solo	Alteração na cor do solo e consequente aumento na absorção de energia solar
Estruturação e estabilização dos agregados	Alteração desfavorável no pH do solo
Retenção de água no solo	Salinização do solo
Melhoria da consistência do solo	Indisponibilização de alguns nutrientes para as plantas
Aumento da fertilidade do solo	Contaminação do solo com metais pesados
Alteração favorável no pH	Contaminação do solo com patógenos
Neutralização de elementos químicos tóxicos	Contaminação de águas superficiais
Melhoria na biota do solo	Contaminação de águas subterrâneas

Fonte: Matos, 2014

Kumar, Chopra e Kumar (2017), em uma revisão sobre as diferentes aplicações e as possíveis limitações do uso do lodo como recurso, realizaram um levantamento de diversas pesquisas que relataram os efeitos da aplicação de lodo de esgoto no solo e no cultivo agrícola. Os resultados dessas pesquisas indicaram, claramente, que o uso do lodo aumenta o crescimento geral e o rendimento das culturas agrícolas e reduz a aplicação de fertilizantes químicos ou sintéticos. Por outro lado, os pesquisadores relataram, também, a presença de elementos tóxicos, como metais pesados, no solo e em várias culturas agrícolas, devido à aplicação do lodo.

A concentração de metais pesados no lodo e o possível acúmulo destes metais em longo prazo no ambiente do solo consistem em preocupações importantes e que devem ser levadas em conta ao se propor o aproveitamento agrícola do lodo de esgoto. O acúmulo de metais pesados no solo apresenta consequências para a qualidade da cadeia alimentar humana, toxicidade para plantas e processos microbianos do solo, em decorrência de seus elevados tempos de residência no ambiente.

A concentração de metais pesados no lodo é muito variável e especialmente dependente das características da bacia de contribuição de esgotos, em lodo de esgotos provenientes de estações que tratam esgotos de cidades com grande parque industrial, por exemplo, estas concentrações são mais elevadas. Além disso, após serem adicionados ao solo, os metais pesados podem ficar na forma solúvel, trocável, fixada pelos minerais no solo, formando precipitados ou quelatos, de forma que o impacto de sua presença será potencializado ou minimizado a depender da forma em que esteja presente (MATOS, 2014). Dessa forma, o

monitoramento da presença e do acúmulo destes poluentes no lodo e no solo são de extrema importância para assegurar seu aproveitamento agrícola seguro deste subproduto.

Smith (2009), em uma revisão sobre o tema, verificou a existência de diversas evidências experimentais demonstrando a redução na biodisponibilidade e a absorção de metais presentes em lodo compostado, quando comparadas com as proporcionadas por outros tipos de lodo de esgoto. Por conseguinte, inferiu-se que o processo de compostagem, em geral, contribui para reduzir a disponibilidade de metais em comparação com outras técnicas de bioestabilização de resíduos.

Por fim, ressalta-se que, apesar dos diversos benefícios que a aplicação do lodo no solo pode trazer, é necessária uma criteriosa seleção dos locais de utilização e das doses de aplicação para que sejam minimizados os riscos ambientais associados à prática, a qual deve estar atrelada às características do lodo, do solo e do meio físico onde está localizada a área. É necessário controlar: o aporte de elementos tóxicos (como metais pesados) e agentes patogênicos; os mecanismos de dispersão (escoamento superficial e lixiviação); contaminação indireta (proximidade da população e de corpos hídricos, alimentação animal e contaminação de alimentos); e o equilíbrio de nutrientes (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

### **3.2.3 Legislação Nacional**

Tendo em vista os impactos negativos que podem estar associados à disposição do lodo no solo, a legislação brasileira prevê normas para regulamentação dessa prática. A Resolução CONAMA 375 de 29 de agosto de 2006 define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Dentre os diversos temas tratados na Resolução CONAMA 375/2006 (2006), a mesma prevê as seguintes obrigações:

- a) Caracterização do lodo quanto ao potencial agrícola, concentração de substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos, além de estabilidade bioquímica;
- b) Limites máximos de concentração de diversas substâncias inorgânicas e de concentração de patógenos de acordo com o tipo de lodo (lodo tipo A – usos menos restritivos; lodo tipo B – usos mais restritivos). A Tabela 3.9 apresenta tais limites estabelecidos.

**Tabela 3.9** – Limites de concentração de patógenos conforme classes de lodo de esgoto

<b>Tipo de lodo de esgoto</b>	<b>Concentração de patógenos</b>
A	Coliformes termotolerantes < 10 <sup>3</sup> NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g de ST
	Salmonella ausência em 10 g de ST
	Vírus < 0,25 UFP em 10 de ST
B	Coliformes termotolerantes < 10 <sup>6</sup> NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g de ST

Fonte: CONAMA (2006)

- c) Restrições locacionais das áreas de aplicação;
- d) Critérios para definição da taxa de aplicação máxima, com base no teor de nitrogênio disponível no lodo e na carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do lodo de esgoto;
- e) Os processos considerados adequados para redução significativa de patógenos e as devidas recomendações para cada processo, são eles: i) digestão aeróbia; ii) secagem em leitos de areia ou em bacias; iii) digestão anaeróbia; iv) compostagem, v) estabilização com cal.
- f) Os processos considerados adequados para redução adicional de patógenos, são eles: i) compostagem confinada ou em leiras aeradas; ii) secagem térmica direta ou indireta para reduzir a umidade do lodo de esgoto ou produto derivado a 10% ou menos; iii) tratamento térmico pelo aquecimento do lodo de esgoto; iv) digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio; v) processos de irradiação com raios beta; vi) processos de pasteurização.

Analisando comparativamente as legislações brasileira (CONAMA 375/2006), estadunidense (Norma 503) e britânica (*Safe Sludge Matrix*) em relação à qualidade microbiológica de biossólidos para uso agrícola, Bastos, Bevilacqua e Mara (2013) fizeram alguns apontamentos, a saber:

- Os critérios de qualidade Classe A, em termos de padrão de *E. coli* ou coliformes termotolerantes são, essencialmente, os mesmos nos três países (10<sup>3</sup> *E. coli* ou Coliformes termotolerantes / g ST);
- A Resolução CONAMA 375/2006 estabelece um padrão de coliformes termotolerantes para biossólidos Classe B bem similar ao da Norma 503 (<10<sup>6</sup> Coliformes termotolerantes /g ST);

- Diferentemente da CONAMA 375/2006, nas normas britânica e estadunidense as variáveis operacionais se prestam ao papel de indicadores da eficiência do tratamento do lodo e substituem o controle por meio do monitoramento de patógenos;
- A regulamentação britânica impõe intervalos de colheita/pastejo quando biossólidos tipo Classe A são aplicados em pastagens e forrageiras (3 semanas) ou em culturas alimentícias (verduras e legumes) (10 meses). A legislação brasileira, por sua vez, estabelece restrições mais rigorosas para o uso de biossólidos Classe A, impondo longos intervalos entre a aplicação do biossólido no solo e o cultivo de culturas comestíveis (48 meses) e pastagens (24 meses);
- Em geral, destacou-se que a abordagem brasileira aparenta ser extremamente conservadora.

Assim como foi apontado pelos autores sobre o caráter restritivo da legislação brasileira em relação à qualidade microbiológica do lodo e intervalos de colheita e pastejo, diversos outros aspectos da legislação são questionados, alegando-se que o instrumento legal, ao invés de promover e impulsionar o aproveitamento agrícola do lodo no Brasil, obstaculiza a prática no país.

Ainda assim, sabe-se que as técnicas disponíveis para higienização do lodo apresentam eficácia e eficiência suficientes para alcançar os limites estipulados na referida legislação. Além disso, a definição de padrões microbiológicos para aproveitamento agrícola do lodo promove a segurança sanitária da prática e, por isso, também resguarda a mesma. Dessa forma, acredita-se que os itens da resolução que geram obstáculos ao aproveitamento do lodo não são os limites microbiológicos em si, mas outros como: intervalos entre aplicação do lodo e colheita ou pastejo, frequência de monitoramento do lodo, proibição da utilização do lodo Classe B, dentre outros.

De qualquer maneira, a discussão sobre o caráter restritivo da legislação consiste em um tema polêmico e com diferentes pontos de vista, sobre os quais não se cabe discutir e aprofundar neste trabalho. No entanto, torna-se importante destacar que a Resolução CONAMA 375/2006 tem passado, atualmente, por um processo de revisão, no qual são discutidos, por diversos profissionais e pesquisadores do tema, os diversos tópicos de divergência existentes. Desta forma, é importante ter ciência de que alguns aspectos poderão ser alterados após o desenvolvimento desta pesquisa, como, por exemplo, a permissão do uso do lodo Classe B (de qualidade microbiológica inferior) em lavouras de cafeeiro.

Além da resolução mencionada, pode-se citar outros instrumentos legais alusivos ao tema, a saber: Instruções Normativas do Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento (IN 25 de 27/07/2009 e IN 07 de 12/04/2016) e a Resolução do CONAMA nº 481 de 03/10/2017.

A IN 25/2009 (MAPA, 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. Nesta instrução normativa, o lodo de esgoto é descrito, em outras palavras, como uma matéria-prima proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários de utilização segura na agricultura, desde que atenda à certos parâmetros estabelecidos. Adicionalmente, os fertilizantes orgânicos são classificados em diversas classes, sendo que o fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, é classificado como “Classe D”. Para essa classe de fertilizantes são estabelecidas as seguintes especificações:

- a) Umidade máxima = 70%;
- b) Teor de nitrogênio total mínimo = 0,5 dag/kg (na matéria seca a 65 °C);
- c) Teor de carbono orgânico total mínimo = 15 dag/kg (na matéria seca a 65 °C);
- d) pH mínimo = 6,0;
- e) Relação C/N máxima = 20;
- f) Aplicação somente através de equipamentos mecanizados. Durante o manuseio e aplicação, devem ser utilizados equipamentos de proteção individual (EPI). Uso proibido em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.

A IN 07 de 12/04/2016 define os limites máximos de contaminantes admitidos em substratos para plantas, inclusive de organismos patogênicos. Nessa instrução normativa são definidos limites de concentração de coliformes termotolerantes, *salmonella* e ovos viáveis de helmintos, idênticos aos definidos na Resolução CONAMA 375/2006. Difere, no entanto, o fato de, na IN 07 de 12/04/2016, não estarem definidos limites para concentração de vírus entéricos.

Tendo em vista a existência de instrumentos legais do MAPA para regulamentação dessa prática, é interessante discutir que o licenciamento ambiental do aproveitamento agrícola do lodo pode ser feito tanto pelo órgão ambiental responsável como pelo Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento. Esta situação pode ser interessante e tornar a etapa de

licenciamento mais prática e ágil, uma vez que este tipo de licenciamento ainda não é muito comum nos órgãos ambientais e, portanto, ainda existe certa dificuldade para que sejam efetivados.

Por fim, a Resolução CONAMA 481/2017 (CONAMA, 2017) estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Dentre estes critérios e providências pode-se citar:

- a) É permitida a utilização de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitário para produção de composto orgânico;
- b) A temperatura deve ser medida e registrada ao menos uma vez por dia durante o período mínimo de higienização indicado na Tabela 3.10:

**Tabela 3.10** – Período de tempo e temperatura necessários para higienização dos resíduos sólidos orgânicos durante o processo de compostagem

Sistema de compostagem	Temperatura (°C)	Tempo (dias)
Sistemas abertos	> 55	14
	> 65	3
Sistemas fechados	> 60	3

Fonte: CONAMA, 2017

- c) O processo de compostagem deve garantir uma relação C/N no composto final menor ou igual a 20.

### 3.2.4 Técnicas de higienização do lodo de esgoto

#### 3.2.4.1 Técnicas disponíveis

As principais técnicas de higienização do lodo de esgoto são: compostagem, digestão aeróbia autotérmica, pasteurização, caleação e secagem térmica. Os tópicos a seguir apresentam uma breve descrição sobre cada uma destas técnicas (VON SPERLING, 2005):

- a) Compostagem: processo aeróbio de decomposição da matéria orgânica efetuada através de condições controladas de temperatura, umidade, oxigênio e nutrientes. A inativação de organismos patogênicos ocorre, principalmente, através da via térmica. O produto resultante deste processo tem grande valor econômico como condicionador de solos.
- b) Digestão aeróbia autotérmica: neste processo, o lodo é geralmente pré-adensado e opera com dois estágios aeróbios. Como o volume de reação é menor, o sistema é

fechado e a concentração de sólidos no lodo é alta, o calor liberado nas reações aeróbias aquece o lodo, proporcionando a inativação dos patógenos. Os principais fatores a serem controlados para o sucesso operacional do sistema são a eficiência de mistura e a aeração.

- c) Pasteurização: envolve o aquecimento do lodo a 70 °C por 30 minutos, seguido de rápida refrigeração a 4 °C. O lodo pode ser aquecido por trocadores de calor ou por injeção de vapor aquecido.
- d) Caleação: este processo baseia-se na adição de cal ao lodo (líquido ou desidratado), visando proporcionar aumento do pH para 12, por período de tempo maior que 2 h, o que proporciona redução na população de microrganismos e da potencial ocorrência de odores.
- e) Secagem térmica: consiste em se passar o lodo por uma fonte de calor, de modo a provocar a evaporação da água existente no lodo e alcançar a inativação térmica de microrganismos. O lodo seco apresenta aspecto granular e teor de sólidos da ordem de 90 a 95%.

Alguns requisitos relacionados a estas técnicas foram comparados por Teixeira Pinto (2001) e são apresentados na Tabela 3.11.

**Tabela 3.11** – Comparação entre tecnologias de higienização do lodo

Processo	Área	Pessoal especializ.	Energia externa	Produtos químicos	Biomassa externa	Custo de construção	Custo de O&M
Compostagem (leiras)	+++	+	+ / +++	+	+++	+	+
Digestão aeróbia autotérmica	++	++	++	+	+	++	++
Pasteurização	++	++	+++	+	+	++	++
Caleação	++	+ / +++	+	+++	+	+	++
Secagem térmica	+	+++	+	+	+	+++	+++

+++ : Significativa importância    ++ : Moderada importância    + : Pouca importância

Fonte: Teixeira Pinto, 2001

De acordo com os aspectos levantados de cada técnica, é possível afirmar que o processo de compostagem é uma técnica oportuna de ser aplicada em estações de tratamento de esgoto de pequeno e médio porte. Isso porque, normalmente, em ETEs desses portes, as principais limitações são disponibilidade de mão de obra especializada e custos de implantação, operação e manutenção. Por outro lado, a disponibilidade de área em estações de médio e pequeno porte não é, normalmente, um fator limitante.

Conforme será apresentado nos resultados, em Minas Gerais a maior parte das ETEs é de pequeno porte, sendo assim, acredita-se que a aplicação desta tecnologia para tratamento do lodo condiz com a realidade do estado. Adicionalmente, o estudo deste método de higienização do lodo nesta pesquisa se justifica pela necessidade da entrada de biomassa externa na aplicação da técnica, permitindo, assim, a incorporação da casca de café ao processo e o fortalecimento da associação entre os setores urbano e agrícola. Por fim, outros fatores motivadores para o estudo da compostagem são a alta qualidade do composto orgânico produzido e a maior aceitabilidade desse subproduto pelos produtores rurais, por se tratar de algo já conhecido e utilizado por eles.

#### 3.2.4.2 Compostagem

O processo de compostagem pode ser definido como: “Processo por meio do qual se obtém a decomposição biológica controlada de resíduos orgânicos, transformando-os em material parcialmente humificado.” (MATOS, 2014).

O processo de compostagem é desenvolvido por uma população diversificada de microrganismos e envolve duas fases distintas: a primeira de degradação ativa (necessariamente termofílica), e a segunda de maturação ou "cura". Na fase de degradação ativa, a temperatura deve ser controlada a valores na faixa de 45 °C a 65 °C, enquanto na fase de maturação ou cura, a temperatura do processo deve ser que menor que 45 °C (PEREIRA NETO, 1996)

A manutenção de temperaturas termofílicas controladas, na fase de degradação ativa, é um dos requisitos básicos do processo, uma vez que somente por meio desse controle é que se pode conseguir o aumento na sua eficiência, ou seja, aumento na velocidade de degradação e eliminação dos microrganismos patogênicos (PEREIRA NETO, 1996). Diante da importância da temperatura na inativação de patógenos, está estabelecido na Resolução 375/2006 (CONAMA, 2006) que, nos processos de compostagem por leiras reviradas, deve ser mantida a temperatura mínima de 55 °C durante pelo menos 15 dias, com revolvimento mecânico da leira em pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo.

Entre as vantagens do processo de compostagem, podem ser citadas: possibilidade de maior conservação de macro e micro nutrientes no composto; eliminação de grande parte das fitotoxinas produzidas na decomposição natural dos resíduos vegetais no solo; inibição de patógenos responsáveis por algumas doenças em plantas, animais e seres humanos; melhoria

das características físicas, químicas e biológicas do solo com a incorporação do composto orgânico (MATOS, 2014).

Para que a compostagem aconteça de maneira eficiente, é necessário o atendimento de algumas condições. De acordo com a literatura (FERNANDES; SILVA, 1999; MATOS, 2014; PEREIRA NETO, 1996) os principais requisitos a serem atendidos são: o conteúdo de água (recomenda-se que este seja mantido em torno de 55 dag/kg); a concentração de carbono e nitrogênio (em geral, há consenso de que a taxa ótima de relação C/N inicial seja de 25 a 35:1) e o ciclo de reviramento. O reviramento das pilhas tem as funções básicas de propiciar a aeração da massa, dissipar as altas temperaturas desenvolvidas na fase ativa de degradação e expor o material externo às altas temperaturas internas. Pereira Neto (1996) indicou que um ciclo de reviramento de três em três dias durante a fase termofílica é satisfatório e que, durante a fase mesofílica, o reviramento não é necessário. Matos (2014), por outro lado, afirma que durante esta segunda fase, o reviramento pode passar a ser feito a cada cinco dias.

Diversos estudos foram desenvolvidos para se avaliar a qualidade microbiológica possível de se alcançar através do processo de compostagem, inclusive quando o lodo de esgoto foi usado como um dos substratos do processo. Na Tabela 3.12 apresenta-se uma síntese de alguns estudos que avaliaram a qualidade microbiológica do lodo compostado.

**Tabela 3.12** – Síntese de estudos que avaliaram a qualidade microbiológica do lodo compostado

Parâmetro de qualidade microbiológica	Contagem de patógenos no lodo bruto	Contagem de patógenos no lodo compostado	Tempo de compostagem (dias)	Referência
Ovos viáveis de helmintos <sup>1</sup>	N.D.	Ausente	165	Heck et al., 2013
Coliformes totais <sup>2</sup>	N.D.	3,4x10 <sup>5</sup>		
Coliformes termotolerantes <sup>2</sup>	N.D.	4x10 <sup>4</sup>		
<i>Salmonella</i> <sup>3</sup>	N.D.	Ausente		
Vírus entéricos <sup>4</sup>	N.D.	Ausente		
Ovos viáveis de helmintos <sup>1</sup>	0,24	Ausente	20	Teixeira, 2012
Coliformes termotolerantes <sup>2</sup>	1,0x10 <sup>5</sup>	7,4x10 <sup>3</sup>	3 dias a 70 °C 6 dias a 60 °C	
<i>Salmonella</i> <sup>3</sup>	Ausente	Presente em 20% das amostras		
Vírus entéricos <sup>4</sup>	Ausente	Ausente		
Vírus entéricos <sup>4</sup>	Ausente	Ausente		
Ovos viáveis de helmintos (ovos/gST)	0,27	0,05	86	Leite, 2015
Coliformes termotolerantes (NMP/gST)	2,5x10 <sup>3</sup>	0,0		
<i>Salmonella</i> (NMP/10gST)	Ausente	Ausente		
Ovos viáveis de helmintos <sup>1</sup>	~48,5	~7,6	100	Mengistu et al., 2017
Coliformes termotolerantes <sup>2</sup>	~5,0x10 <sup>4</sup>	~3,0x10 <sup>2</sup>		
<sup>1</sup> Ovos/gST <sup>2</sup> NMP/gST <sup>3</sup> NMP/10gST <sup>4</sup> UFF/gST	N.D: Não determinado			

A partir das informações apresentadas na Tabela 3.12, conclui-se que, de forma geral, no lodo compostado nos diversos experimentos não foi detectada a presença de vírus entéricos e *salmonella*. No entanto, a ausência destes patógenos não pode ser atribuída, necessariamente, aos mecanismos de higienização que ocorrem durante a compostagem, uma vez que, na maioria dos casos, esses microrganismos já não estavam presentes no lodo bruto. No tocante à contagem de ovos viáveis de helmintos, observou-se que, na maioria dos casos, obteve-se contagens inferiores a 0,25 ovos/gST, com exceção dos últimos resultados apresentados. Nesse caso, é possível que a maior contagem de ovos viáveis de helmintos no composto orgânico final seja consequência da alta concentração desse agente patogênico no lodo bruto. Por fim, a contagem de coliformes termotolerantes variou entre os estudos apresentados, sendo inferior a  $10^3$  NMP/gST em alguns casos.

Além dos estudos de avaliação da qualidade microbiológica do composto orgânico produzido com lodo de esgoto, diversos estudos sobre sua qualidade nutricional, isto é, o teor de nutrientes, estão disponíveis. A seguir, na Tabela 3.13, apresenta-se uma síntese de alguns destes estudos, sendo especificado o tipo de material compostado com o lodo (material estruturante) e a concentração dos nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio.

**Tabela 3.13** – Síntese de estudos que avaliaram o teor de nutrientes no composto orgânico produzido com lodo de esgoto sanitário.

Material estruturante	Teor de nutrientes (dag/kg)			Referência bibliográfica
	N <sub>T</sub>	P <sub>T</sub>	K <sub>T</sub>	
Palha de feijão	1,63	0,42	0,68	Zuba Junio et al., 2011
Podas de árvores (proporção 3:1)	1,96	0,80	0,27	Scheer et al., 2012
Podas de árvores (proporção 2:1)	1,93	0,84	0,29	Scheer et al., 2012
Podas de árvores (proporção 1:1)	2,74	1,80	1,80	Backes et al., 2013
Casca de arroz carbonizada (proporção 4:1)	2,55	0,73	0,35	Rocha et al., 2013
Casca de arroz carbonizada (proporção 3:2)	2,34	0,67	0,37	Rocha et al., 2013
Casca de arroz carbonizada (proporção 1:1)	2,21	0,62	0,37	Rocha et al., 2013
Casca de arroz carbonizada (proporção 2:3)	2,04	0,56	0,39	Rocha et al., 2013
Casca de arroz carbonizada (proporção 1:4)	1,54	0,39	0,43	Rocha et al., 2013
Poda de grama	1,45	0,28	0,28	Nascimento et al., 2014
Bagaço de cana, podas de árvores e grama	2,77	0,87	0,33	Romeiro et al., 2014

A partir dos estudos apresentados, observa-se que o teor de nitrogênio variou entre 1,45 e 2,77 dag/kg, o teor de fósforo variou entre 0,28 e 1,80 dag/kg e o teor de potássio variou de 0,27 a 1,80 dag/kg. Essa variação pode ser atribuída aos diferentes materiais estruturantes utilizados, às variações na qualidade do lodo de esgoto utilizado no processo, bem como as diferenças no

controle operacional do processo em cada pesquisa. Os maiores teores de nitrogênio encontrados, por exemplo, referem-se a duas pesquisas realizadas com composto orgânico produzido na ETE Jundiaí – SP, dessa forma, acredita-se que a maior experiência e produção em grande escala dessa estação contribuiu para maior controle nas perdas de nitrogênio e, por isso, maior conservação deste nutriente. Ainda assim, apesar das variações encontradas, percebe-se que a concentração destes macronutrientes convergem para valores médios.

Um estudo de viabilidade econômica da produção de lodo de esgoto compostado foi realizado na ETE Lageado da Sabesp, em Botucatu (MARTINS, 2016). Neste estudo, o autor comparou o custo anual com transporte e disposição do lodo em aterro sanitário com o custo anual para produção do lodo compostado com base no processo de produção de um lote de caráter experimental. Foram considerados na produção do lodo compostado os custos fixos (preparação da área, aquisição de instalações e maquinário) e os custos variáveis (energia elétrica, mão de obra, movimentação interna do lodo e aquisição de matéria-prima que será a fonte de carbono). Os resultados revelaram que os custos com o processo de compostagem representam 38% dos custos para disposição do lodo em aterro sanitário. Ademais, caso o lodo compostado fosse comercializado como fertilizante, sua venda geraria uma receita de aproximadamente 270 mil reais, anualmente.

Como exemplo da aplicação da técnica de compostagem para tratamento do lodo de esgoto em escala real pode-se citar a atuação da empresa Tera Ambiental, na cidade de Jundiaí, São Paulo. A empresa, criada em 2012, possui experiência operacional desde 1999 e é especializada no tratamento biológico de efluentes e na compostagem de resíduos orgânicos. Adicionalmente, o composto orgânico produzido é comercializado como um fertilizante orgânico classe D (TERA AMBIENTAL, [s.d.]

O exemplo da atuação desta empresa no estado de São Paulo, bem como o estudo de viabilidade econômica da produção de lodo compostado mencionado no parágrafo anterior, são positivos e revelam que a aplicação da técnica para tratar o lodo e dar a ele uma destinação mais sustentável é factível. No entanto, sabe-se que diferentes desafios e custos estarão envolvidos conforme a realidade de cada estado. Em Minas Gerais, por exemplo, sabe-se que o custo para disposição em aterros sanitários, em muitos casos, pode ser reduzido, seja devido a acordos firmados entre as companhias de saneamento e os responsáveis municipais pela gestão de resíduos sólidos ou devido à disposição inadequada do lodo (em lixões, por exemplo). Ainda assim, mesmo que as companhias de saneamento não sejam responsáveis por arcar com estes custos, eles são reais, sejam eles monetários ou não.

### 3.3 Café

#### 3.3.1 O Café em Minas Gerais

O Brasil é, tradicionalmente, o maior e mais importante país produtor de café do mundo. Tendo iniciado sua produção em meados do século XVIII, esta atividade econômica cumpre importante papel na geração de empregos e riqueza em diversas regiões do território nacional, onde suas lavouras estão instaladas. O estado de Minas Gerais, por sua vez, destaca-se como o maior estado produtor de café no Brasil, sendo o responsável, em média, pela metade da produção brasileira. A cafeicultura, juntamente com a extração mineral, protagonizou a formação da identidade de Minas Gerais, estado que ofereceu o clima propício para o desenvolvimento dessa cultura (INAES, 2010).

Para melhor compreensão da importância dessa atividade econômica para o estado de Minas Gerais, apresenta-se, na Tabela 3.14, os valores correspondentes à área ocupada pelas lavouras de cafeeiro e pelas demais lavouras em Minas Gerais e no Brasil, além da receita gerada por essas lavouras.

**Tabela 3.14** – Representatividade, em termos monetários e de área cultivada, do café em Minas Gerais

		<b>Área</b> <b>(milhões de ha)</b>	<b>Receita</b> <b>(bilhões de reais)</b>
<b>Minas Gerais</b>	Lavoura de cafeeiro	1,04	14,02
	Lavouras permanentes	1,17	16,70
	Lavouras temporárias e permanentes	5,53	38,08
<b>Brasil</b>	Lavoura de cafeeiro	2,00	21,36
	Lavouras permanentes	5,77	55,92
	Lavouras temporárias e permanentes	77,17	317,46

Fonte: IBGE, 2016

Destaca-se, dentre as informações apresentadas, que as lavouras de cafeeiro representam 89% de toda área destinada à plantação de lavouras permanentes e 19% da área destinada a todos os tipos de lavoura. Em relação à receita total gerada no estado de Minas Gerais pelas atividades agrícolas, o café contribui com 37%. A receita gerada pela produção de café representa 84% da receita gerada apenas pelas culturas permanentes. Comparando-se a produção mineira com a brasileira, evidencia-se que Minas Gerais é responsável por 66% da receita obtida a partir da produção de café do Brasil.

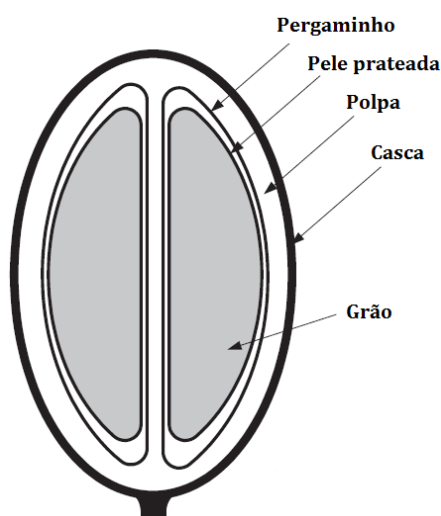
Assim sendo, tendo em vista a representatividade e importância do cultivo do cafeeiro no estado de Minas Gerais, optou-se nesta pesquisa por avaliar a técnica de compostagem do lodo de esgoto sanitário com o resíduo gerado no processamento dos frutos do cafeeiro, bem

como avaliar a possibilidade de aproveitamento deste composto nas próprias lavouras dessa cultura. Cabe mencionar, que em uma revisão das principais culturas testadas no Brasil com aplicação de lodo de esgoto sanitário entre os anos de 2004 e 2014 (CASTRO; SILVA; SCALIZE, 2015), não foi mencionado nenhum estudo sobre a aplicação desse subproduto em culturas de cafeeiro. Ainda que nesta pesquisa não tenham sido avaliados, diretamente, os efeitos da aplicação do lodo de esgoto nessas culturas, acredita-se que a avaliação das oportunidades existentes em Minas Gerais para essa prática possa despertar a atenção para o desenvolvimento de mais pesquisas nessa área. Além da justificativa de destinar o lodo para as plantações de cafeeiro devido à importância econômica desta cultura agrícola, outra justificativa para reforçar essa prática está associada à sua maior segurança sanitária em comparação com outras culturas, devido ao fato de não haver contato direto do fruto com o solo e ao fato de este fruto ser processado antes de consumido, na forma de infusão (bebida de café).

### 3.3.2 Resíduos do processamento do fruto do cafeeiro

O grão de café constitui apenas 50-55% de toda a matéria seca do fruto tipo "cereja" maduro. O material remanescente constitui diversos tipos de resíduos, dependendo da técnica de processamento utilizada (OLIVEIRA; FRANCA, 2015).

O fruto do cafeeiro normalmente contém dois grãos de café no interior, sendo cada um coberto com um tegumento bem ajustado, denominado "pele prateada". Uma segunda pele, de cor amarelada, é denominada "pergaminho" e também recobre cada grão. Os grãos cobertos de pergaminho estão envoltos em uma polpa mucilaginosa, a "carne" ou polpa do fruto que, por sua vez, é coberta pela pele externa ou casca (Figura 3.1).



**Figura 3.1** – Partes constituintes do fruto do cafeeiro.

Fonte: Oliveira; Franca, 2015

Para obtenção do grão de café, podem ser utilizados dois métodos de processamento: o método por via seca ou o método por via úmida. A casca de café e a sua polpa são os principais resíduos sólidos resultantes do processamento por via seca e via úmida, respectivamente (OLIVEIRA; FRANCA, 2015).

O processamento por via seca consiste na técnica mais simples para manipulação dos frutos do cafeeiro. Após a colheita, os frutos são secos até atingirem um teor de água entre 10 e 11% e, em seguida, os grãos são obtidos a partir da remoção do material que os cobre em uma máquina de descascamento (OLIVEIRA; FRANCA, 2015). A casca de café resultante do processamento do fruto por via seca, representa de 12% (MURTHY; NAIDU, 2012) a 29% (MATOS, 2008) da matéria seca total do fruto. No processamento por via úmida, a polpa que cobre os grãos é removida antes da secagem, de forma que o principal resíduo gerado, denominado "polpa do café", representa 29% do peso seco do fruto. Além da polpa do café, no processamento por via úmida é gerado um tipo de casca denominada "pergaminho", na proporção de 10% (BRAHAM; BRESSANI, 2010) a 12% (MURTHY; NAIDU, 2012) da massa total do fruto seco.

A produção de café natural, nome dado quando o café é obtido através do método via seca, é o modo mais antigo de processar o café e é largamente utilizado nas regiões onde há uma estação seca característica durante o período de colheita (BORÉM, 2008). Este método de processamento é predominantemente utilizado para os cafés Arábica e Robusta colhidos no Brasil (BORÉM, 2008; OLIVEIRA; FRANCA, 2015).

### **3.3.3 A casca de café**

Tradicionalmente, os possíveis usos para a casca consistem em sua aplicação como fertilizante, alimentação animal e compostagem. Entretanto, critica-se o fato de estas alternativas utilizarem uma fração pequena diante da grande quantidade de resíduo gerada (MURTHY; NAIDU, 2012). Além disso, em se tratando da aplicação direta da casca de café como fertilizante, Shemikite et al. (2014) alegam que, devido à presença de compostos fenólicos, sua aplicação direta no meio ambiente pode inibir o crescimento das plantas.

Especialmente em relação à compostagem, Murthy e Naidu (2012) afirmam que a demanda do mercado não é suficiente para absorver todo o volume fornecido de casca e polpa de café. Por esta razão, acredita-se que a utilização da casca de café para compostagem do lodo de esgoto poderia representar um aumento nessa demanda de mercado, que se alega ser baixa, consumindo-se, assim, parte desse resíduo, que é gerado em grandes quantidades.

A casca de café é rica em potássio e outros nutrientes, sendo, portanto, um interessante substrato para compostagem. Adicionalmente, devido a sua alta relação C/N, esse resíduo pode cumprir o papel de material estruturante na compostagem com o lodo de esgoto. A composição da casca do café é apresentada na Tabela 3.15.

**Tabela 3.15** – Características físicas e químicas da casca de café

<b>Componente</b>	<b>Concentração</b>	<b>Componente</b>	<b>Concentração</b>
N <sub>T</sub> (dag/kg)	1,32 – 3,99	C/N	31 a 39/1
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (dag/kg)	0,07	Na (mg/kg)	160
CO <sub>T</sub> (dag/kg)	53,0 – 54,5	Fe (mg/kg)	250 – 1600
P <sub>T</sub> (dag/kg)	0,05 – 0,21	Cu (mg/kg)	18,66 – 25,0
K <sub>T</sub> (dag/kg)	0,52 – 4,7	Zn (mg/kg)	4,35 – 30,0
Ca (dag/kg)	0,30 – 1,4	Mn (mg/kg)	125
Mg (dag/kg)	0,03 – 0,12		

Fonte: Matos, 2014

Além das diversas justificativas apresentadas (alta concentração de nutrientes, média relação C/N, grandes volumes gerados e alternativas de destinação insuficientes) para se acreditar que o uso da casca de café na constituição de leiras de compostagem do lodo de esgoto representa alternativa interessante, outra vantagem do uso desse resíduo na compostagem é a dimensão das partículas. A casca de café possui dimensões adequadas para que a compostagem seja feita sem a necessidade de uma trituração prévia do material, dispensando uma etapa do processo que poderia ser necessária caso outros tipos de substratos fossem utilizados.

Por fim, aponta-se, também, que estão disponíveis na literatura variados estudos de experimentos de compostagem de casca de café com substratos diferentes do lodo de esgoto como, por exemplo, esterco de bovinos de leite e resíduos alimentares (SHEMEKITE et al., 2014) e águas residuárias da suinocultura (MATOS et al., 1998). No entanto, não foram encontrados estudos que avaliaram a compostagem desse resíduo especificamente com o lodo de esgoto sanitário.

### **3.3.4 Necessidade de adubação das lavouras de cafeeiro**

As recomendações oficiais para adubação das diversas culturas agrícolas de Minas Gerais, inclusive das lavouras de cafeeiro, são apresentadas pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG), no manual intitulado “Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5º Aproximação)” (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999).

A necessidade de adubação das lavouras de cafeeiro irá variar conforme o estágio de desenvolvimento da planta, podendo ser diferenciadas as seguintes adubações: adubação de plantio, adubação de pós-plantio em cobertura, adubação de 1º e 2º ano pós-plantio e adubação de produção. No caso da adubação de produção, a quantidade de fertilizantes é determinada em função da produtividade média da lavoura, da fertilidade do solo (a qual é função do teor de fósforo, potássio e teor de argila no solo) e do teor de nitrogênio foliar. Na Tabela 3.16 são explicitadas as quantidades de nutrientes necessárias para adubação das lavouras de cafeeiro.

**Tabela 3.16** – Doses de nitrogênio, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recomendadas em função da produtividade da lavoura, fertilidade do solo e teor de nitrogênio foliar.

		Produtividade esperada (sc/ha)						
			<20	21-30	31-40	41-50	51-60	>60
<b>Dose de N recomendado (kg/(ha.ano))</b>	<b>Teor de N foliar (dag/kg)</b>	<b>&lt;2,5</b>	200	250	300	350	400	450
		<b>2,6-3,0</b>	140	175	220	260	300	340
		<b>3,1-3,5</b>	80	110	140	170	200	230
<b>Dose de K<sub>2</sub>O recomendado (kg/(ha.ano))</b>	<b>Classe de fertilidade</b>	<b>Baixo</b>	200	250	300	350	400	450
		<b>Médio</b>	150	190	225	260	300	340
		<b>Bom</b>	100	125	150	175	200	225
		<b>Muito bom</b>	0	0	0	50	75	100
<b>Dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recomendado (kg/(ha.ano))</b>	<b>Classe de fertilidade</b>	<b>Muito baixo</b>	30	40	50	60	70	80
		<b>Baixo</b>	20	30	40	50	55	60
		<b>Médio</b>	10	20	25	20	35	40
		<b>Bom</b>	0	0	0	15	18	20
		<b>Muito bom</b>	0	0	0	0	0	0

Fonte: Ribeiro; Guimarães; Alvarez V., 1999

Torna-se importante discutir a questão da disponibilização do nitrogênio como nutriente a ser disponibilizado pelo adubo utilizado no cultivo das plantas. Adubos orgânicos, como é o caso do lodo de esgoto e do composto orgânico, apresentam uma vantagem em relação aos fertilizantes químicos, que consiste na disponibilização gradual do nitrogênio para as plantas. Assim, caso se aplique uma dose única do fertilizante químico para suprimento das necessidades da cultura, é possível se prever que grande parte do nitrogênio será lixiviado, visto que a planta absorve os nutrientes de forma gradual, o que poderia causar a contaminação de águas subterrâneas além de causar deficiência no suprimento para atendimento das necessidades da cultura. No caso do uso do lodo e do composto orgânico para suprimento das demandas nutricionais da cultura, possibilita-se melhor equacionamento entre a disponibilização de nitrogênio e capacidade de absorção pela planta.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa pode ser dividida em duas partes principais: a etapa experimental e a etapa voltada para a análise de oportunidades de produção e uso do composto em Minas Gerais.

A primeira parte, apresentada nos tópicos 4.1, 4.2 e 4.3, diz respeito à caracterização do local do experimento e aos métodos utilizados para produção do composto orgânico e para sua caracterização física, química e microbiológica. A partir dos resultados alcançados com estes métodos, os quais são apresentados nos tópicos 5.1 e 5.2, foi possível testar as duas primeiras hipóteses desta pesquisa e alcançar os dois primeiros objetivos propostos.

Nos tópicos 4.4 e 4.5, são apresentados os métodos utilizados para testar a terceira e a quarta hipótese e alcançar os dois últimos objetivos propostos, sendo os resultados alcançados expostos nos tópicos 5.4 e 5.5. Nesta etapa da pesquisa, buscou-se identificar, uma vez conhecida a qualidade do composto orgânico produzido, as oportunidades existentes para sua produção e o seu uso no estado de Minas Gerais.

### 4.1 *Caracterização do local do experimento*

O experimento foi desenvolvido no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CEPTS) da UFMG, localizado na Estação de Tratamento de Esgotos do Ribeirão Arrudas, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais (Figura 4.1 e Figura 4.2). O lodo utilizado neste experimento foi proveniente de um dos reatores UASB existentes nesse local, enquanto a casca de café foi doada por um produtor de café da cidade de Santo Antônio do Amparo-MG.

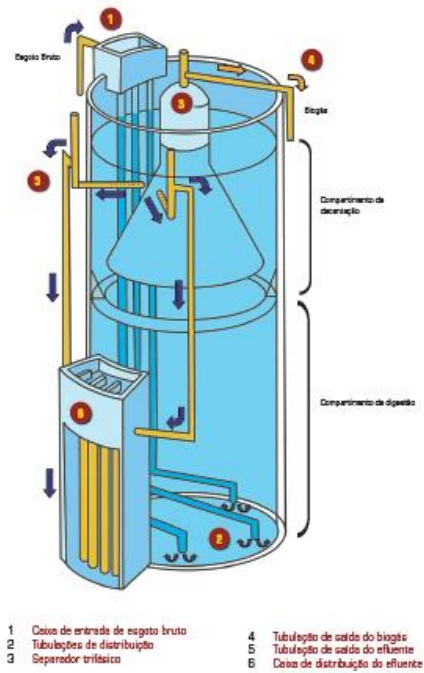


**Figura 4.1** – Localização do CEPTS (destaque em vermelho). Fonte: Google EARTH



**Figura 4.2** – Foto do CEPTS (com destaque para o reator UASB utilizado no experimento)

O reator UASB cujo lodo foi utilizado preparação das leiras (Figura 4.3) trata uma vazão de  $40 \text{ m}^3/\text{d}$ , correspondente a uma população de 320 habitantes e possui as seguintes características: diâmetro externo = 2,10 m; diâmetro interno = 2,00 m; altura útil = 4,5 m; volume útil =  $14,2 \text{ m}^3$ ; TDH médio de projeto = 7,5 horas (DESA, [s.d.]).



**Figura 4.3** – Reator UASB cujo lodo foi utilizado no experimento. Fonte: (DESA, [s.d.])

As pilhas de material em compostagem foram montadas no interior de dois leitos de secagem já existentes no local do experimento. Optou-se por esse local em razão da inexistência de um local impermeabilizado e com sistema de drenagem para os efluentes drenados do material. Assim, os leitos de secagem puderam cumprir a função de drenagem do líquido que, porventura, viesse a percolar do material durante o processo de compostagem. Os leitos utilizados possuem 0,70 metros de altura, 2 metros de largura e 4 metros de comprimento (Figura 4.4).



**Figura 4.4** – Leitos de secagem onde foram formadas e mantidas as leiras de compostagem

## 4.2 Caracterização física, química e microbiológica do lodo de reator UASB, da casca de café e do composto orgânico

### 4.2.1 Resumo dos métodos de análises laboratoriais empregados

Na Tabela 4.1 apresenta-se o método utilizado para determinação de cada parâmetro estudado nesta pesquisa, bem como as referências com a descrição desses métodos. A frequência de monitoramento de cada parâmetro, a justificativa para escolha dos mesmos, bem como algumas informações relevantes sobre os métodos empregados são apresentadas nos tópicos seguintes.

**Tabela 4.1** – Análises utilizadas para determinação dos parâmetros de interesse

Parâmetro	Método	Referência bibliográfica
Teor de sólidos totais, fixos e voláteis	Gravimétrico	Brasil, 2007
pH <sup>1</sup>	Eletroquímico (potenciometria)	Brasil, 2014
COT	Instrumental (oxidação térmica)	DESA UFMG, 2015
Nitrogênio total <sup>2</sup>	Titulométrico	Bremner, 1996
NTK <sup>2</sup>	Titulométrico	Bremner, 1996
Nitrogênio amoniacal	Titulométrico	APHA, 2012
Fósforo total <sup>2</sup>	Colorimétrico	APHA, 2012
Potássio <sup>2</sup>	Absorção atômica	APHA, 2012
Coliformes totais e <i>E. coli</i>	Técnica Colilert® e Tubos Múltiplos	Kramer; Liu, 2002 e USEPA, 2010
Ovos de helmintos	Contagem em placa	Meyer et al., 1978
Salmonella	Contagem em placa	USEPA, 2006
Colifagos	Contagem em placa	Guzmán et al., 2007

<sup>1</sup>pH em solução 0,01 mol/l de CaCl<sub>2</sub>, proporção entre material sólido e solução igual a 1:5

<sup>2</sup>Amostras previamente submetidas à digestão ácida, à quente (MATOS, 2015).

Obs.: A fração nitritos e nitratos foi calculada a partir da diferença entre N total e NTK

Com exceção das análises de potássio, que foram realizadas pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), todas as análises foram realizadas no Laboratório de Microbiologia e no Laboratório de Análises Físico-Químicas do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG. Todas as análises físico-químicas foram feitas em triplicata, sendo assumido como valor final a mediana dos valores obtidos para cada amostra. A leitura ao microscópio da presença de ovos de helmintos, também foi feita em triplicata, porém, neste caso, o valor final adotado correspondeu à média dos valores obtidos nas medições.

Para determinação dos teores de carbono orgânico total, nitrogênio total, NTK, fósforo e potássio, as amostras eram secas a 65 °C e moídas em moinhos de panela, no Departamento de Engenharia de Minas. A determinação do nitrogênio amoniacal foi feita nas amostras *in natura* e, posteriormente, os resultados foram corrigidos em relação à matéria seca,

considerando-se o teor de água medido no material seco sob temperatura de 65°C. As análises microbiológicas foram feitas nos materiais *in natura* e os resultados corrigidos em relação à matéria seca, considerando-se o teor de água contido no material depois de seco sob temperatura de 105 °C. Isso foi feito para que os resultados obtidos pudessem ser expressos em coerência com as legislações pertinentes.

#### **4.2.2 Caracterização física e química**

Tanto o lodo de reator UASB e a casca de café quanto o composto orgânico foram caracterizados quanto ao teor total de nitrogênio ( $N_T$ ), fósforo ( $P_T$ ), potássio ( $K_T$ ) e carbono orgânico total (COT), além do teor de sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos e pH. Adicionalmente, no composto final, foram determinadas as frações do nitrogênio. Optou-se pelo monitoramento dos parâmetros citados pelos seguintes motivos: i) comparação da qualidade do composto com a qualidade requerida pela IN 25/2009; ii) acompanhamento do processo de maturação do composto; e iii) determinação da quantidade de nutrientes no adubo para avaliação do equilíbrio nutricional e para que se utilizasse esses valores como dados de entrada na investigação das duas últimas hipóteses da pesquisa.

O lodo de reator UASB e a casca de café foram caracterizados no que se refere ao teor de fósforo, de potássio e de nitrogênio total; previamente ao início do processo de compostagem, sendo feitas as mesmas análises no composto orgânico produzido, ao final do processo. Durante o processo de compostagem, foram quantificados o teor de nitrogênio total e carbono orgânico total, o pH e os teores de sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos no material orgânico. Os teores de nitrogênio total e carbono orgânico total foram monitorados mensalmente, o pH foi monitorado semanalmente, e os teores de sólidos foram medidos duas vezes por semana, no primeiro mês do processo, e semanalmente, nos meses seguintes.

Conhecendo-se o teor total de nitrogênio, fósforo e potássio no composto orgânico, foi necessário determinar os teores disponíveis de nutrientes no material, isto é, a quantidade que poderia ser efetivamente disponibilizada para as plantas quando o adubo fosse disposto no solo. Para isso, foi necessário definir qual seria a fração de mineralização do composto. A Resolução CONAMA 375/2006 define que a fração de mineralização anual do lodo compostado é igual a 0,1, no entanto, estudos revelaram que esta fração geralmente é superior a 0,9 (DINIZ et al., 2016). Quanto menor a fração de mineralização considerada, maior o risco de se assumir doses elevadas de aplicação de um adubo, por essa razão, optou-se por assumir uma fração de mineralização anual igual a 1,0, evitando-se, assim, a proposição de

doses elevadas de aplicação do composto que poderiam causar danos à cultura agrícola, ao solo e às águas subterrâneas e superficiais. Sendo assim, os teores disponibilizados de nitrogênio, fósforo e potássio no composto equivaleram ao teor total desses nutrientes no composto orgânico produzido. A dose de nitrogênio a ser disponibilizada pelo composto orgânico, por outro lado, foi calculada a partir da Eq. 4.1, indicada na Resolução CONAMA 375/2006, tomando-se  $FM$  igual a 1,0.

$$N_{disp} = FM \times (NTK - N_{amo}) + (0,5 \times N_{amo}) + N_{Nit} \quad (4.1)$$

Em que:

$N_{disp}$  = Nitrogênio disponibilizado (mg/kg);

$FM$  = Fração de mineralização (decimal);

$NTK$  = Nitrogênio Kjeldahl (mg/kg);

$N_{amo}$  = Nitrogênio amoniacal (mg/kg);

$N_{Nit}$  = Nitrito e nitrato (mg/kg).

#### 4.2.3 Caracterização microbiológica

No que diz respeito aos parâmetros microbiológicos, foram feitas análises de coliformes totais, *Escherichia coli* e ovos viáveis de helmintos no lodo e análises de coliformes totais, coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *salmonella* e colifagos (como indicadores da presença de vírus entéricos) no composto orgânico. Esses parâmetros foram escolhidos por se tratarem dos contaminantes biológicos especificados nas legislações pertinentes à prática de uso agrícola do lodo de esgoto sanitário. Não foi determinada a presença de *salmonella* e colifagos no lodo de reator UASB, pois, inicialmente, pretendia-se avaliar a qualidade do adubo produzido considerando-se apenas os usos mais restritivos, como é o caso do cafeeiro, para os quais a restrição legal incide apenas na contagem de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos. No entanto, no decorrer da pesquisa, percebeu-se que o adubo produzido teria condições de alcançar uma qualidade para usos menos restritivos também e, assim, optou-se por se fazer a caracterização microbiológica completa do material.

No tocante às análises microbiológicas, torna-se necessário levantar algumas observações:

- a) Devido às limitações laboratoriais existentes para determinação de vírus entéricos, determinou-se a contagem de colifagos no lodo de esgoto sanitário. Colifagos são vírus e possuem um tamanho semelhante ao dos vírus entéricos, por essa razão espera-se que os dois tipos de vírus tenham comportamentos semelhantes no meio ambiente.

Diversos estudos têm avaliado a relação entre a presença de colifagos e vírus entéricos, sendo que em um trabalho de revisão desenvolvido pela Agência Ambiental Norte Americana (USEPA, 2015) conclui-se que os colifagos podem ser substituições razoáveis para indicar a presença de vírus entéricos no meio ambiente.

- b) Foram utilizadas duas metodologias distintas para determinação das bactérias do grupo coliformes, a técnica Colilert® e a técnica de tubos múltiplos. A princípio, tinha-se o intuito de utilizar apenas a técnica Colilert®, a partir da qual obteve-se resultados satisfatórios para determinação da presença de coliformes no lodo bruto. No entanto, a aplicação desta técnica no composto orgânico mostrou-se inadequada, tendo em vista que os resultados obtidos nas cartelas eram de difícil leitura e interpretação. Por esta razão, utilizou-se a técnica de tubos múltiplos para determinação da presença de coliformes do composto orgânico.

Tendo em vista que os métodos citados foram empregados conforme o que consta nas referências citadas, não sendo necessário proceder adaptações, pressupôs-se ser desnecessário proceder-se o detalhamento de cada análise na metodologia desta pesquisa (tanto das análises físicas e químicas quanto das microbiológicas). No entanto, pelo fato da contagem de ovos de helmintos se tratar de uma análise que requer maiores esforços, acredita-se ser relevante destacar algumas dificuldades observadas na aplicação do método escolhido para determinação deste parâmetro nas amostras de composto orgânico.

No método proposto por Meyer et al. (1978), o objetivo dos procedimentos consiste em suspender os ovos contidos na amostra utilizando-se, para isso, uma solução de maior densidade que a água (solução de sulfato de zinco), seguido de processo de centrifugação. No entanto, para se obter um sobrenadante clarificado (o que permite uma leitura ao microscópio mais fácil e precisa) é necessária uma etapa anterior de lavagem das amostras com solução de hipoclorito de sódio e solução detergente. Nesta etapa, adiciona-se a solução detergente, leva-se as amostras à centrifuga e descarta-se o sobrenadante, sendo recomendado que este procedimento seja repetido até que se obtenha um sobrenadante clarificado.

A etapa de lavagem das amostras consistiu na principal dificuldade de aplicação do método. Isso aconteceu, devido ao fato de se ter uma amostra com grande intensidade de cor. Dessa forma, foram necessárias muitas repetições da etapa de lavagem (cerca de 70 vezes) para que se obtivesse um sobrenadante parcialmente clarificado, o que proporcionou maior dispêndio de tempo para o desenvolvimento da análise. Além disso, observou-se que, por se tratar de uma amostra com baixa densidade e partículas grosseiras, eram necessários grandes volumes

de amostra para atingir a massa recomendada para análise (isto é, 75 gramas) e, por esta razão, o manuseio das amostras (como a transferência do material da vidraria para os tubos de centrífuga) foi ligeiramente dificultado. De qualquer maneira, acredita-se que os resultados obtidos foram relevantes e coerentes com a pesquisa, no entanto, julgou-se pertinente expor as dificuldades enfrentadas neste trabalho para auxiliar na escolha e desenvolvimento do método para aplicação em outras pesquisas que porventura possam utilizar amostras com características semelhantes.

#### 4.2.4 Amostragem

Para coleta das amostras, seguiram-se as recomendações da NBR 10007 (ABNT, 2004), que versa sobre a amostragem de resíduos sólidos. Para isso, utilizou-se um amostrador do tipo “*Trier*”, com o qual retiravam-se amostras do topo, do meio e da base em diferentes comprimentos da leira. A Figura 4.5 exibe o amostrador utilizado nas coletas e os pontos das leiras de onde eram retiradas as amostras.



**Figura 4.5** – Amostrador para coleta e pontos de coleta

As amostras eram, então, postas em um balde e homogeneizadas com uma colher e, em seguida, colocadas em uma lona onde era feita a redução de massa através do quarteamento do material, até que se obtivesse o volume desejado. Obtinha-se, dessa forma, amostras compostas de cada leira de compostagem. Na Figura 4.6 apresentam-se imagens para elucidar o processo de obtenção das amostras compostas.



**Figura 4.6** – Etapas para obtenção das amostras das leiras de compostagem

### **4.3 Preparação e operação das leiras de compostagem**

#### **4.3.1 Preparação das leiras de compostagem**

O processo de compostagem utilizado foi o Windrow, isto é, aeração proporcionada por reviramento do material. Nesse processo, recomenda-se que as leiras ou pilhas devam possuir de 1,0 a 1,8 m de altura e 1,0 a 4,0 m de base (MATOS, 2014). Assim, as pilhas teriam um volume entre 0,26 m<sup>3</sup> e 7,54 m<sup>3</sup>. Conforme a quantidade de matéria-prima obtida para o experimento, bem como o espaço disponível para montagem das pilhas e as limitações humanas para sua construção e operação, optou-se pela construção de 4 pilhas de aproximadamente 1,2 m<sup>3</sup> inicialmente, com cerca de 0,65 m de altura, 1,85 de base e 2,0 m de comprimento.

Estabelecido o volume que as pilhas deveriam ter, a relação entre a quantidade de carbono e nitrogênio (C/N) recomendada pela literatura (FERNANDES; SILVA, 1999; MATOS, 2014) entre 25:1 a 35:1 e a concentração desses elementos químicos na casca de café e no lodo de esgoto sanitário, foi possível definir a proporção de cada um desses resíduos na mistura para formação das pilhas, conforme Eq. 4.2 e Eq. 4.3.

$$(M_L/\rho_L) + (M_C/\rho_C) = 1,2 \text{ m}^3 \quad (4.2)$$

Em que:

$M_L$  = Massa úmida de lodo (kg);

$M_C$  = Massa úmida de casca (kg);

$\rho_L$  = Massa específica do lodo de esgoto (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_C$  = Massa específica da casca de café (kg/m<sup>3</sup>).

$$C/N = \frac{(M_L \times T.S.L \times [C]_L + M_C \times T.S.C \times [C]_C)}{(M_L \times T.S.L \times [N]_L + M_C \times T.S.C \times [N]_C)} \quad (4.3)$$

Em que:

$[C]_L$  = Concentração de carbono orgânico total (COT) no lodo (dag/kg);

$[C]_C$  = Concentração de carbono orgânico total (COT) na casca de café (dag/kg);

$[N]_L$  = Concentração de nitrogênio no lodo (dag/kg);

$[N]_C$  = Concentração de nitrogênio na casca de café (dag/kg);

T.S.L = Teor de sólidos do lodo de reator UASB (%)

T.S.C = Teor de sólidos da casca de café (%)

### 4.3.2 Montagem das leiras de compostagem

A partir dos resultados de caracterização do lodo do UASB do CEPTS e da casca de café, que são apresentados no tópico 5.1.1, definiu-se que a relação C/N inicial foi igual a 25:1 e, assim, a proporção, em volume, de casca e lodo seria de 5 para 1. A montagem das pilhas aconteceu uma semana após a coleta das amostras de lodo e casca de café, nos dias 19/06/17 (pilhas 1 e 2) e 20/06/17 (pilhas 3 e 4), e, por isso, nessa época, o teor de sólidos e a massa específica do lodo já haviam se alterado. Porém, era conhecido o volume de lodo por ocasião da coleta (0,8 m<sup>3</sup>) e, portanto, o volume de casca que deveria ser adicionado naquelas condições (4 m<sup>3</sup>). Assim, considerando-se que o teor de carbono e nitrogênio no lodo (na matéria seca) não foi alterado devido ao desaguamento, ou seja, não houve perda desses elementos químicos no líquido percolado, ainda que o volume de lodo tenha se alterado entre a coleta e a montagem das pilhas, o volume de casca de café necessário para compostagem se manteve constante.

Dessa forma, para a montagem das pilhas de compostagem, dividiu-se o volume de lodo entre dois leitos de secagem (Figura 4.7) e adicionou-se 2 m<sup>3</sup> de casca de café úmida em cada leito, sendo este volume controlado com base nas dimensões do leito de secagem em que a casca estava sendo colocada (Figura 4.8). Feito isso, o material foi misturado e dividido pela metade (Figura 4.9), sendo formadas duas pilhas em cada um dos dois leitos de secagem (Figura 4.10).



**Figura 4.7** – Divisão do volume de lodo entre os dois leitos de secagem



**Figura 4.8** – Disposição da casca de café nos leitos de secagem



**Figura 4.9** – Detalhe da etapa de mistura e divisão do material orgânico em duas pilhas



**Figura 4.10** – Detalhe das pilhas de compostagem prontas

### **4.3.3 Critérios operacionais das pilhas de compostagem**

A princípio, baseado em informações da literatura (FERNANDES; SILVA, 1999; MATOS, 2014), assumiu-se que o tempo de compostagem do material ocorreria entre 90 e 120 dias, sendo que a decisão do momento de encerrar o experimento foi tomada com o apoio de dados de características do material, como relação C/N e teor de sólidos voláteis. Durante esse período, os requisitos operacionais das pilhas de compostagem foram, basicamente, a aeração, a umidificação e o monitoramento da temperatura do material.

A aeração foi obtida por meio do reviramento manual das pilhas de material (Figura 4.11), uma vez que os pequenos volumes a serem processados não justificavam a instalação de

sistema mecanizado. Para isso, utilizou-se ferramentas como enxada, pá e rastelo (Figura 4.12). A partir de recomendações da literatura (FERNANDES; SILVA, 1999; MATOS, 2014), o reviramento nos primeiros 30 dias de compostagem foi feito a cada três dias, pois neste período a temperatura do material aumenta consideravelmente e a demanda por oxigênio é alta. Do 31º dia ao 60º dia, o reviramento foi semanal e, do 61º dia em diante, o reviramento passou a ser mensal.



**Figura 4.11** – Detalhe do reviramento do material constituinte das pilhas



**Figura 4.12** – Ferramentas utilizadas para reviramento do material

O monitoramento da temperatura do material foi feito diariamente, no primeiro mês do processo (com exceção dos finais de semana), e aproximadamente uma vez por semana, nos meses seguintes. Esse monitoramento é de extrema importância, tendo em vista que a

temperatura está diretamente associada à inativação de patógenos e que o seu perfil de variação deve atender às recomendações da legislação. Para isso, foi utilizado um termômetro digital de haste metálica, da marca *Simpla*, com as seguintes especificações: faixa de medição entre -50 a 300 °C, resolução de 0,1 °C (-50 a 199,9 °C) e 1° C (200 a 300 °C), exatidão de  $\pm 1$  °C (-50 a 149,9 °C) e  $\pm 1\%$  (150 a 300 °C), haste com 148 mm de comprimento e 4 mm de diâmetro (Figura 4.13). Mediu-se a temperatura em 15 pontos distintos das leiras, nos mesmos pontos apresentados na Figura 4.5 em que eram retiradas as amostras. Na Figura 4.14 apresenta-se uma foto para exemplificar o processo de medição de temperatura e o registro da elevação da temperatura durante a compostagem.



**Figura 4.13** – Termômetro utilizado nas medições de temperatura do material



**Figura 4.14** – Exemplo da medição de temperatura do material das pilhas

No que diz respeito ao controle do teor de água no material das pilhas, nas duas primeiras semanas procedeu-se da seguinte forma: foram coletadas amostras para determinação do teor de água e da massa específica do material em laboratório e, no dia seguinte, de posse destes resultados, adicionava-se água suficiente para que o teor de água ficasse próximo de 55 dag/kg. No entanto, durante este período, observou-se que, entre uma amostragem e outra, esse teor baixava para níveis inferiores a 50 dag/kg chegando, em alguns dias, a ser inferior a 40 dag/kg. Por essa razão, nas semanas seguintes, optou-se por fazer a adição de água baseando-se no aspecto visual e tátil do material. Nesse período, os resultados do teor de água obtidos em laboratório foram utilizados para verificar se o volume de água adicionado estava sendo adequado ou não. Para o controle da quantidade de água a ser adicionado ao material constituinte das pilhas, foi medida a vazão de uma mangueira, utilizando-se, para isso, um recipiente de volume conhecido e um cronômetro e, em seguida, o material das pilhas foi umedecido, aplicando-se água com a mangueira, durante um período de tempo determinado (Figura 4.15).



**Figura 4.15** – Adição de águas ao material das pilhas em compostagem

#### **4.4 Estimativa da quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais**

##### **4.4.1 Estimativa da produção de lodo nas ETEs mineiras**

A massa de lodo gerada nas ETEs mineiras foi estimada a partir dos valores propostos por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) de geração *per capita*, conforme o processo de tratamento empregado. Segundo é reportado por estes autores, a produção *per capita* de sólidos secos pode variar de 6 gST/(hab.d), nas lagoas facultativas e nos reatores aeróbios com biofilme, a 45 gST/(hab.d) nos decantadores primários, nas lagoas anaeróbias e nos lodos

ativados de aeração prolongada. Nos processos com mais de uma etapa de tratamento, esse valor pode chegar até 80 gST/(hab.d), como é o caso dos sistemas de lodos ativados convencionais e de biofiltro aerado submerso. No caso dos reatores UASB, a produção de lodo encontra-se na faixa de 12 a 18 gST/(hab.d).

Acessou-se, previamente, material produzido pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2017), no qual continha, dentre outras informações, a localização das ETEs brasileiras em operação, a tecnologia de tratamento e a população atendida por cada estação. A partir destas informações e consulta à literatura mencionada no parágrafo anterior, foi possível estimar a produção de sólidos secos por ETE, conforme é explicitado na Eq. 4.4.

$$M_{lodo} = GPC_i \times Pop \quad (4.4)$$

Em que:

$M_{lodo}$  = Massa de lodo seco produzida na estação (kgST/ano);

$GPC$  = Geração per capita de lodo (kgST/(hab.ano));

$i$  = Tecnologia de tratamento da ETE;

$Pop$  = População atendida pela ETE (hab).

Obteve-se, assim, a quantidade de lodo de reator UASB produzido em cada ETE cujo fluxograma é composto por esses reatores. Os resultados gerados referiam-se à quantidade de sólidos secos, porém, para que fosse possível calcular a quantidade de lodo passível de ser compostado com a casca de café, foi necessário convertê-los para matéria úmida. Nesse caso, considerou-se um teor de sólidos igual a 15%, posto que a proporção entre as matérias primas foi calculada considerando-se este valor de teor de sólidos do lodo.

Adicionalmente, calculou-se a produção de lodo de todas as tecnologias utilizadas no estado. Estes valores são apresentados nos resultados expressos como a quantidade total de lodo produzido em Minas Gerais pelas diversas tecnologias de tratamento.

#### **4.4.2 Estimativa das áreas de lavoura de cafeeiro localizadas próximas a ETEs**

Para identificação das lavouras de cafeeiro localizadas próximas a ETEs, foram utilizadas duas bases de dados geoespacializadas, a saber: i) o mapeamento das áreas de cultivo do cafeeiro em Minas Gerais; ii) e o mapeamento das ETEs existentes em Minas Gerais (ANA, 2017).

Em relação à primeira base de dados, essa foi obtida mediante solicitação à Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Este mapeamento representa as áreas de lavoura de cafeeiro no ano de 2012, no entanto, está previsto para o ano de 2018 o lançamento de um geoportal denominado “Geoportal do Café” que, dentre outras informações, conterà o mapeamento das lavouras de cafeeiro no estado de Minas Gerais e a produtividade dessas lavouras no ano de 2016. Devido à metodologia utilizada na criação desse geoportal, que inclui a validação, em campo, das áreas mapeadas, sabe-se que sua precisão será maior do que a do mapa acessado nesta pesquisa. Diante disso, se reconhece e destaca-se a importância de se realizar a atualização dos dados gerados nesta pesquisa quando o acesso ao “Geoportal do Café” se tornar público.

Para extração das informações desejadas, essas bases de dados geoespacializadas foram trabalhadas no *software QGIS*. Optou-se pela utilização deste *software* pelo fato de sua licença de uso ser gratuita e por ele dispor de todas as ferramentas necessárias para a condução desta pesquisa.

Visando identificar as lavouras localizadas a uma distância máxima de 30 km das ETES, foram traçados círculos de raio igual a 30 km, centralizados nas estações, com o auxílio da ferramenta *buffer*. A partir de então, definiu-se as áreas inseridas nesses raios, utilizando-se, para isso, as ferramentas *interseção* e a ferramenta de cálculo de área do *software QGIS*. Estes resultados foram, então, extraídos para o formato *xlsx* e manipulados no *software Excel*.

A escolha do raio de 30 km baseou-se no fato de essa ser a distância média aproximada percorrida para disposição ambientalmente adequada, isto é, em aterros sanitários, do lodo de ETES localizadas nas bacias do Rio das Velhas e dos Rios Jequitaiá e Pacuí. Este valor foi obtido a partir de informações fornecidas pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais sobre o destino do lodo de 26 ETES sob sua responsabilidade. De posse dessa informação e da localização das estações de tratamento de esgoto, foi possível calcular a distância percorrida para disposição do lodo de cada ETE com o auxílio do *Google Maps*.

#### **4.4.3 Estimativa da produção de casca de café**

A massa de casca de café gerada nas lavouras localizadas nas proximidades das estações de tratamento de esgoto foi calculada a partir da multiplicação dos seguintes fatores: i) área de cultivo do cafeeiro, calculada com o auxílio do *software QGIS*; ii) produtividade média dos cafezais do município em que a fazenda está localizada (PAM, 2012); iii) geração de casca de café em relação à quantidade de fruto processado (considerou-se igual a 10% da matéria seca

do fruto de café arábica (BRAHAM; BRESSANI, 2010)). Tal raciocínio é evidenciado com maior clareza na Eq. 4.5.

$$M_{casca} = A_{plant.} \times Pd \times Pp \quad (4.5)$$

Em que:

$M_{casca}$  = Massa de casca de café gerada (kg/ano);

$A_{plant.}$  = Área plantada com cafezais (ha);

$Pd$  = Produtividade média dos cafezais por ano (kg/(ha.ano));

$Pp$  = Proporção de casca de café em relação à quantidade de grão processado (%).

Torna-se importante esclarecer que foi assumido que a geração de casca equivale à 10% da matéria seca do fruto de café arábica de forma que os resultados fossem mais conservadores, isto é, para que a quantidade de casca gerada no entorno das ETEs não fosse superestimada e concluir-se que existem oportunidades de compostagem do lodo com a casca de café maiores do que realmente há. Assim, como a geração de casca de café pode variar de 10% a 29% em relação a massa seca do fruto (conforme exposto no item 3.3.2), a depender do tipo de processamento a que o fruto é submetido, optou-se por assumir o menor percentual para os cálculos.

Adicionalmente, dado que a proporção de casca de café em relação ao fruto do cafeeiro é expressa em relação à matéria seca e a produtividade média dos cafezais refere-se ao grão *in natura*, ou seja úmido, assumiu-se que o teor de sólidos do grão de café equivale a 88% (SILVA; NOGUEIRA; ROBERTO, 2005). Em seguida, assim como nos cálculos de produção de lodo, os valores de quantidade de casca de café foram convertidos da relação à matéria seca para matéria úmida. Para isso, considerou-se um teor de sólidos de 89%, dado que a proporção entre as matérias primas foi calculada considerando-se esse valor de teor de sólidos na casca de café.

#### **4.4.4 Estimativa da quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais**

A quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais foi calculada a partir da proporção adequada de mistura desses materiais, definida conforme apresentado no tópico 4.3.1, e a disponibilidade de matérias primas, calculada segundo exposto nos tópicos 4.4.1 e 4.4.3.

A partir desses valores, definiu-se, em cada caso, qual seria a matéria prima limitante, isto é, aquela que se dispunha em menor quantidade, considerando-se a proporção de mistura adequada. A partir dessa definição, calculou-se a quantidade da outra matéria prima que poderia ser misturada ao material para compostagem, utilizando-se toda a massa da matéria prima limitante. Por exemplo, se em determinado caso a quantidade de casca de café fosse inferior a quantidade de lodo vezes a sua proporção na mistura, ela seria a matéria prima limitante e seria calculado quanto de lodo seria possível misturar para que se pudesse compostar toda a casca de café disponível na região em estudo.

#### **4.5 Estimativa da área de cafezal passível de ser fertilizada com o composto orgânico produzido**

Nesta etapa do trabalho já eram conhecidas as seguintes informações:

- Massa de lodo de reator UASB produzida em cada ETE;
- Área destinada ao cultivo de cafeeiro no entorno das ETEs e quantidade de casca de café disponível para se efetuar a compostagem;
- Proporção adequada de lodo de reator UASB e casca de café para formação das leiras de compostagem;
- Massa de composto passível de ser produzida, considerando-se a disponibilidade e a proporção de matéria prima e a redução de massa observada experimentalmente;
- Características do composto orgânico produzido, determinada experimentalmente.

Logo, definiu-se a dose de aplicação do composto orgânico, a partir da razão entre a quantidade de N, P ou K requerida pela cultura e a quantidade de nutrientes disponibilizados do composto, conforme é elucidado na Eq. 4.6:

$$D = N_{rec}/N_{disp} \quad (4.6)$$

Em que:

D = Dose de aplicação do composto (t/(ha.ano));

$N_{rec}$  = Quantidade do nutriente recomendada para a cultura de café (kg/(ha.ano));

$N_{disp}$  = Teor do nutriente disponibilizado no composto (kg/t).

Definiu-se como elemento químico de referência aquele que apresentou menor dose de aplicação ao solo. Fazendo isso, evitou-se a definição de uma taxa de aplicação excessiva para qualquer um dos macronutrientes presentes no composto orgânico.

A quantidade de nutrientes recomendada para a cultura do cafeeiro é estabelecida na recomendação agronômica oficial do estado de Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999). As recomendações desse manual são dadas de acordo com o teor de nitrogênio nas folhas e características do solo (como teor disponível de fósforo e potássio e classe de fertilidade do solo). Em razão do desconhecimento desses dados, assumiu-se valores médios para essas variáveis.

Além dessas variáveis, a quantidade de nutrientes recomendada também é dada conforme a produtividade da lavoura, a qual foi acessada previamente através da Pesquisa Agrícola Municipal realizada pelo IBGE. Nesse caso, tomou-se a produtividade média no ano de 2012 de cada municípios, nos quais as lavouras identificadas no entorno das ETEs pertenciam.

Conhecendo-se a massa total de composto e a dose de aplicação recomendada, a área necessária para dispor o composto orgânico foi determinada pela razão da primeira variável pela segunda (Eq. 4.7).

$$A = M_c/D \quad (4.7)$$

Em que:

A = Área necessária para disposição do composto (ha);

Mc = Massa de composto (t);

D = Dose de aplicação do composto (t/(ha.ano)).

Finalmente, para avaliação da viabilidade espacial do aproveitamento agrícola do composto passível de ser produzido, comparou-se a área necessária para disposição do composto com a área plantada com cafezais nas proximidades das ETEs.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização física e química do lodo de esgoto sanitário, da casca de café e do composto orgânico produzido

#### 5.1.1 Lodo de esgoto sanitário e casca de café

Apresenta-se, na Tabela 5.1, a caracterização física e química do lodo de reator UASB e da casca de café. Todas as análises foram realizadas em triplicata, dessa maneira, o valor final refere-se à mediana dos resultados encontrados. Adicionalmente, apresenta-se o desvio padrão dos dados obtidos.

**Tabela 5.1** – Caracterização física e química do lodo de reator UASB e da casca de café

Parâmetro	Lodo de reator UASB	Casca de café
Teor de sólidos totais (%)	15,62±0,007	89,17±0,001
Sólidos voláteis/Sólidos fixos (SV/ST)	0,67±0,006	0,92±0,003
pH	7,19±0,01	4,85±0,06
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	815±91	149±13
Teor de COT (dag/kg) <sup>1</sup>	40,57±2,31	49,52±1,21
Teor de N <sub>T</sub> (dag/kg) <sup>1</sup>	4,36±0,03	1,44±0,01
Relação C/N	9,3	34,4
Teor de P <sub>T</sub> (dag/kg) <sup>1</sup>	0,18±0,01	0,05±0,01
Teor de K <sub>T</sub> (dag/kg) <sup>1</sup>	1,07±0,09	2,79±0,22

<sup>1</sup> Resultado expresso em relação à matéria seca a 65 °C

Comparando-se os resultados obtidos de caracterização do lodo de reator UASB com os valores típicos encontrados na literatura, observa-se que os teores de carbono e nitrogênio no lodo de reator UASB estudado se aproximaram dos valores mais elevados encontrados na literatura. Assim como é reportado por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), que caracterizaram um lodo de reator UASB com teor de potássio igual 0,95 dag/kg, o teor de potássio do lodo caracterizado neste estudo foi superior aos teores obtidos por Batista (2015) e Nascimento (2016). No que diz respeito ao teor de fósforo, nota-se que os resultados obtidos foram bastante inferiores àqueles obtidos por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) e Nascimento (2016).

No que diz respeito à caracterização da casca de café, nota-se que tanto o teor de nitrogênio como de carbono e de fósforo estiveram mais próximos aos limites inferiores da faixa esperada apresentada por Matos (2014), enquanto o teor de potássio encontra-se na faixa de valores típicos reportados pelo mesmo autor.

Observa-se que a relação C/N da casca de café encontra-se no limite superior da faixa considerada ideal para início do processo de compostagem, isto é, entre 25:1 e 35:1. Por esta razão, e visando-se utilizar a maior quantidade de lodo sanitário possível, optou-se por iniciar o processo com a relação C/N mínima, igual a 25:1. Assim, consideradas as características químicas do lodo de reator UASB e da casca de café, determinou-se que a proporção em massa (massa úmida) adequada entre a casca e o lodo deveria ser de aproximadamente 0,9, isto é, para cada quilograma de lodo seriam necessários 0,9 quilogramas de casca de café, para compostagem. Em se tratando da proporção em termos de volume, a relação adequada encontrada é de 5 partes de casca de café para uma parte de lodo.

### 5.1.2 Composto orgânico

Expõe-se a seguir (Tabela 5.2) a caracterização física e química do composto orgânico. Todas as análises foram realizadas em triplicata, dessa maneira, o valor final refere-se à mediana dos resultados encontrados. Adicionalmente, apresenta-se o desvio padrão dos dados obtidos.

**Tabela 5.2** – Caracterização física e química do composto orgânico

Parâmetro	nº de amostras	Pilha 1	Pilha 2	Pilha 3	Pilha 4
Teor de sólidos totais (%)	3	45,21±0,01	43,55±0,03	39,66±0,04	44,69±0,02
SV/ST	3	0,75±0,01	0,72±0,01	0,72±0,07	0,71±0,04
pH	3	6,99±0,20	7,23±0,02	7,30±0,03	7,35±0,02
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		225±3	235±11	240±11	220±10
Teor de COT (dag/kg) <sup>1</sup>	3	41,84±0,40	42,77±0,16	39,77±0,43	41,86±0,45
Teor de N <sub>T</sub> (dag/kg) <sup>1</sup>	3	2,64±0,003	2,92±0,007	2,8±0,044	2,66±0,029
Relação C/N		15,9	14,7	14,2	15,7
Teor de P <sub>T</sub> (dag/kg) <sup>1</sup>	3	0,11±0,03	0,13±0,01	0,12±0,67	0,14±0,02
Teor de K <sub>T</sub> (dag/kg) <sup>1</sup>	3	3,89±0,30	3,97±0,19	3,56±0,16	3,64±0,02

<sup>1</sup> Resultado expresso em relação à matéria seca a 65 °C

A Instrução Normativa nº 25 de 2009 do MAPA estabelece as seguintes especificações para fertilizantes orgânicos classe D<sup>1</sup>: N total mínimo = 0,5%; Carbono orgânico mínimo = 15%; pH mínimo = 6,0; relação C/N máxima = 20. Comparando-se os resultados encontrados com as especificações mencionadas, conclui-se que as características físicas e químicas do composto orgânico se adequam aos limites estabelecidos na legislação, o que comprova a boa qualidade do material produzido.

<sup>1</sup> Conforme a IN 25/2009, caracteriza-se como fertilizante orgânico 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.”

Considerando-se os teores de nitrogênio, fósforo e potássio das matérias primas utilizadas na compostagem, bem como a redução de massa observada ao longo do processo (a qual é apresentada no tópico 5.3.4), era de se esperar que, caso a perda desses nutrientes fosse nula, o composto final teria teores de N, P e K iguais a 4,9, 0,18 e 6,5 dag/kg, respectivamente. Assim, nota-se que durante a compostagem houve uma perda de 30% a 45% desses nutrientes, tendo sido a perda de nitrogênio a mais expressiva e a de fósforo a menos expressiva. Os mecanismos possivelmente responsáveis por isso seriam a volatilização do nitrogênio amoniacal e a lixiviação dos íons  $K^+$ ,  $NH_4^+$  e  $PO_4^{3-}$ .

Como foi mencionado, as pilhas de compostagem do experimento foram montadas em leitos de secagem e não em pátios impermeabilizados, sendo assim, arrisca-se afirmar que a lixiviação dos íons consistiu na principal causa da perda de nutrientes. Portanto, acredita-se que, caso as pilhas fossem montadas em áreas impermeabilizadas, poderia ter sido obtida maior conservação dos nutrientes na massa de material.

Mesmo após quatro meses de compostagem e apesar da relação C/N indicar a obtenção de um composto maturado, percebeu-se que o teor de sólidos voláteis do material se manteve elevado e acima do valor mínimo para consideração como composto estável, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006, que é de 70%. Em comparação com os valores iniciais, verificaram-se reduções de apenas 11,4%, 12,7%, 20,5% e 18,5% no teor de sólidos voláteis nas pilhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Esta redução ficou abaixo do esperado, pois, segundo Pereira Neto (1996), espera-se que na compostagem de resíduos orgânicos esta redução seja próxima a 40%.

Cabe observar que, de acordo com Andreoli et al. (1999), a Norma Norte Americana 40 CFR Part 503 aponta diversos parâmetros como indicadores da estabilização do lodo, a saber: odor, redução de patógenos, toxicidade, taxa de absorção de  $O_2$ , atividade enzimática, DBO, DQO, nitratos, pH e alcalinidade, viscosidade, ATP (adenosina trifosfato) e DNA (ácido Desoxirribonucleico), valor calorífico, redução de sólidos voláteis e teor de cinzas. Devido à facilidade analítica, o teor de sólidos voláteis tem sido o principal indicador utilizado para avaliação da estabilidade do lodo, porém, tendo em vista a grande variedade de indicadores existentes, cabe indagar se apenas o resultado do teor de sólidos voláteis obtido nesta pesquisa é suficiente para atestar que o composto produzido não estaria devidamente estabilizado.

Destaca-se que outros parâmetros medidos indicaram uma estabilização adequada do composto, como: a ausência de odor e de vetores (percebida em campo), o comportamento da

temperatura ao longo do processo, a relação C/N, o pH e a redução de patógenos. Dessa forma, alega-se que não foi possível obter uma conclusão definitiva sobre a capacidade de produção de um composto estabilizado a partir da compostagem nas condições e com os materiais utilizados nesta pesquisa. Possivelmente, a medição de outros indicadores, como a taxa de absorção de O<sub>2</sub> e a atividade enzimática, que estão relacionados mais diretamente à atividade microbiológica, além da capacidade de troca catiônica (CTC) do material, poderiam contribuir para a obtenção de resultados mais conclusivos sobre essa condição.

Ainda assim, vale mencionar que, quando são definidos na Resolução CONAMA 375/2006 os critérios para verificação da adequação do processo de compostagem na redução da atratividade de vetores, a condição a ser atendida refere-se às temperaturas atingidas no processo, e não a redução do teor de sólidos voláteis. A condição a ser atendida para redução da atratividade de vetores é a manutenção da temperatura acima de 40 °C durante pelo menos 14 dias, sendo que a temperatura média nesse período deve ser maior que 45 °C. Conforme poderá ser verificado no tópico 5.3.1, o processo atendeu a essa condição em todas as pilhas de compostagem.

Apresenta-se, também, além dos teores de nitrogênio total (N<sub>T</sub>) e nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e nitrogênio amoniacal (N<sub>amon</sub>), os teores disponibilizados de nitrogênio (N<sub>disp</sub>), fósforo (P<sub>disp</sub>) e potássio (K<sub>disp</sub>) do composto orgânico (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). Nesta Tabela, estão explicitados apenas o desvio padrão do parâmetro NTK, pois os parâmetros N<sub>disp</sub>, P<sub>disp</sub>, K<sub>disp</sub> foram calculados, o desvio padrão do N<sub>T</sub> foi apresentado anteriormente e o N<sub>amon</sub> foi determinada a partir de uma amostra apenas, devido à indisponibilidade de materiais de laboratório para análise deste parâmetro.

**Tabela 5.3** – Nutrientes totais e disponibilizados do composto orgânico (matéria seca a 65 °C)

Parâmetro	Pilha 1	Pilha 2	Pilha 3	Pilha 4
N <sub>T</sub> (dag/kg)	2,64	2,92	2,80	2,66
NTK (dag/kg)	2,70±0,03	2,94±0,03	2,73±0,01	2,68±0,04
N <sub>amo</sub> (dag/kg)	0,42	0,51	0,36	0,37
N <sub>disp</sub> (dag/kg)	2,44	2,66	2,62	2,48
P <sub>disp</sub> (dag/kg)	0,11	0,13	0,12	0,14
K <sub>disp</sub> (dag/kg)	3,89	3,97	3,56	3,64

Nota-se que o teor de NTK foi superior ao N<sub>T</sub>, o que é incoerente, uma vez que o N<sub>T</sub>, por englobar tanto o NTK assim como os nitritos e nitratos, deveria ter um valor superior. Sendo assim, pressupõe-se que a fração de nitritos e nitratos no composto é praticamente nula e que

a diferença entre os valores encontrados se deu em decorrência da imprecisão dos métodos e equipamentos utilizados.

É razoável presumir que a fração nítrica seja baixa ou nula, pois muitos estudos mostraram que os grupos de bactérias nitrificantes são uma comunidade pouco competitiva e geralmente se tornam mais ativas apenas quando a temperatura da massa de compostagem diminui, justamente no momento em que a quantidade de matéria orgânica de fácil degradação é baixa (GRIGATTI; CAVANI; CIAVATTA, 2011). Por outro lado, o alto teor de nitrogênio amoniacal (15%, em média, em relação ao teor de nitrogênio total) no composto pode indicar que, caso a etapa de maturação do composto se prolongasse, haveria a conversão da fração amoniacal para a fração de nitratos.

Por fim, no intuito de testar a primeira hipótese desta pesquisa, sobre o equilíbrio entre a quantidade de nutrientes disponíveis, comparou-se a proporção entre N, P e K no composto produzido, adotando-se a média dos valores das quatro pilhas, com a necessidade nutricional do cafeeiro por esses nutrientes (CFSEMG, 1999). A necessidade nutricional dessa cultura, varia conforme a produtividade da lavoura e a qualidade do solo, por esta razão, para realizar a comparação mencionada, adotaram-se valores médios de demanda.

Obteve-se que a proporção N:P:K do composto produzido é de aproximadamente 1,00:0,05:1,48, enquanto a demanda do cafeeiro é de 1,00:0,04:0,62, ou seja, caso a aplicação seja feita utilizando-se o nitrogênio como elemento de referência, a dose de aplicação do potássio seria excedida. Caso se tome o potássio como referência, a proporção dos macro nutrientes no composto seria 0,68:0,03:1,00, enquanto a necessidade nutricional do cafeeiro poderia ser expressa nas proporções 1,6:0,06:1,00. Dessa forma, o composto supriria cerca de 42% da demanda por nitrogênio e 56% da demanda por fósforo, sendo necessário proceder a complementação mineral do composto, o que indica que **a hipótese pesquisada deve ser refutada: o composto produzido não é nutricionalmente equilibrado.**

Por outro lado, ao se comparar os teores de macronutrientes do composto produzido nesta pesquisa com os teores de macronutrientes obtidos em outros compostos orgânicos produzidos com lodo de esgoto, revela-se que o teor de nitrogênio e potássio no composto produzido foi elevado. O teor de nitrogênio esteve próximo aos valores registrados por Backes et al. (2013) e por Romeiro et al. (2014), sendo estes registros os maiores encontrados na literatura pesquisa e apresentada na revisão bibliográfica desta pesquisa (item 3.2.4.2). O teor de potássio, por sua vez, foi substancialmente superior ao medido em compostos

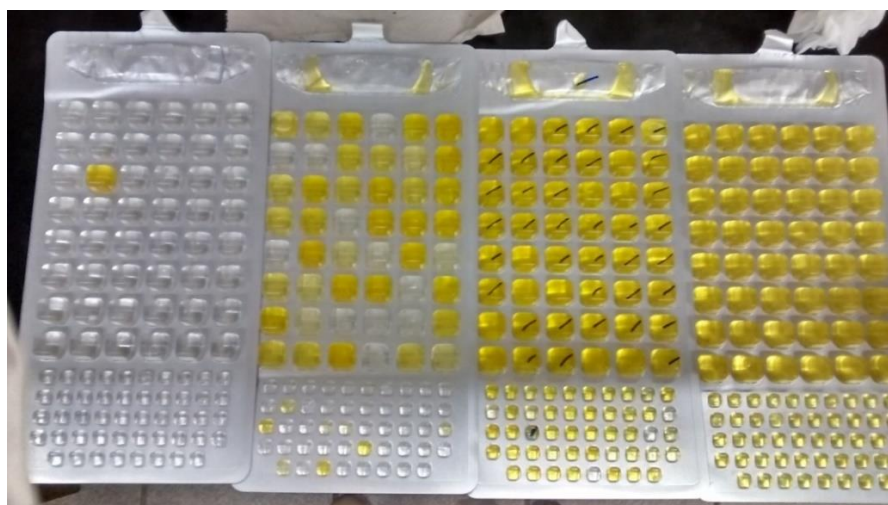
orgânicos produzidos em todas as referências pesquisadas, o que pode ser atribuído ao uso da casca de café como substrato na compostagem. Apenas o teor de fósforo foi inferior aos valores encontrados nos compostos orgânicos citados em outras pesquisas, o que se deve à baixa concentração deste elemento no lodo de esgoto utilizado nesta pesquisa. Esta comparação indica, portanto, que o composto orgânico produzido pela mistura das matérias-primas propostas apresentou teores satisfatórios de nutrientes.

Reconhece-se, ainda, que a qualidade do lodo irá variar de um sistema para outro e, logo, o composto orgânico produzido com determinado subproduto terá uma quantidade de nutrientes diferente de outro. Esta constatação levanta uma das limitações desta pesquisa: a de utilizar os teores de nutrientes do composto produzido na etapa experimental para estimar a área de cafezal que poderia ser fertilizada com compostos orgânicos produzidos com lodo de reator UASB de diversas ETEs de Minas Gerais. No tópico 5.5, esta questão será retomada e discutida.

## **5.2 Caracterização microbiológica do lodo de esgoto sanitário e do composto orgânico produzido**

### **5.2.1 Lodo de esgoto de UASB**

Para a determinação do número mais provável (NMP) de coliformes totais e *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (ST) no lodo de reator UASB, obteve-se uma leitura satisfatória na cartela de diluição de  $10^{-5}$ , sendo que o resultado obtido está apresentado na Tabela 5.4. Na Figura 5.1, é possível visualizar os resultados obtidos nas cartelas com diferentes diluições, ordenadas da maior diluição para a menor diluição (da esquerda para a direita).



**Figura 5.1** – Teste para determinação de coliformes totais e *E. coli* a partir de diferentes diluições

As leituras ao microscópio de ovos de helmintos revelaram baixa contagem de ovos viáveis de helmintos no lodo de reator UASB. Identificou-se, em maior número, a presença de ovos não larvados, especialmente ovos de larvas do gênero *Ancylostoma*. Na Figura 5.2 apresentam-se ovos de larvas dos gêneros *Ancylostoma* (a) e *Ascaris* (b e c) encontrados nas leituras efetuadas sob a lente do microscópio, sendo que apenas o terceiro ovo foi considerado um ovo viável, pois, como pode ser visto na imagem, trata-se de um ovo larvado.



**Figura 5.2** – Ovos de larvas dos gêneros *Ancylostoma* (a) e *Ascaris* (b e c) encontrados nas leituras sob a lente do microscópio

A quantidade de ovos totais e viáveis de helmintos por grama de sólidos totais no lodo de reator UASB é apresentada na Tabela 5.4. Uma vez que a leitura ao microscópio da presença de ovos de helmintos foi feita em triplicata, apresenta-se também o desvio padrão para esta amostra de dados.

**Tabela 5.4** – Contagem de coliformes e ovos de helmintos no lodo de reator UASB (em relação à matéria seca a 105 °C)

Parâmetro	Contagem
Coliformes totais (NMP/gST)	$2,77 \times 10^9$
<i>Escherichia coli</i> (NMP/gST)	$9,06 \times 10^7$
Ovos totais de helmintos (ovos/gST)	$41,02 \pm 35,52$
Ovos viáveis de helmintos (ovos/gST)	$0,43 \pm 0,74$

Tanto a contagem de ovos totais de helmintos como de coliformes termotolerantes do lodo de reator UASB caracterizado neste estudo se aproximaram dos valores encontrados por Passamani, Keller, Gonçalves (2002). A contagem de ovos viáveis de helmintos, por sua vez, se aproximou dos limites inferiores das faixas de valores mencionadas por Fernandes e Silva (1999), Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) e Batista (2015).

Nota-se que o lodo de reator UASB utilizado no experimento já apresentava uma qualidade microbiológica boa, no que diz respeito à quantidade de ovos viáveis de helmintos antes da higienização. Como pode ser visto, no que diz respeito a esse parâmetro, o lodo já poderia ser considerado um lodo tipo B, e a contagem máxima exigida para ser considerada um lodo tipo A (0,25 ovos/gST) é ligeiramente inferior ao valor que foi encontrado.

Nota-se, todavia, que houve grande variabilidade nos resultados obtidos na contagem de ovos de helmintos totais e viáveis, o que é evidenciado pelo alto desvio padrão apresentado. Além disso, causa estranheza a baixa contagem de ovos de helmintos viáveis frente à elevada contagem de ovos totais. Uma possível causa para a baixa viabilidade dos ovos de helmintos pode estar associada ao tempo de armazenamento das amostras coletadas de lodo de esgoto. Embora todas as amostras de lodo de esgoto tenham sido armazenadas em condições adequadas de refrigeração (temperatura < 4°C), entre o momento da coleta e o momento em que a análise foi realizada, transcorreram cerca de 5 meses, o que pode ter diminuído a viabilidade dos ovos presentes na amostra. Dessa forma, é razoável supor a possibilidade de que o lodo de esgoto utilizado no experimento possuísse contagem de ovos de helmintos viáveis maior que a reportada neste experimento.

### 5.2.2 Composto orgânico produzido

Na Tabela 5.5 tem-se a caracterização microbiológica do composto orgânico produzido, bem como a contagem máxima desses organismos, estabelecida na Resolução 375 do CONAMA para o lodo classe A (lodo de melhor qualidade).

**Tabela 5.5** – Caracterização microbiológica do material das pilhas de compostagem e limites em relação à contaminação (em relação à matéria seca a 105 °C)

Variáveis	Pilha				Limites CONAMA 375
	1	2	3	4	
Coliformes termotolerantes (NMP/g de ST)	1,57x10 <sup>2</sup>	6,23x10 <sup>2</sup>	1,64x10 <sup>1</sup>	4,10	< 1,00x10 <sup>3</sup>
Ovos viáveis de helmintos (ovo/g de ST)	0,00	0,00	0,00	0,00	< 0,25
<i>Salmonella</i> (NMP/g de ST)	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	Ausência em 10 g de ST <sup>2</sup>
Colifagos (UFP/g de ST)	0,00	0,00	0,00	0,00	*

L.D.: Limite de detecção do método: 0,06473 NMP/g ST (matéria úmida).

UFP: Unidade formadora de placa

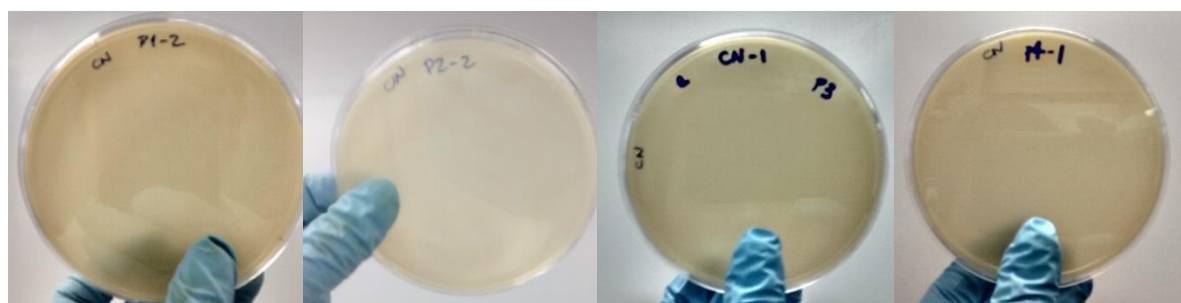
\*: A legislação define limite para a presença de vírus entéricos, a saber: 0,25 UFP/g de ST.

Ressalta-se que todos os parâmetros microbiológicos do material das quatro pilhas apontam a segurança sanitária do composto orgânico produzido, indicando assim a eficiência de higienização da tecnologia utilizada. A ausência de bactérias do grupo salmonela e de vírus entéricos também foi obtida por Teixeira (2012), Heck et al. (2013) e Leite (2015), em experimentos de compostagem do lodo de esgoto sanitário. Além disso, os dois primeiros

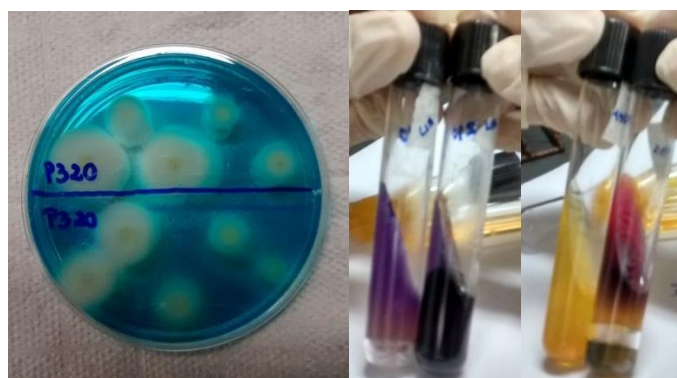
<sup>2</sup> Observa-se que a unidade de medida do parâmetro *Salmonella* difere entre o método de análise utilizado e o limite estipulado pela legislação. Ainda assim, uma vez que o resultado obtido foi abaixo do limite de detecção do método, é possível afirmar a ausência deste patógeno no composto e, portanto, o atendimento à legislação.

autores também encontraram valores nulos de ovos viáveis de helmintos, enquanto o terceiro autor obteve uma contagem de 0,05 ovos viáveis/gST após a compostagem do lodo de esgoto sanitário. Em relação à contagem de coliformes termotolerantes, os valores alcançados com a compostagem do lodo de reator UASB, neste estudo, foram próximos àqueles obtidos por Mengistu et al. (2017). **Por fim, conclui-se que tais resultados confirmam a segunda hipótese levantada neste trabalho, de que o composto produzido pela compostagem do lodo de reator UASB com a casca de café estaria adequadamente higienizado.**

A seguir, são apresentadas algumas fotos das placas utilizadas para determinação da contagem de *Salmonella* e colifagos, como evidência dos resultados nulos encontrados. Na Figura 5.3 apresentam-se as placas para leitura de colifagos em material orgânico coletado nas quatro pilhas. Tendo sido utilizada a menor diluição possível, ou seja,  $10^{-1}$ , observa-se que, em nenhuma das amostras, houve crescimento de placas. No que se refere ao teste para determinação da contagem de *Salmonella*, apenas a amostra do material da pilha 3 apresentou resultado positivo e apenas na primeira etapa do teste (Figura 5.4), nas demais amostras não houve crescimento de halo no entorno das gotas colocadas nas placas. Na segunda etapa do teste, já não foi observada a presença dessas bactérias. Na Figura 5.4, é apresentado o resultado negativo da amostra do material da pilha 3 (tubos à esquerda) com o resultado positivo obtido em uma amostra de material não obtido nesta pesquisa (tubos à direita).



**Figura 5.3** – Vista das placas de petri com material submetido à menor diluição possível ( $10^1$ )



**Figura 5.4** – Vista da placa de petri e tubos para contagem de *Salmonella* em amostra coletada na pilha 3

Adicionalmente, com os resultados obtidos foi possível estimar, ainda, a eficiência do processo na redução da contagem de coliformes e ovos de helmintos, conforme é apresentado na Tabela 5.6. Para isso, levou-se em consideração que houve uma diluição da presença de patógenos na ocasião de montagem das pilhas ocasionada pela mistura do lodo de reator UASB com a casca de café. Assim, tomando-se por base a proporção utilizada na mistura e considerando-se que a contagem de patógenos na casca de café era nula (ou irrelevante diante da contagem no lodo), estimou-se que, no início do processo de compostagem, a contagem de coliformes totais, coliformes termotolerantes, ovos totais de helmintos e ovos viáveis de helmintos em todas as pilhas era, respectivamente, igual a  $4,5 \times 10^8$  (NMP/gST),  $1,47 \times 10^7$  (NMP/gST), 6,67 (ovos/gST) e 0,07 (ovos/gST).

**Tabela 5.6** – Eficiência de redução na contagem de coliformes e ovos de helmintos proporcionada pela compostagem do lodo de reator UASB com casca de café

	Pilha			
	1	2	3	4
Contagem de coliformes totais (NMP/gST)	$1,14 \times 10^3$	$2,23 \times 10^3$	$4,96 \times 10$	$1,60 \times 10^2$
Eficiência de redução na contagem de coliformes totais (unid. log)	5	5	7	6
Contagem de coliformes termotolerantes (NMP/gST)	$1,57 \times 10^2$	$6,23 \times 10^2$	$1,64 \times 10$	4,1
Eficiência de redução na contagem de coliformes termotolerantes (unid. log)	5	5	6	7
Contagem de ovos totais (ovos/gST)	$2,85 \pm 3,03$	$2,90 \pm 1,91$	$3,69 \pm 1,55$	$2,94 \pm 0,71$
Eficiência de redução na contagem de ovos totais (%)	57,27	56,52	44,68	55,92
Contagem de ovos viáveis (ovos/gST)	0,00	0,00	0,00	0,00
Eficiência de redução na contagem de ovos viáveis (%)	100	100	100	100

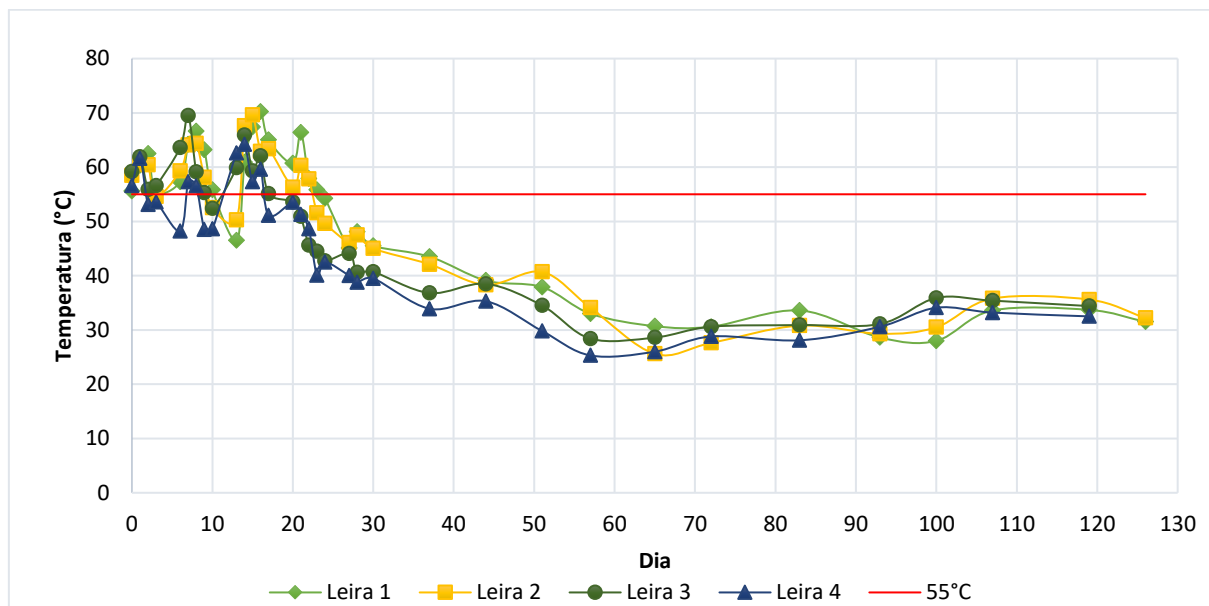
Nota-se que a eficiência de redução na contagem de coliformes termotolerantes no material compostado foi superior àquelas obtidas por Teixeira (2012), Leite (2015) e Mengistu et al. (2017), os quais obtiveram reduções entre 2 e 3 casas logarítmicas em experimentos de compostagem de lodo de esgoto sanitário. Possivelmente, isto se deve ao fato de que o lodo utilizado nos experimentos conduzidos pelos dois últimos autores já possuía baixa contagem de coliformes termotolerantes e ao fato de o primeiro autor trabalhar com um curto período de tempo de compostagem (20 dias). Em relação à inativação de ovos viáveis de helmintos, Teixeira (2012) e Heck et al. (2013) também obtiveram eficiências de 100% na inativação desses ovos, enquanto nos experimentos de Leite (2015) e Mengistu et al. (2017) foram alcançadas eficiências superiores a 80%.

### 5.3 Características físicas e químicas do material orgânico ao longo do processo de compostagem

#### 5.3.1 Perfil de temperatura

Ao longo do período de compostagem foi monitorada a temperatura da massa, tendo sido observado que o material nas pilhas apresentava temperaturas desuniformes, sendo observadas maiores temperaturas no topo e no centro e menores temperaturas na base e nas laterais das pilhas. Essa observação reforça a importância do reviramento periódico do material, o qual é, inclusive, recomendado na Resolução CONAMA 375/2006, uma vez que ele permite que as diversas partículas do material em compostagem ocupem lugares distintos nas pilhas e possam ter sua temperatura aumentada da mesma forma que o alocado em outras posições da pilha.

Na Figura 5.5 apresenta-se o perfil de variação da temperatura do material orgânico, em cada uma das pilhas, ao longo do período de tempo de sua compostagem. Como foi mencionado, a temperatura foi medida em diversos pontos das pilhas, os valores apresentados, a seguir, são os maiores valores observados em cada medição.



**Figura 5.5** – Perfis de temperatura máxima no material das pilhas 1, 2, 3 e 4 ao longo do período de sua compostagem

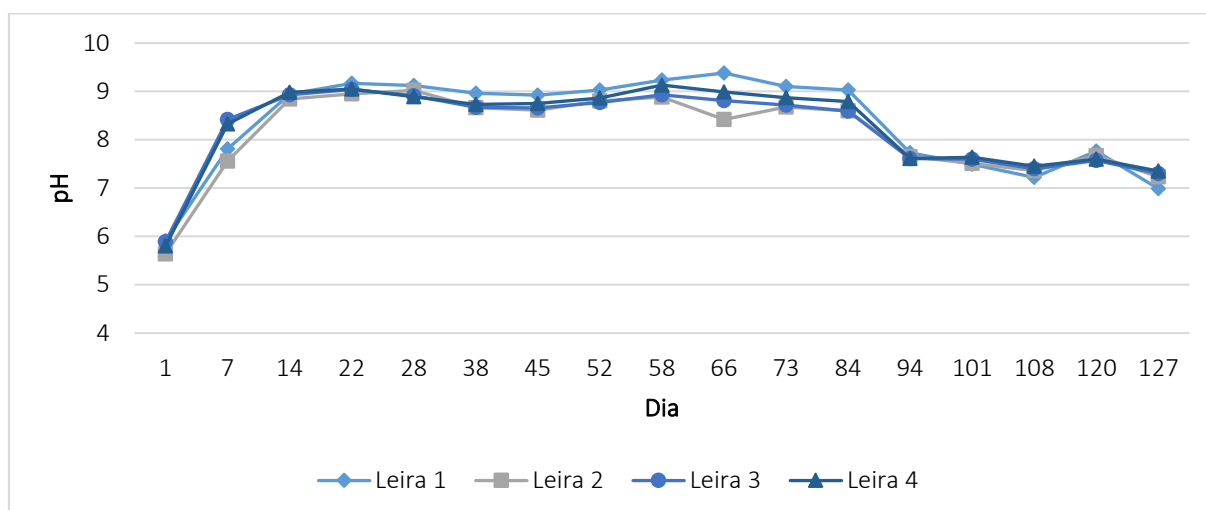
Diante do exposto nos gráficos, nota-se que a temperatura do material se elevou rapidamente: no dia seguinte à montagem das leiras, tendo as temperaturas medidas sido superiores a 55 °C. As altas temperaturas no material persistiram durante aproximadamente 3 semanas, marcando a fase termofílica do processo, após esse período a temperatura decaiu

gradativamente durante 6 semanas e se manteve estável em torno de 30 °C. Conclui-se que o aquecimento do material se deu conforme o esperado, tendo-se sido as fases termofílica e mesofílica bem definidas, bem como o período de transição entre elas. Contudo, percebe-se que durante a fase termofílica houve a ocorrência de curtos períodos de baixas temperaturas no material constituinte das pilhas. Acredita-se que isto se deva à diminuição no teor de água no material maior do que o planejado, o que ocorreu em alguns dias do período de processamento.

Foi contabilizado o número de dias em que se registrou temperaturas superiores a 55 °C no material de cada uma das pilhas, sendo que apenas o da pilha 1 se manteve com temperatura elevada por mais que 15 dias (como preconiza a legislação), o material das demais pilhas (2, 3 e 4) mantiveram temperatura superior a 55 °C durante 14, 13 e 8 dias, respectivamente<sup>3</sup>. Ainda assim, os resultados microbiológicos revelaram a adequada higienização do material de todas as pilhas. Tal observação pode indicar que a quantidade de dias em que o material das pilhas permaneceu na fase termofílica tenha sido suficiente para inativação dos patógenos. Por outro lado, pode indicar também a importância de outros mecanismos, além da temperatura, na higienização do lodo, como a predação por outros micro-organismos, incidência de radiação solar, competição por alimento, inadequação das condições de pH etc.

### 5.3.2 Potencial hidrogeniônico

A Figura 5.6 apresenta a evolução do pH do material durante o processo da compostagem.



**Figura 5.6** – Comportamento do pH do material ao longo do processo da compostagem

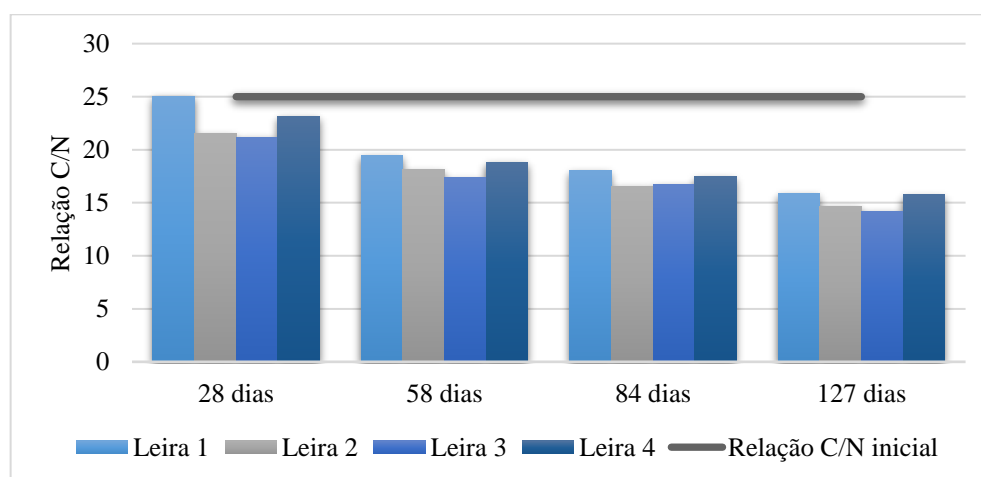
<sup>3</sup> Torna-se importante ressaltar que nesses registros não estão incluídos os fins de semana. Sendo assim, o número de dias que o material de cada pilha alcançou temperaturas superiores a 55 °C pode ter sido superior ao apresentado, porém esses dias não foram registrados e, portanto, não contabilizados.

Verifica-se que o pH inicial da mistura era ácido, o que é consequência do baixo pH natural da casca de café. No entanto, na semana seguinte ao início do processo, o pH do material se elevou e se tornou alcalino, o que não proporcionou inibição na atividade microbiana no meio. Esse comportamento era esperado uma vez que, segundo Fernandes e Silva (1999), a passagem à fase termofílica é acompanhada de rápida elevação no pH, devido à hidrólise das proteínas e liberação de amônia na massa.

O pH se manteve estável, com valor em torno de 9, durante os três primeiros meses de compostagem, após este período ele apresentou pequena redução, permanecendo estável próximo à neutralidade. Esse decréscimo no pH após alguns meses de compostagem também foi observado pelos autores citados anteriormente. Segundo eles, esse decréscimo é decorrente, provavelmente, da intensificação no processo de nitrificação. No presente estudo, não foi verificado aumento no teor de nitritos e nitratos no material em compostagem, logo esse fenômeno pode ter sido decorrente de outros fatores. Algumas possibilidades que podem explicar esse decréscimo no valor do pH do material são a volatilização do nitrogênio amoniacal ou a perda de cátions causada pela lixiviação (o que poderia aumentar a intensidade dos íons  $H^+$  no meio, o que expressa diminuição do pH). No entanto, para se avaliar a razoabilidade destas explicações seria necessário conhecer as mudanças no teor de nitrogênio amoniacal e de cátions no composto ao longo do processo, o que foge ao escopo desta pesquisa.

### 5.3.3 Decaimento da relação C/N

O acompanhamento da relação C/N ao longo do processo foi útil para analisar a maturação do composto. A seguir, apresentam-se os valores encontrados para esses parâmetros após 28, 58, 84 e 127 dias da montagem das pilhas (Figura 5.7).



**Figura 5.7** – Decaimento da relação C/N ao longo do período de compostagem do material

Após quase 2 meses, a relação entre carbono e nitrogênio de todas as pilhas já era inferior a 20, ou seja, já se enquadrava no padrão estabelecido pela IN 25/2009. No entanto, julgou-se que este tempo não era suficiente para encerrar o processo, tendo em vista que o tempo de compostagem normalmente praticado é de 4 meses (FERNANDES; SILVA, 1999 e MATOS, 2014) e que o teor de sólidos voláteis ainda era elevado. Além disso, o valor de 20 para a relação C/N trata-se de um limite superior e ao final da compostagem esse parâmetro pode convergir para valores entre 10 e 20 (FERNANDES; SILVA, 1999). Após pouco mais de 4 meses, a relação C/N das leiras já estava próxima a 15 e o pH permanecia estável e, embora o teor de sólidos voláteis ainda permanecesse um pouco alto, decidiu-se por finalizar o processo, efetuando-se a caracterização do composto orgânico produzido, conforme já detalhado anteriormente.

#### 5.3.4 Redução de massa do material em compostagem

A redução de massa do material (massa seca) ao longo da compostagem foi bastante expressiva, observando-se uma redução média de 61%. Na Tabela 5.7 é apresentada a redução de massa registrada no material de cada uma das pilhas. Essa redução aconteceu devido à decomposição da matéria orgânica, proporcionando perdas na forma de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), compostos sulfurosos (SO<sub>x</sub>) e nítricos (NO<sub>x</sub>) e água (H<sub>2</sub>O), principalmente.

**Tabela 5.7** – Redução de massa seca do material (%) nas pilhas de compostagem

Pilha 1	Pilha 2	Pilha 3	Pilha 4
58,2	62,2	60,7	64,3

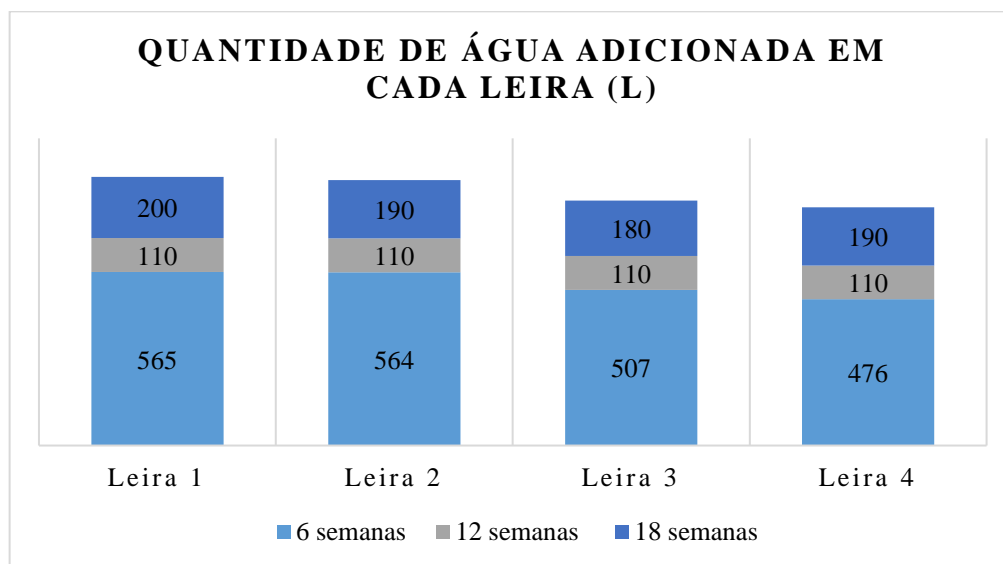
A Figura 5.8 apresenta uma imagem das pilhas ao final do período de compostagem. Comparando-a com a Figura 4.10, que mostra o material no início no processo, é possível perceber visualmente essa diminuição da massa.



**Figura 5.8** – Vista das pilhas de material após 127 dias de compostagem.

### 5.3.5 Necessidade de adição de água

Apresenta-se, a seguir, a demanda hídrica verificada durante as 6 primeiras semanas, entre a 6ª e 12ª semana e entre 12ª e 18ª semanas de compostagem do material (Figura 5.9). Vale mencionar, que, no período do experimento, não ocorreram precipitações e, portanto, o molhamento das pilhas aconteceu estritamente através da ação humana.



**Figura 5.9** – Quantidade de água adicionada ao material das pilhas durante o período de sua compostagem

Apesar do material das pilhas ter recebido quantidades diferentes de água, o teor de água foi semelhante durante todo o processo. O material constituinte das pilhas 3 e 4 possuíam um volume ligeiramente inferior ao das pilhas 1 e 2, por esta razão receberam menor quantidade de água. Além disso, acredita-se que pelo fato do material da pilha 4 ter apresentado temperaturas inferiores ao das demais, sua perda de água e consequente necessidade de adição foi menor. Adicionalmente, nota-se que a maior demanda por água aconteceu nas primeiras 6 semanas do experimento, o que se justifica pelo fato de, nesse período, a atividade microbiana ser maior.

Foram gastos, ao todo, 3,3 m<sup>3</sup> de água para molhamento do material constituinte das pilhas. Pela quantidade de composto orgânico produzido, estima-se que, para produzir uma tonelada do adubo orgânico, sejam necessários, em média, 8,0 m<sup>3</sup> de água.

## 5.4 Estimativa da quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais

### 5.4.1 Estimativa da produção de lodo nas ETEs mineiras

De acordo com o levantamento realizado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2017), em Minas Gerais existiam 196 estações de tratamento de esgoto em operação, sendo que dessas, 154 ETEs são compostas, dentre outras unidades, por reatores UASB. Em algumas estações, o efluente do UASB é submetido a pós-tratamento nas seguintes unidades: biofiltro aerado, filtro anaeróbio, filtro percolador, lagoa aerada, lagoa de polimento e lodos ativados. Além dos fluxogramas de UASB + pós-tratamento citados, também são empregados os seguintes processos para o tratamento de esgoto sanitário no estado: lodos ativados, tanque séptico + filtro anaeróbio e os sistemas compostos por lagoas.

A Tabela 5.8 apresenta, em ordem decrescente, o somatório da quantidade de lodo seco produzido por cada tipo de tecnologia de tratamento de esgoto empregada no estado, bem como o número de unidades existentes e a população equivalente atendida.

**Tabela 5.8** – Quantidade total de lodo seco produzida por cada tecnologia de tratamento de esgoto

Resumo por tecnologia	Estimativa da produção de lodo seco (t/ano)	Nº de unidades <sup>1</sup>	População equivalente <sup>1</sup>
Reator UASB	24.447,11	154	4.465.225
Decantador primário	22.483,80	6	1.539.986
Filtro percolador	8.108,35	45	2.468.295
Lodos ativados convencional	7.106,66	8	1.770.028
Lagoa anaeróbia	2.758,06	15	232.503
Lagoa aerada	1.675,56	3	291.926
Lagoa facultativa	1.478,18	24	6.491.363
Filtro anaeróbio	629,93	38	215.728
Lodos ativados aeração prolongada	508,70	5	126.701
Tanque séptico	400,51	9	43.892
Biofiltro aerado	142,68	4	13.030
Total	69.729,54		

<sup>1</sup>O somatório do número de unidades e da população equivalente não equivale ao total de ETEs nem à população equivalente atendida, pois uma estação pode ser composta por mais de uma tecnologia de tratamento. A população equivalente servida com tratamento de esgotos corresponde a 6.506.713 habitantes.

Observa-se que a maior produção de lodo está associada aos reatores UASB, o que reitera a pertinência e importância da avaliação desse tipo de lodo neste trabalho. A maior produção de lodo pelos reatores UASB não está associada a uma possível taxa de geração do resíduo elevada, pelo contrário, dentre as vantagens normalmente enumeradas dessa tecnologia está a

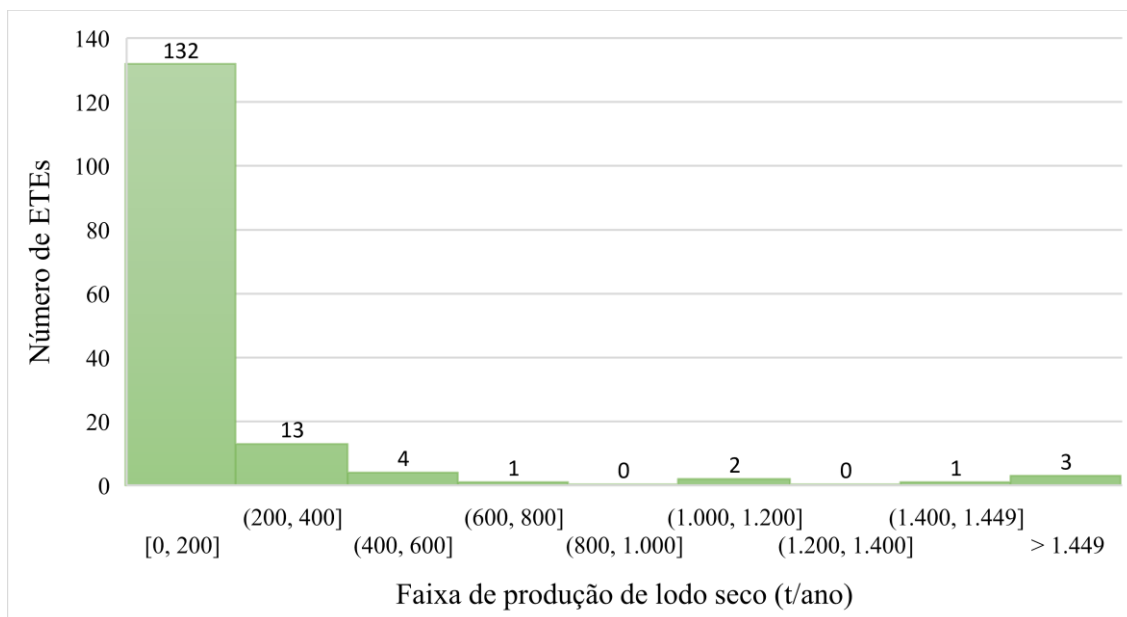
baixa produção de lodo, uma vez que parte da matéria orgânica decomposta é convertida em metano. Tais valores são justificados pela abrangência da tecnologia no território mineiro: quase 70% da população atendida com tratamentos de esgoto (população equivalente) têm seus esgotos tratados em reatores UASB.

É declarado no Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2016 do SNIS que o total de resíduos sólidos urbanos coletado no estado de Minas Gerais é de 4,7 milhões de toneladas. Este montante se refere à soma da quantidade coletada em 626 municípios do estado que declararam essa informação ao SNIS, o que representa 73% dos municípios mineiros. Comparando-se esse montante com a produção de lodo estimada (caso se considere que o lodo destinado aos aterros sanitário tenha um teor de sólidos de 30%), tem-se que a geração de lodo de esgoto sanitário em Minas Gerais representa quase 5% do total de resíduos sólidos urbanos produzidos. Ainda que a quantidade de resíduos sólidos urbanos produzida esteja subestimada, devido aos municípios que não declararam essa informação ao SNIS, é possível argumentar que a proporção entre a quantidade de lodo de esgoto sanitário e de resíduos sólidos urbanos é representativa e, portanto, a destinação desse resíduo para o aproveitamento agrícola poderia contribuir para a diminuição da pressão por áreas para aterramento de resíduos sólidos, no estado.

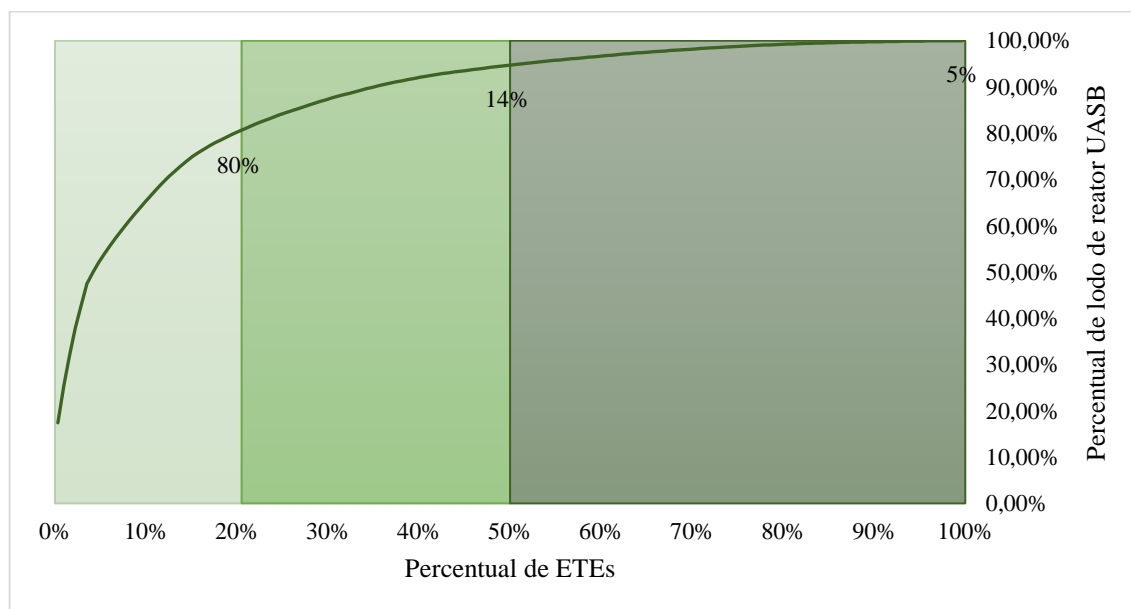
Machado (2001) estimou que a população atendida com tratamento de esgotos sanitário em Minas Gerais, em 2001, era de 163.100 habitantes e a produção de lodo seria cerca de 2.048,20 tST/ano. Comparando-se os resultados obtidos com aqueles estimados pelo autor, tem-se uma taxa de geração de lodo *per capita* aproximada. No entanto, sinaliza-se que houve um aumento de mais de 30 vezes na quantidade de lodo produzido no estado nos últimos 15 anos, o que, mais uma vez, reforça a importância de planejar alternativas mais sustentáveis de disposição do lodo sanitário.

No que diz respeito apenas à produção de lodo de reator UASB, tem-se que 95,5% das ETES produzem menos que 600 toneladas desse lodo por ano, as demais produzem quantidades entre 600 e 4.260 toneladas (Figura 5.10). Este resultado está diretamente associado ao fato de que a maior parte (cerca de 60%) das ETES compostas por reatores UASB são de pequeno porte, com população equivalente inferior a 10.000 habitantes. Essa constatação é importante no âmbito deste trabalho, uma vez que a aplicação da técnica de compostagem é interessante em ETES de pequeno porte, devido às suas menores restrições de área e maiores restrições em relação à mão de obra especializada, mecanização de processos, dentre outros.

Adicionalmente, para melhor compreensão desta situação, apresenta-se também a Curva ABC ou Diagrama de Pareto (Figura 5.11). Uma Curva ABC ou Diagrama de Pareto tem por objetivo apresentar os itens de maior impacto de determinada série de dados. No caso da produção de lodo de reator UASB em Minas Gerais, é possível concluir a partir desta representação gráfica que 20% das ETES mineiras são responsáveis pela produção de 80% do lodo de reator UASB gerado no estado e 50% responsável pela produção de apenas 5% deste subproduto.



**Figura 5.10** – Número de ETES por faixa de produção de lodo de reator UASB



**Figura 5.11** – Diagrama de Pareto da quantidade de lodo de reator UASB produzido pelas ETES mineiras

Por fim, apresenta-se no Apêndice 1, dentre outras informações, a estimativa da quantidade de lodo (seco e *in natura*) produzida pelos reatores UASB de cada estação de tratamento de esgoto do estado de Minas Gerais.

#### **5.4.2 Estimativa das áreas de lavouras de cafeeiro localizadas próximas a ETEs e da produção de casca de café nessas áreas**

Apresenta-se na Figura 5.12 e Figura 5.13 a distribuição espacial das ETEs e das lavouras de cafeeiro no estado de Minas Gerais. Por meio dessas figuras é possível observar maior concentração de ETEs na Região Metropolitana de Belo Horizonte e no Norte de Minas, enquanto as lavouras de cafeeiro se concentram mais nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Vale do Rio Doce, Zona da Mata, Campo das Vertentes e Oeste/Sul/Sudoeste de Minas.

Apesar da diferente concentração espacial de ETEs e lavouras de cafeeiro, foi possível constatar, a partir dos resultados obtidos na Figura 5.14, que, das 154 ETEs existentes que possuem reatores UASB em seu fluxograma de tratamento, apenas 19 não apresentam nenhuma área produtora de café no seu entorno. Ou seja, 88% das ETEs possuem alguma lavoura de cafeeiro localizada em suas proximidades, sendo que o lodo de reator UASB produzido nessas ETEs representa 94% do volume total de lodo de reator UASB gerado no estado.

A área total de lavouras de cafeeiro localizadas no entorno das ETEs com reatores UASB equivale a 772.412 hectares, sendo que o total de casca de café produzido nessas áreas corresponde a 227.668 toneladas. Adicionalmente, apresenta-se a estatística descritiva dos dados, na Tabela 5.9.

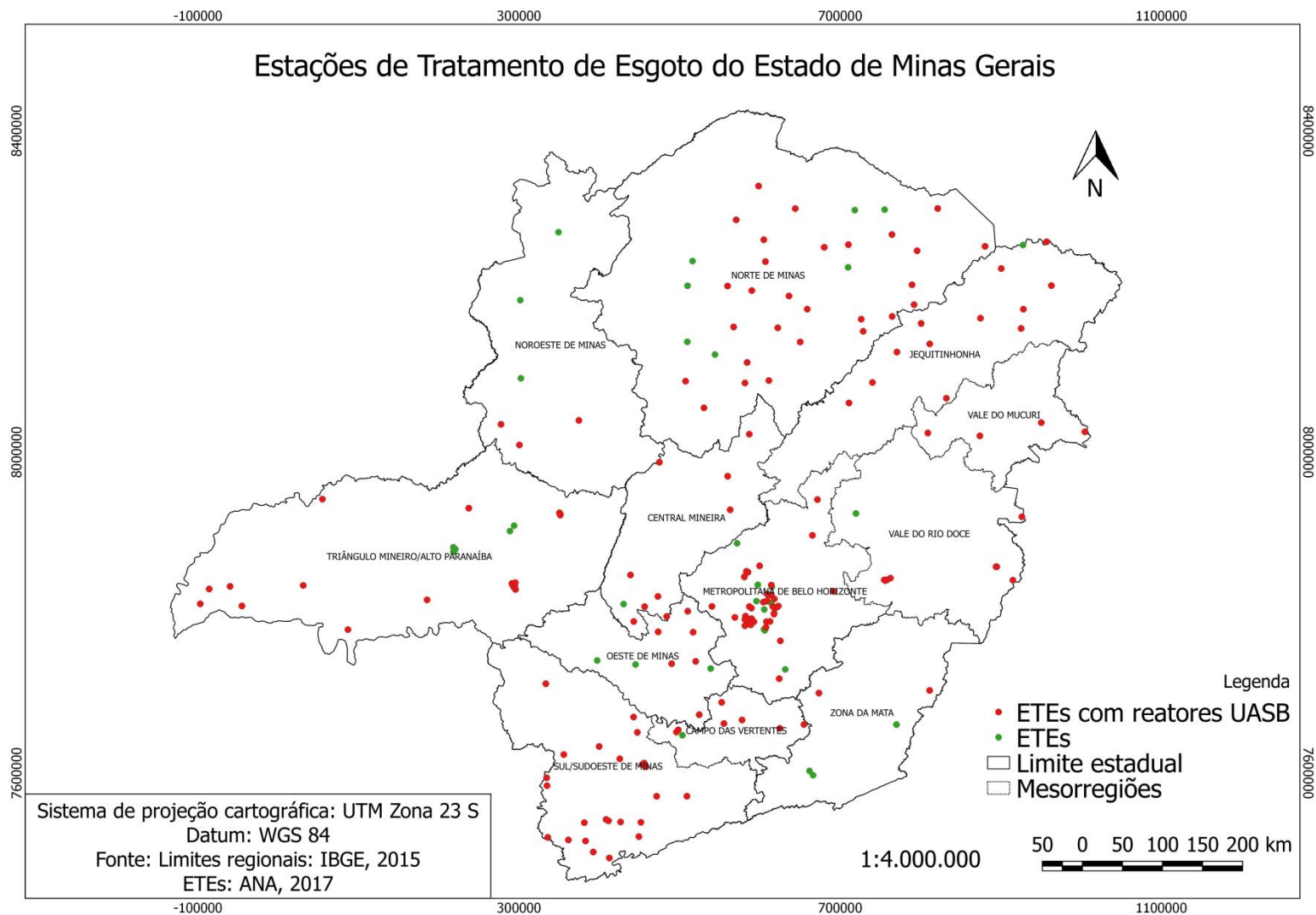
**Tabela 5.9** – Estatística descritiva das áreas de lavoura de cafeeiro no entorno das ETEs e respectiva produção de casca de café

	<b>Área de lavoura próxima (ha)</b>	<b>Produção de casca de café (t/ano)</b>
<b>Mínimo</b>	1,1	0,3
<b>1º Quartil</b>	132,7	21,6
<b>Mediana</b>	493,2	76,2
<b>3º Quartil</b>	4.567,4	1.279,2
<b>Máximo</b>	61.770,6	18.003,2

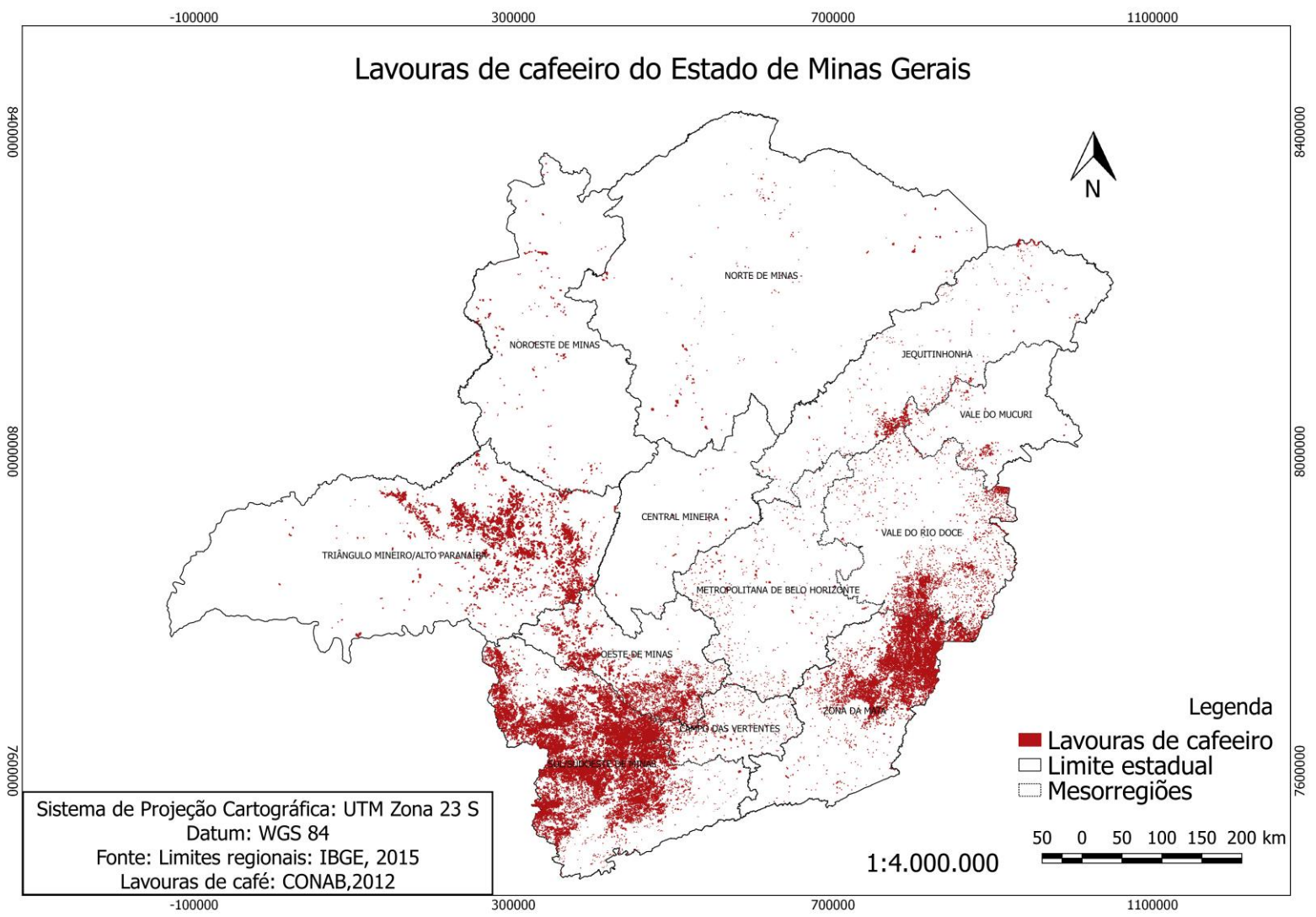
Vale recordar que é possível que a estimativa na produção de casca de café no estado esteja subestimada. Isso porque, com intuito de obter resultados mais conservadores, optou-se por adotar o percentual mais baixo, informado na literatura, em termos de massa de casca em relação ao fruto do cafeeiro, o qual se refere especificamente ao processamento do fruto por

via úmida. No entanto, conforme apontado na literatura (BORÉM, 2008; OLIVEIRA; FRANCA, 2015), o uso da técnica por via seca, justamente a que gera maiores quantidades de casca de café, é mais comum em países tropicais, como o Brasil.

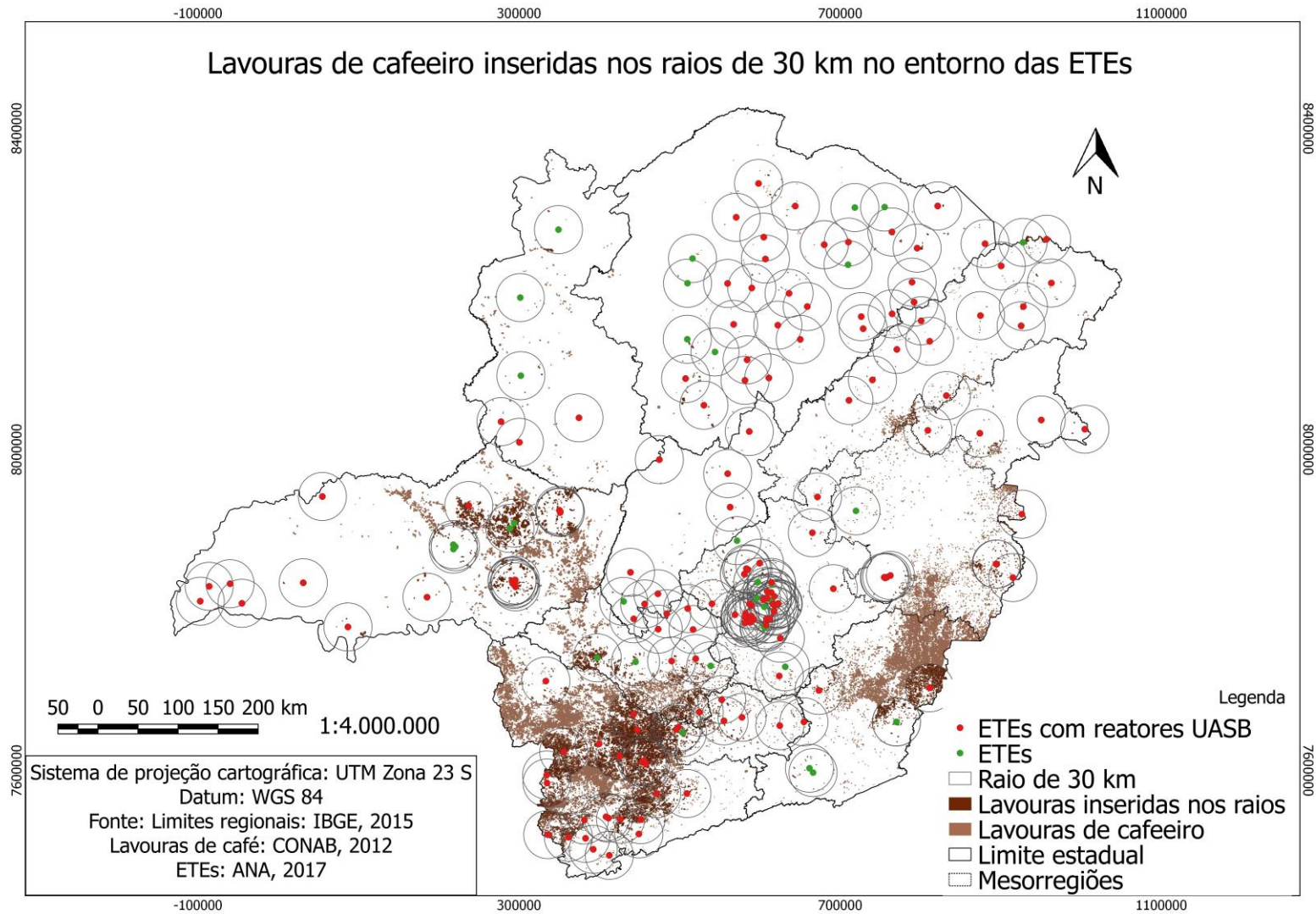
A partir dos resultados encontrados, foi possível extrair informações para testar as duas últimas hipóteses desta pesquisa: a disponibilidade de casca de café para compostagem do lodo de reator UASB e a disponibilidade de área de lavouras de cafeeiro para disposição do composto orgânico produzido a partir de casca de café e lodo de reator UASB. As conclusões obtidas para essas hipóteses serão apresentadas nos tópicos 5.4.3 e 5.5. Mais informações sobre a área de cafezal nas proximidades de cada ETE e respectiva produção de casca de café, são apresentadas no Apêndice 1.



**Figura 5.12** – Mapa com localização das ETEs no estado de Minas Gerais



**Figura 5.13** – Mapa com localização das lavouras de cafeeiro no estado de Minas Gerais



**Figura 5.14** – Mapa com identificação de lavours de cafeeiro localizadas nas proximidades de ETEs

### **5.4.3 Estimativa da quantidade de lodo de reator UASB e casca de café que poderiam ser compostados no estado de Minas Gerais**

Em linhas gerais, a partir das estimativas realizadas, é possível enumerar as seguintes conclusões:

- a. Em 59 ETEs, isto é, 38% das estações, existem condições para efetuar a compostagem de todo o volume de lodo de reator UASB com casca de café; sendo todas essas consideradas de pequeno ou médio porte, ou seja, com população equivalente abaixo de 100.000 habitantes;
- b. O lodo produzido nessas 59 estações representa 17% de todo o lodo de reator UASB produzido em Minas Gerais;
- c. De toda a massa de lodo de reator UASB produzido em Minas Gerais, a massa que poderia ser misturada com a casca de café para produção de composto orgânico equivale a 23%;
- d. Da massa total de casca de café gerada nas proximidades das ETEs, a massa que poderia ser misturada com lodo de reator UASB para produção de composto orgânico equivale a 15%.

Dentre as 59 ETEs identificadas com potencial de compostar todo o lodo de reator UASB gerado em suas unidades, investigou-se quais delas não produziam outra qualidade de lodo além do UASB, seja por serem compostas apenas por reatores UASB ou por serem compostas por unidades cuja retirada de lodo é feita em longos intervalos de tempo, como as lagoas de polimento. Isso foi feito com o intuito de selecionar e indicar ETEs que poderiam aplicar a técnica proposta neste trabalho à totalidade do lodo gerado em suas unidades, evitando-se, assim, a existência de duas rotas de gestão do lodo na mesma estação (aterro sanitário e aproveitamento agrícola). A partir dessa avaliação, levantou-se as seguintes informações:

- a. Em 24 ETEs, o que equivale a 16% das estações, poderiam ser aplicadas a técnica de compostagem com a casca de café à totalidade do lodo gerado. Dentre essas estações, 16 possuem equivalente populacional (EP) menor que 10.000 habitantes, 7 possuem EP entre 10.000 e 30.000 habitantes e 1 possui EP próximo a 64.000 habitantes;
- b. A massa de lodo de reator UASB (*in natura*) produzida nessas ETEs corresponde a 9.835 toneladas, o equivalente a 6% de todo o lodo de reator UASB gerado no estado;
- c. A massa de casca de café que poderia ser compostada com o lodo dessas estações, corresponde à 15% do total de casca de café gerado nas áreas próximas à tais ETEs.

Esses resultados não indicam que não haveria disponibilidade de casca de café para compostar o lodo de outras qualidades gerado nas 35 ETEs restantes. Todavia, para se fazer essa afirmação, seria necessário definir a proporção entre as demais qualidades de lodo e a casca de café e realizar os mesmos cálculos realizados para o lodo de reator UASB. Ainda assim, arrisca-se afirmar que no entorno da maioria dessas ETEs haveria disponibilidade de casca de café suficiente para mistura com os outros tipos de lodo para produção de composto orgânico, uma vez que, na maioria dos casos, o percentual de casca de café demandado é menor que 50% do total gerado nessas propriedades agrícolas.

**Diante desses resultados, tem-se que a hipótese de que haveria disponibilidade de casca de café para composição de pilhas de compostagem com a maior parte do lodo de reator UASB gerado em Minas Gerais deve ser refutada.** Ou seja, a disponibilidade de casca de café em fazendas próximas às ETEs se mostrou um fator limitante para a compostagem do lodo em algumas localidades.

No entanto, vale lembrar que estes resultados se referem ao cenário mais conservador no que diz respeito à quantidade de casca de café produzida no estado. Caso se considere um cenário em que a geração de casca de café acontece na maior proporção em relação à massa de fruto seco, conforme apontado na literatura, isto é, igual a 29%, tem-se os seguintes resultados: i) em 79 ETEs, isto é, 51% das estações, existem condições para efetuar a compostagem de todo o volume de lodo de reator UASB com casca de café; ii) o lodo produzido nessas 79 estações representa 24% de todo o lodo de reator UASB produzido em Minas Gerais. Desta forma, em um maior número de ETEs seria possível realizar a associação do lodo de reator UASB com a casca de café para compostagem, ainda assim, a disponibilidade deste último subproduto continuaria a ser um fator limitante para a prática.

Em relação às ETEs para as quais não haveria disponibilidade de casca de café suficiente para compostar todo o lodo produzido, ainda que se descarte a possibilidade do tratamento do lodo através da compostagem com a casca de café, não é necessário descartar as possibilidades de aproveitamento agrícola do lodo em lavouras de cafeeiro. Nesses casos, a compostagem do lodo poderia ser feita com outros materiais ou, ainda, a higienização do lodo poderia ser feita utilizando-se outras técnicas, como, por exemplo, a caleação. Sendo assim, as informações de área de lavoura localizada próxima a cada ETE podem ser úteis para se realizar o planejamento do aproveitamento agrícola do lodo em cafezais, independente da forma de tratamento do lodo. Essa questão é retomada no tópico 5.5, no qual é feita uma avaliação na

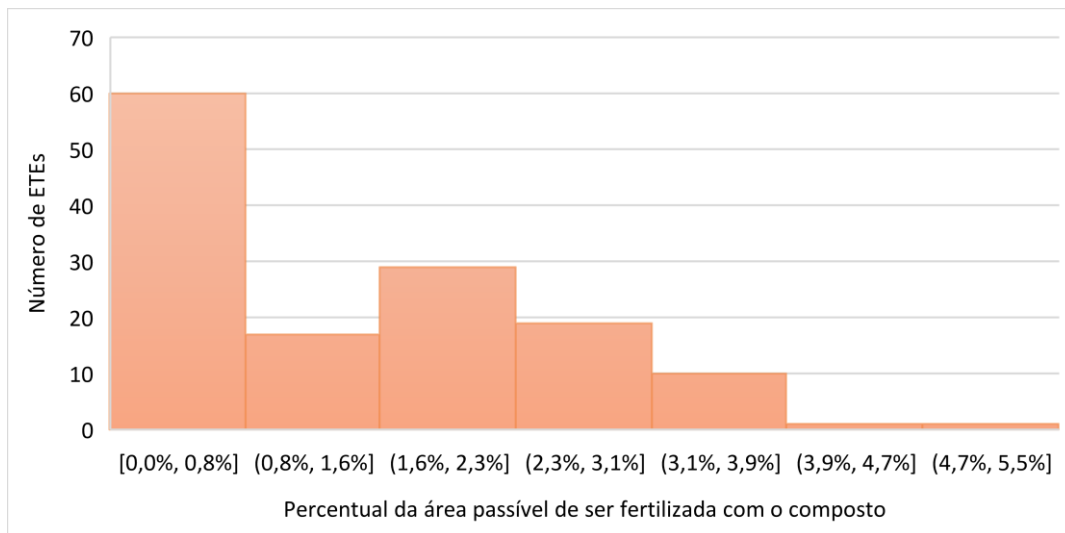
disponibilidade de área de lavouras de cafeeiro para disposição do lodo de reator UASB não compostado.

No Apêndice 1, são apresentadas as estimativas discutidas neste tópico (produção de lodo de reator UASB, área de lavoura próxima à ETE, produção de casca de café e percentual do lodo de reator UASB e da casca de café passíveis de utilização na compostagem) detalhadas por estação de tratamento de esgoto. O propósito de se apresentar nesse nível de detalhamento os dados produzidos é fornecer aos gestores do esgotamento sanitário de Minas Gerais informações que possam ser úteis para o planejamento do aproveitamento agrícola do lodo, para que estes possam ter condições de tomar as decisões que julgarem mais adequadas de acordo com a realidade em que cada município está inserido.

### **5.5 Estimativa da área de cafezal passível de ser fertilizada com o composto orgânico produzido**

A estimativa da área de lavoura de cafeeiro necessária para disposição do composto orgânico produzido a partir da mistura de lodo de esgoto e casca de café ou, em outras palavras, a área passível de ser fertilizada com este adubo orgânico, foi calculada tomando-se o potássio como elemento químico de referência. Os cálculos revelaram que o composto orgânico passível de ser produzido nas 135 ETEs que possuem alguma área de lavoura de cafeeiro em seu entorno poderia ser integralmente disposto nessas áreas. **Ou seja, confirma-se a última hipótese desta pesquisa, a qual enuncia que o composto orgânico produzido poderia ser aproveitado, em sua totalidade, nas próprias lavouras de café.**

Efetivamente, caso se compare a área que seria fertilizada com o composto orgânico com a área total mapeada no entorno das ETEs, o percentual fertilizado representa apenas 0,4% da área total. Esse resultado comprova a disponibilidade de áreas para o aproveitamento agrícola do lodo de esgoto em Minas Gerais. Na Figura 5.15 apresenta-se o número de ETEs, de acordo com o percentual da área de lavoura de cafeeiro do entorno que poderia ser fertilizado com o composto orgânico produzido com seu lodo de reator UASB.



**Figura 5.15** – Número de ETEs, por faixa do percentual da área de lavoura de cafeeiro que poderia ser fertilizada com o composto orgânico

Cabe lembrar que, no tópico 5.1.2, apontou-se como uma das limitações desta pesquisa o fato de se assumir a qualidade do composto produzido experimentalmente para estimar a área de cafezal que poderia ser fertilizada com compostos orgânicos produzidos com lodo de reator UASB de diversas ETEs de Minas Gerais e com diferentes características. No entanto, levando-se em conta os resultados obtidos, é possível afirmar que, mesmo que a qualidade do composto varie de uma estação para outra, a hipótese discutida não seria refutada.

Há de se apontar ainda que, levando em conta os resultados obtidos, observou-se que a disponibilidade de casca de café para compostagem será sempre o fator limitante em comparação com a disponibilidade de área. Em outras palavras, sempre que houver casca de café em quantidade suficiente para mistura com lodo de reator UASB com o intuito de se produzir composto orgânico, haverá também área suficiente para disposição de todo esse composto orgânico.

Posta a constatação acima e pensando nas ETEs que não teriam oferta suficiente de casca de café para composição de pilhas de compostagem, verificou-se a disponibilidade de área de lavoura de café para aproveitamento agrícola do lodo de reator UASB não compostado. Levando em conta, novamente, a dose de aplicação calculada referente a cada macronutriente (nitrogênio, fósforo e potássio), a disponibilidade de área foi avaliada tomando-se por base o fósforo como elemento químico de referência. Constatou-se que 123 ETEs, isto é, 80% das estações compostas por reatores UASB, teriam área suficiente para realizar o aproveitamento agrícola do lodo de reator UASB em cultivos de cafeeiro, o que corresponde a 73% do volume de lodo de reator UASB produzido no estado.

Tais resultados reforçam o argumento de que a indisponibilidade de áreas agrícolas não é um fator limitante para o aproveitamento agrícola do lodo em Minas Gerais. Essa constatação vai ao encontro ao que é reportado pela *UN-Habitat* (2008) e por Bortolini et al. (2017). De acordo com a *UN-Habitat*, caso o Brasil atingisse os níveis de coleta e tratamento de esgoto de países desenvolvidos, a área agrícola necessária para disposição do lodo produzido representaria apenas 0,31% do total de áreas existentes no país. Bortolini et al., por sua vez, comparou a quantidade de nutrientes demandada pelas culturas agrícolas localizadas nas bacias hidrográficas do Rio das Velhas e dos Rios Jequitaiá e Pacuí e Trecho do São Francisco com a quantidade de nutrientes disponível no lodo gerado nas ETEs dessas bacias. A conclusão foi que o nitrogênio presente no lodo de esgoto representa apenas 0,8% da demanda agrícola por este nutriente nessa região.

Novamente, com o intuito de fornecer informações que possam ser úteis para o planejamento do aproveitamento agrícola do lodo em nível municipal, são fornecidos, no Apêndice 2, os dados apresentados neste tópico, detalhados por estação de tratamento de esgoto. Apresenta-se, também, a demanda por nutrientes que poderia ser suprida com o uso do composto orgânico.

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se esta pesquisa confirmando que a compostagem se mostrou um processo eficiente de redução na contagem de todos os microorganismos patogênicos monitorados (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, salmonela e colifagos) em níveis satisfatórios. A qualidade microbiológica alcançada pelo composto orgânico foi compatível à de um lodo Classe A, segundo a classificação da Resolução CONAMA 375/2006.

No que diz respeito à qualidade nutricional do composto orgânico produzido, comparando-se a proporção entre os nutrientes N, P e K do composto final com a necessidade de adubação média do cafeeiro, concluiu-se que o elemento químico limitante para determinação da dose de aplicação do adubo no solo seria o potássio. Esse composto orgânico é capaz de suprir, em média, 42% e 56% do nitrogênio e fósforo, respectivamente, requerido pela cultura do cafeeiro, logo, seria necessário complementar a aplicação desses nutrientes via adubação química convencional. Além disso, o pH, os teores de COT e  $N_T$  e a relação C/N estiveram em concordância com os estipulados na instrução normativa (IN 25/2009) do MAPA para comercialização de fertilizantes orgânicos.

Ao investigar a proximidade entre as lavouras de cafeeiro de Minas Gerais com ETEs cujos fluxogramas eram compostos, entre outras unidades, por reatores UASB, constatou-se que apenas 19 ETEs não apresentam nenhuma área produtora de café no seu entorno. Ou seja, 88% das ETEs possuem alguma lavoura de cafeeiro localizada em suas proximidades, sendo que o lodo de reator UASB produzido nessas ETEs representa 94% do volume total de lodo de reator UASB gerado no estado. Em contrapartida, a estimativa da quantidade de lodo de reator UASB dessas ETEs que poderia ser misturado com a casca de café gerada nas lavouras mapeadas para a produção de composto orgânico revelou que apenas 59 ETEs (38% do total) teriam condição de compostar todo o volume de lodo de reator UASB gerado em suas unidades com casca de café, o que representa 17% de todo o lodo de reator UASB produzido em Minas Gerais. Ou seja, a disponibilidade de casca de café se mostrou um fator limitante para a compostagem do lodo em algumas localidades. No tocante à avaliação da disponibilidade de área de lavoura de cafeeiro para disposição do composto com vista à adubação do solo, confirmou-se que a totalidade do adubo passível de ser produzido no estado, segundo a mistura de resíduos proposta, poderia ser utilizado na adubação dos cafezais.

Por fim, a conclusão geral desta pesquisa é que a compostagem do lodo de reator UASB com a casca de café e a destinação do composto produzido para as próprias fazendas produtoras de café mostrou-se alternativa com possibilidade de aplicação em diversas ETEs de Minas Gerais. Ainda que para algumas ETEs não seja possível aplicar a proposta, devido à insuficiência de casca de café por exemplo, foi possível identificar diversas estações para as quais seria possível seguir a sugestão desta pesquisa, ETEs de pequeno e médio porte inclusive, para as quais a técnica de compostagem seria adequada devido às suas vantagens e limitações.

Reconhece-se que o monitoramento de muitas variáveis não foi contemplado nesta pesquisa, como disponibilidade de área das ETEs para fazer a compostagem, interesse dos produtores de café no fornecimento da casca e recebimento do adubo, viabilidade econômica da proposta etc. Todavia, acredita-se que, por meio da ciência e pesquisa, foi possível apontar algumas oportunidades, porém, para efetivação dessa mudança, é necessário o envolvimento das diversas partes interessadas, como companhias de saneamento, produtores rurais, municípios, governo e população em geral.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Pode-se enumerar as seguintes recomendações para pesquisas futuras e aprimoramento dos resultados obtidos neste trabalho:

- Testar as hipóteses levantadas neste trabalho para outras qualidades de lodo geradas em Minas Gerais;
- Avaliar o teor e o equilíbrio entre os nutrientes N, P e K no composto orgânico, caso esse fosse produzido em um pátio impermeabilizado e fossem diminuídas as perdas dos nutrientes ao longo do processo;
- Refazer o levantamento e a avaliação dos dados sobre as áreas de lavoura de cafeeiro localizadas no entorno das ETEs e, conseqüentemente, da disponibilidade de casca de café na ocasião em que as informações mais atualizadas, referentes ao ano de 2016, forem disponibilizadas no “Geoportal do Café”.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 10007 Amostragem de resíduos sólidos*. Brasil, 2004.
- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). *Atlas esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília: 2017.
- ANDREOLI, C. V. (COORD.); LARA, A. I.; FERREIRA, A. C.; BONNET, B. R. P.; PEGORINI, E. S.; WOLTER, F. R.; FONTOURA, H.; IHLENFELD, R. G. K.; DOMASZAK S. C. *Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura*. Curitiba, Editor: PROSAB. 1999.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 1ª edição ed. Paraná: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Comnhia de Saneamento do Paraná, 2001.
- ALMÉRI, N. *Lodo de esgoto como adubo na agricultura*. Negócios S.A., 2010. apud MATTA, M. E. M. *Índice de perigo para subsidiar a aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola*. Tese (Doutorado). Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, Programa de Patologia, São Paulo, 2011.
- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; MARA, D. D. Análise crítico-comparativa das regulamentações brasileira, estadunidense e britânica de qualidade microbiológica de biossólidos para uso agrícola. *Revista DAE*, p. 10–21, 2013.
- BATISTA, L. F. *Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Sanitária, Universidade de Brasília, 2015.
- BORÉM, F. M. Processamento do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). *Pós-Colheita do Café*. 1ª ed. Lavras: Editora UFLA, 2008. p. 631.
- BORTOLINI, R. L. R. et al. Avaliação do potencial de recuperação de nitrogênio e fósforo a partir do aproveitamento agrícola do lodo e efluente gerados nas estações de tratamento de esgotos em sub-bacias do Rio São Francisco. *Congresso ABES FENASAN*, 2017.
- BRAHAM, E. J. E.; BRESSANI, R. Coffee Pulp. *World Health*, v. 11, n. 12, p. 96, 2010.
- BRASIL. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos*. Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2007.
- BRASIL. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos*. Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2014
- BREMNER, J. M. Nitrogen total. In: SPARKS, D. L. et al. (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 3*. Madison: America Society of Agronomy: SSSA Book Series, 5, 1996. p. 1085–1121.
- CASTRO, A. L. F. G. DE; SILVA, O. R. DA; SCALIZE, P. S. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. *Multi-Science Journal*, v. 1, n. 2, p. 66–73, 2015.
- CHERNICHARO, C. A. DE L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Science and Technology*, v. 73, n. 3, p. 453–462, 2016.

CONAMA. Resolução N° 375 de 29 de agosto de 2006. *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.* Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2006.

CONAMA. Resolução N° 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.* Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2017.

DESA. *Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA.* Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.d.].

DINIZ, I. C. C. et al. Degradation of sewage sludge compost disposed on the soil. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, v. 36, n. 5, p. 822–829, 2016.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. DA. *Manual Prático para Compostagem de Biossólidos.* Londrina: PROSAB, 1999.

GOOGLE EARTH. Disponível em: < <https://earth.google.com/web/> > Acesso em 13 de maio de 2018.

GRIGATTI, M.; CAVANI, L.; CIAVATTA, C. The evaluation of stability during the composting of different starting materials: Comparison of chemical and biological parameters. *Chemosphere*, v. 83, n. 1, p. 41–48, 2011.

GUZMÁN, C. et al. Development of a feasible method to extract somatic coliphages from sludge, soil and treated biowaste. *Journal of Virological Methods*, v. 144, p. 41–48, 2007.

HECK, K. et al. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 54–59, 2013.

IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB).* SIDRA, 2000. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>.

IBGE. *Produção Agrícola Municipal (PAM).* SIDRA, 2012. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>.

IBGE. *Produção Agrícola Municipal (PAM).* SIDRA, 2015. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>.

INAES. *Caracterização da cafeicultura de montanha de Minas Gerais.* Estudos INAES e FAPEMIG. Cadeias Produtivas. Café. Belo Horizonte, 2010.

KRAMER, T. A.; LIU, J. Enumeration of Coliform Bacteria in Wastewater Solids Using Defined Substrate Technology. *Water Environmental Research*, v. 74, n. 6, p. 526–530, 2002.

KROSS, H. What is the potential for utilizing the resources in sludge. *Water Science and Technology*, v. 49, n. 10, p. 1–10, 2004. apud MURRAY, A.; HORVATH, A.; NELSON, K. L. Hybrid Life-Cycle Environmental and Cost Inventory of Sewage Sludge Treatment and End-Use Scenarios: A Case Study from China. *Environmental Science Technology*, v. 42, n. 9, p. 3163–3169, 2008.

KUMAR, V.; CHOPRA, A. K.; KUMAR, A. A review on sewage sludge (Biosolids) a resource for sustainable agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, v. 2, n. 4, p. 340–347, 2017.

LEITE, T. DE A. *Compostagem termofílica de lodo de esgoto: higienização e produção de biossólido para uso agrícola.* Dissertação de Mestrado. Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, 2015.

MACHADO, M. F. S. *A situação brasileira dos biossólidos.* Dissertação. Faculdade de

- Engenharia Civil, Universidade Federal de Campinas, 2001.
- MAPA. *Instrução Normativa 25/2009*. Brasília, Brasil, 2009
- MARTINS, S. F. *Análise Econômica da produção de lodo de esgoto compostado para uso na agricultura*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016.
- MATTA, M. E. M. *Índice de perigo para subsidiar a aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola*. Tese (Doutorado). Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, Programa de Patologia, São Paulo, 2011.
- MATOS, A. T. DE et al. Compostagem de alguns resíduos orgânicos, utilizando-se águas residuárias da suinocultura como fonte de nitrogênio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 199–203, 1998.
- MATOS, A. T. DE. Tratamento de resíduos na pós-colheita do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). *Pós-Colheita do Café*. 1ª ed. Lavras: Editora UFLA, 2008. p. 631.
- MATOS, A. T. DE. *Tratamento e Aproveitamento Agrícola de Resíduos Sólidos*. 1ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.
- MATOS, A. T. DE. *Manual de Análise de Resíduos Sólidos e Águas Residuárias*. 1ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2015.
- MENGISTU, T. et al. Comparative effectiveness of different composting methods on the stabilization, maturation and sanitization of municipal organic solid wastes and dried faecal sludge mixtures. *Environmental Systems Research*, v. 6, n. 5, 2017.
- MURRAY, A.; HORVATH, A.; NELSON, K. L. Hybrid Life-Cycle Environmental and Cost Inventory of Sewage Sludge Treatment and End-Use Scenarios: A Case Study from China. *Environmental Science Technology*, v. 42, n. 9, p. 3163–3169, 2008.
- MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, v. 140, n. 3, p. 369–380, 2017.
- MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Resources, Conservation and Recycling Sustainable management of coffee industry by-products and value addition — A review. “*Resources, Conservation & Recycling*”, v. 66, p. 45–58, 2012.
- NASCIMENTO, A. L. *Caracterização microbiológica, química e presença de poluentes orgânicos em amostras de lodo de esgoto de São Paulo*. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2016.
- NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; ZUBA JUNIO, G. R.; FERNANDES, L. A.; CRUZ, S. F.; CARNEIRO, J. P.; BARBOSA, C. F.; LIMA, N. N. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. *Bioscience Journal*, v. 30, n.1; p.146-153, 2014.
- OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. An Overview of the Potential Uses for Coffee Husks. In: PREEDY, V. R. (Ed.). *Coffee in Health and Disease Prevention*. London: Elsevier, 2015. p. 283–291.
- PASSANI, F. R. F.; KELLER, R.; GONÇALVES, R. F. *Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso*. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancun, 2002.
- PEREIRA NETO, J. T. *Manual de Compostagem - Processo de Baixo Custo*. Belo Horizonte: UFV/SLU/UNICEF, 1996.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. *Recomendações para o uso*

- de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, CFSEMG, Viçosa, 1999.
- ROCHA, J. H. T.; BACKES, C.; DIOGO, F. A.; PASCOTTO, C. B.; BORELLI, K. Composto de lodo de esgoto como substrato para mudas de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 33, n. 73, p. 27-36, 2013.
- ROMEIRO, J. C. T.; GRASSI FILHO, H.; MOREIRA, L. L. Q. Lodo de esgoto compostado em substituição à adubação nitrogenada mineral. *Irriga, Botucatu*, v. 19, n. 1, p. 82-93, 2014.
- ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. DE L.; MELO, G. C. B. DE. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. *Revista DAE*, n. 31, p. 55-62, 2015.
- SCHIEER, M. B.; CARNEIRO, C.; BRESSAN, O. A.; SANTOS, K. G. Crescimento e Nutrição de Mudas de Lafoensia pacari com Lodo de Esgoto. *Floresta e Ambiente*, v. 19, n. 1, p. 55-65, 2012
- SHEMEKITE, F. et al. Coffee husk composting: An investigation of the process using molecular and non-molecular tools. *Waste Management*, v. 34, n. 3, p. 642-652, 2014.
- SILVA, J. DE S. E; NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D. *Tecnologias de secagem e armazenagem para a agricultura familiar*. Suprema Gr ed. Viçosa: [s.n.].
- SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. *Diagnóstico anual Água e Esgoto*, 2015. Disponível em:< <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>>
- SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. *Diagnóstico anual Resíduos Sólidos*, 2016. Disponível em:< <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>>
- SMITH, S. R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, v. 35, n. 1, p. 142 - 156, 2009.
- TEIXEIRA, C. *Higienização do lodo de estação de tratamento de esgoto por compostagem termofílica para uso agrícola*. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade de Santa Catarina, 2012.
- TEIXEIRA PINTO, M. Higienização de lodos. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 1ª ed. Paraná: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Comnhia de Saneamento do Paraná, 2001. p. 484.
- TERA AMBIENTAL. *Tera Ambiental*. Disponível em: <<http://www.teraambiental.com.br/>>. Acesso em: 3 fev. 2018.
- UN-HABITAT. *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses of a Global Resource*. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi: 2008.
- USEPA. *Method 1682: Salmonella in Sewage Sludge (Biosolids) by Modified Semisolid Rappaport-Vassiliadis (MSRV) Medium*. Washington U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, USEPA, 2006.
- USEPA. *Method 1680: Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple- Tube Fermentation using Lauryl Tryptose Broth (LTB) and EC Medium*. Washington U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, USEPA, 2010.
- USEPA. *Review of coliphages as possible indicators of fecal contamination*. Washington U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, USEPA, 2015.
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3ª ed.

Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; LIMA, N. N.; FERNANDES, L. A. Crescimento inicial de mamoneira adubada com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. *Revista Caatinga*, v. 24, n. 4, p. 157–163, 2011.

## APÊNDICE

**Apêndice 1 – Estimativas detalhadas por estação de tratamento de esgotos**

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
ÁGUAS VERMELHAS	ETE AGUAS VERMELHAS	27,1	173,9	35,2	54,7	7%	100%
AIMORÉS	ETE AIMORÉS	65,5	419,9	1.884,0	2.443,2	100%	79%
ALFENAS	ETE ALFENAS	378,2	2.424,3	38.311,6	59.497,4	100%	19%
ALMENARA	ETE ALMENARA	168,4	1.079,8	355,2	169,9	3%	100%
ARAÇUAÍ	ETE DE ARAÇUAÍ	66,2	424,5	33,3	4,4	0%	100%
ARAÚJOS	ETE DE ARAÚJOS-SANARJ	40,3	258,3	74,6	28,2	2%	100%
ARAXÁ	ETE DISTRITO INDUSTRIAL	3,4	21,9	9.630,2	16.291,2	100%	1%
ARAXÁ	ETE BARREIRINHO	12,3	78,7	7.455,9	12.627,4	100%	3%
ARAXÁ	ETE BOA VISTA	30,7	196,8	8.328,2	14.113,4	100%	6%
ARAXÁ	ETE _ VILA UNIVERSITÁRIA	13,6	87,5	8.708,2	14.741,3	100%	3%
ARAXÁ	ETE CAMUÃ	6,8	43,7	9.540,8	16.143,3	100%	1%
ARAXÁ	ETE CENTRAL _ ARAXÁ	453,8	2.909,2	9.452,2	15.980,2	100%	84%
BARBACENA	ETE - CAETES / BARBACENA	123,6	792,5	493,2	336,0	9%	100%
BELO HORIZONTE	ETE MINAS SOLIDÁRIA	2,9	18,3	1,1	1,6	2%	100%
BELO HORIZONTE	ETE JARDIM VITÓRIA	15,1	96,8	16,0	12,5	3%	100%
BELO HORIZONTE	ETE OLHOS DÁGUA	26,9	172,3	10,3	1,6	0%	100%
BELO HORIZONTE	ETE ONÇA	4.260,7	27.311,9	310,3	7,5	0%	100%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
BERILO	ETE BERILO	12,2	78,1	144,7	123,7	34%	100%
BETIM	ETE SANTO ANTÔNIO	9,7	62,2	135,2	119,6	42%	100%
BETIM	ETE PETROVALE	15,9	101,8	109,5	67,8	14%	100%
BETIM	CACHOEIRA	24,3	155,7	248,3	255,4	35%	100%
BETIM	ETE TEIXEIRINHA	39,9	256,1	205,6	217,5	18%	100%
BETIM	ETE BANDEIRINHAS	95,9	614,9	236,5	213,7	8%	100%
BETIM	BETIM CENTRAL	1.445,9	9.268,8	248,3	255,4	1%	100%
BOA ESPERANÇA	ETE BOA ESPERANÇA	181,3	1.162,1	47.312,9	70.364,5	100%	8%
BOM DESPACHO	ETE MATADOURO	141,5	907,2	17,2	24,6	1%	100%
BOM REPOUSO	ETE BOM REPOUSO (PRINCIPAL) SEDE	29,9	191,9	3.468,4	4.689,2	100%	19%
BOM SUCESSO	ETE BOM SUCESSO	78,6	504,1	15.620,9	21.804,3	100%	11%
BORDA DA MATA	ETE PRINCIPAL DE BORDA DA MATA	76,8	492,5	5.552,4	7.168,8	100%	32%
BRASÍLIA DE MINAS	ETE BRASÍLIA DE MINAS	102,9	659,5	12,3	16,4	1%	100%
BUENO BRANDÃO	BUENO BRANDÃO (ETE PRINCIPAL)	29,1	186,7	5.580,3	7.399,4	100%	12%
BUENÓPOLIS	ETE BUENÓPOLIS	25,2	161,6	14,3	24,9	3%	100%
CABO VERDE	ETE CABO VERDE	38,5	246,8	32.505,6	54.826,9	100%	2%
CAMBUÍ	ETE DISRITO INDUSTRIAL	5,2	33,3	411,3	461,0	100%	33%
CAMPINA VERDE	ETE_CAMPINA VERDE	80,0	513,1	0,0	0,0	0%	0%
CAPITÃO ENÉAS	ETE CAPITÃO ENÉAS	21,7	138,9	233,5	510,0	79%	100%
CARANGOLA	ETE PRESIDENTE TANCREDO NEVES	18,8	120,4	45.746,0	53.465,1	100%	1%
CARBONITA	ETE CARBONITA	27,0	173,2	45,0	52,6	7%	100%
CARLOS CHAGAS	ETE CARLOS CHAGAS SEDE	59,8	383,5	0,0	0,0	0%	0%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
CARNEIRINHO	ETE CARNEIRINHO SEDE	37,8	242,2	0,0	0,0	0%	0%
CONCEIÇÃO DA BARRA DE MINAS	ETE CONCEIÇÃO DA BARRA DE MINAS_SEDE	8,0	51,3	3.625,6	5.167,3	100%	5%
CAXAMBU	ETE CAXAMBU	113,3	726,3	4.924,5	5.935,7	100%	57%
CENTRALINA	ETE CENTRALINA	5,4	34,4	0,0	0,0	0%	0%
CLARO DOS POÇÕES	ETE CLARO DOS POÇÕES SEDE	7,5	48,2	21,3	17,5	8%	100%
CLÁUDIO	ETE CLÁUDIO	115,8	742,2	2.859,3	4.033,8	100%	85%
CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	ETE CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	39,6	253,9	231,4	245,1	21%	100%
CONSELHEIRO LAFAIETE	ETE BANANEIRAS	256,0	1.640,9	540,7	378,3	5%	100%
CONTAGEM	EE NOVA CONTAGEM INTEGRADA COM ETE	383,0	2.455,2	219,1	377,8	3%	100%
CONTAGEM	ONÇA (BELO HORIZONTE)	1.142,1	7.320,9	310,3	7,6	0%	100%
CORAÇÃO DE JESUS	ETE CORAÇÃO DE JESUS	34,1	218,4	0,0	0,0	0%	0%
CORINTO	ETE CURRALINHO	80,7	517,4	0,0	0,0	0%	0%
CORONEL MURTA	ETE CORONEL MURTA	23,1	148,2	25,2	2,8	0%	100%
CRISTÁLIA	ETE CRISTALIA	5,6	36,1	109,3	101,0	61%	100%
CURVELO	ETE CURVELO	347,6	2.228,4	445,8	155,6	2%	100%
DESTERRO DO MELO	ETE DESTERRO DO MELO	7,7	49,5	417,0	352,7	100%	65%
DIVINÓPOLIS	ETE RIO PARÁ	25,3	162,1	103,3	57,5	8%	100%
DORES DO INDAIÁ	ETE DORES DO INDAIÁ	62,7	402,1	145,9	262,6	14%	100%
ENGENHEIRO	ETE ENGENHEIRO	15,1	96,9	34,3	92,6	21%	100%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
NAVARRO	NAVARRO						
ESMERALDAS	ETE ESMERALDA	35,4	227,1	381,4	752,9	72%	100%
FRANCISCO DUMONT	ETE FRANCISCO DUMONT	4,3	27,3	15,9	13,1	10%	100%
FRANCISCO SÁ	ETE FRANCISCO SÁ	54,2	347,6	0,0	0,0	0%	0%
FRUTAL	ETE FRUTAL	267,4	1.713,9	0,0	0,0	0%	0%
FUNILÂNDIA	ETE FUNILÂNDIA	2,9	18,4	778,0	345,8	100%	25%
GONÇALVES	ETE GONÇALVES_SEDE	5,4	34,4	661,2	774,4	100%	21%
GRÃO MOGOL	ETE GRÃO MOGOL	18,2	116,4	10,3	6,2	1%	100%
GUARDA-MOR	ETE RIBEIRÃO GUARDA-MOR	19,5	125,2	212,9	451,9	78%	100%
IPATINGA	ETE RIBEIRÃO IPANEMA - IPATINGA	1.606,3	10.296,5	810,3	525,5	1%	100%
IPATINGA	ETE BELA VISTA - IPATINGA	18,2	116,7	652,7	399,9	74%	100%
IPATINGA	ETE HORTO - IPATINGA	21,1	135,5	540,2	352,8	56%	100%
IPATINGA	ETE AREAL - IPATINGA	39,0	249,7	587,6	385,5	33%	100%
ITABIRA	ETE LABOREAUX	326,2	2.091,1	335,4	316,3	3%	100%
ITABIRITO	ETE MARZAGÃO	110,2	706,5	47,0	48,9	1%	100%
ITACARAMBI	ETE DE ITACARAMBI_SEDE	23,6	151,4	647,7	1.419,7	100%	0%
ITAJUBÁ	ETE SAPUCAI	436,0	2.795,2	7.942,4	10.546,0	82%	100%
ITAOBIM	ETE DE ITAOBIM_SEDE	38,3	245,8	50,2	45,4	4%	100%
ITAPECERICA	ETE ITAPECERICA	76,0	487,3	3.795,2	4.961,6	100%	45%
ITURAMA	ETE ITURAMA	188,2	1.206,5	0,0	0,0	0%	0%
JAÍBA	ETE JAIBA	27,7	177,2	323,6	583,3	71%	0%
JANAÚBA	ETE JANAUBA	95,1	609,4	0,0	0,0	0%	0%
JANUÁRIA	ETE DE JANUÁRIA	55,1	353,5	0,0	0,0	0%	0%
JOAÍMA	ETE JOAIMA	19,2	122,8	102,3	82,9	15%	100%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
JOÃO PINHEIRO	ETE EXTREMA	195,8	1.255,0	29,4	42,0	1%	100%
JOSENÓPOLIS	ETE JOSENÓPOLIS	7,2	46,4	102,5	98,2	46%	100%
JUATUBA	ETE NOVA ESPERANÇA	11,5	74,0	398,0	484,4	100%	71%
JURAMENTO	ETE DE JURAMENTO	8,5	54,2	17,0	2,3	1%	100%
LAGOA DA PRATA	ETE LAGOA DA PRATA	262,6	1.683,6	81,2	121,5	2%	100%
LAGOA FORMOSA	ETE 2	20,6	131,7	13.895,6	33.329,2	100%	2%
LAGOA FORMOSA	ETE 3	20,6	131,7	12.535,5	33.713,5	100%	2%
LAGOA FORMOSA	ETE 1	32,9	210,8	14.385,1	40.779,1	100%	2%
LAGOA SANTA	ETE VILA MARIA	35,8	229,5	725,7	280,8	26%	100%
LAMBARI	ETE BAIRRO RECANTO DA SERRA	0,3	2,2	25.241,3	29.637,9	100%	0%
LAVRAS	ETE RIBEIRÃO VERMELHO	326,8	2.095,0	22.172,3	31.371,1	100%	31%
LAVRAS	ETE ÁGUA LIMPA	145,3	931,4	24.941,8	35.264,3	100%	12%
LIMEIRA DO OESTE	ETE LIMEIRA DO OESTE_SEDE	18,6	119,3	0,0	0,0	0%	0%
MALACACHETA	ETE MALACACHETA	40,9	262,4	4.210,3	4.340,0	100%	28%
MANTENA	ETE MANTENA	81,1	519,8	1.580,0	1.085,8	45%	100%
MATA VERDE	ETE MATA VERDE	27,6	176,7	2.370,9	3.122,1	100%	26%
MIRABELA	ETE MIRABELA	17,4	111,7	107,6	210,6	41%	100%
MOEMA	ETE MOEMA	27,7	177,7	10,1	15,0	2%	100%
MONTE CARMELO	ETE MONTE CARMELO	132,9	851,7	22.847,4	51.994,9	100%	8%
MONTES CLAROS	ETE MONTES CLAROS	1.968,7	12.620,1	2,5	2,3	0%	100%
MONTE SIÃO	ETE MONTE SIÃO	82,7	529,9	6.677,3	9.891,7	100%	25%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
NOVA LIMA	JARDIM CANADÁ	29,9	191,6	20,5	4,6	1%	100%
NOVA LIMA	VALE DO SERENO	57,9	371,2	8,0	1,7	0%	100%
NOVA PORTEIRINHA	INTEGRADA COM ETE JANAÚBA (JANAÚBA)	19,5	125,0	0,0	0,0	0%	0%
NOVA SERRANA	ETE NOVA SERRANA	390,5	2.503,4	280,2	220,5	2%	100%
PARÁ DE MINAS	ETE PARÁ DE MINAS	438,2	2.808,7	589,0	578,2	4%	100%
PARAGUAÇU	ETE PARANGUAÇU	93,6	599,7	46.366,6	65.855,8	100%	4%
PASSOS	ETE ANTÔNIO UBIRAJARA	373,2	2.392,3	2.710,1	5.779,3	52%	100%
PEDRA AZUL	ETE PEDRA AZUL	103,5	663,4	35,7	30,2	1%	100%
PEDRALVA	ETE PEDRALVA	28,8	184,3	17.157,0	21.374,1	100%	4%
PIRAPORA	ETE PIRAPORA	137,7	882,7	1.210,7	5.317,4	100%	77%
POÇOS DE CALDAS	ETE BORTOLAN	2,2	14,4	13.832,3	22.192,7	100%	0%
POÇOS DE CALDAS	ETE 3	23,7	152,2	12.703,9	19.057,4	100%	4%
PORTEIRINHA	ETE PORTEIRINHA_SEDE	42,7	273,8	0,0	0,0	0%	0%
POUSO ALEGRE	ETE CIDADE JARDIM	71,5	458,0	9.236,3	11.589,7	100%	18%
POUSO ALEGRE	ETE SAPUCAI MIRM	615,6	3.946,5	9.087,9	11.545,6	63%	100%
RESPLENDOR	ETE RESPLENDOR MARGEM ESQUERDA	29,1	186,8	3.919,7	4.888,3	100%	18%
RESPLENDOR	ETE RESPLENDOR MARGEM DIREITA	30,6	195,9	3.993,0	5.000,1	100%	18%
RIBEIRÃO DAS NEVES	ETE JUSTINÓPOLIS	102,4	656,1	382,3	133,4	4%	100%
RIO PARDO DE MINAS	ETE RIO PARDO	14,7	94,1	245,3	353,3	81%	100%
RUBELITA	ETE RUBELITA	6,5	41,5	5,5	2,8	1%	100%
SALINAS	ETE SALINAS	147,8	947,6	0,0	0,0	0%	0%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
SANTA LUZIA	ETE BOM DESTINO NORTE	7,8	49,8	476,7	168,1	73%	100%
SANTA LUZIA	ETE BOM DESTINO SUL	8,5	54,7	467,5	164,8	65%	100%
SANTA LUZIA	ETE SANTA LUZIA	270,3	1.732,9	371,8	94,0	1%	100%
SANTANA DA VARGEM	ETE SANTANA DA VARGEM	27,9	178,6	61.770,6	91.038,9	100%	1%
SANTA RITA DO SAPUCAÍ	ETE SANTA RITA DO SAPUCAI	166,5	1.067,2	12.353,4	15.973,7	100%	31%
SANTO ANTÔNIO DO MONTE	ETE SANTO ANTONIO DO MONTE	97,0	621,5	84,4	40,9	1%	100%
SÃO JOÃO DA PONTE	ETE DE SÃO JOÃO DA PONTE	4,6	29,3	130,2	235,5	100%	57%
SÃO JOÃO DEL REI	ETE COLÔNIA MARÇAL	122,9	787,7	1.666,0	2.120,9	58%	100%
SÃO JOÃO DO PARAÍSO	ETE SÃO JOÃO DO PARAISO	30,3	194,0	177,3	223,6	25%	100%
SÃO JOAQUIM DE BICAS	ETE BICAS	1,6	10,5	271,2	217,2	100%	22%
SÃO JOSÉ DA LAPA	ETE INÁCIA DE CARVALHO	2,5	16,2	511,8	267,9	100%	28%
SÃO JOSÉ DA LAPA	ETE SÃO JOSÉ DA LAPA	39,1	250,8	661,5	312,5	27%	100%
SÃO TIAGO	ETE SÃO TIAGO	29,8	191,0	3.166,6	4.523,8	100%	20%
SARZEDO	ETE SARZEDO	9,9	63,6	198,7	159,0	54%	100%
SENHORA DE OLIVEIRA	ETE BOA VISTA	18,2	116,7	3.135,3	3.435,4	100%	16%
SERRA DOS AIMORÉS	ETE - SERRA DOS AIMORÉS	11,5	73,8	153,2	553,0	100%	0%
SERRO	ETE SERRO	51,6	330,5	286,6	301,7	20%	100%
SETE LAGOAS	ETE AREIAS	16,2	104,1	1.247,7	877,3	100%	55%
SETE LAGOAS	ETE PRIMAVERA	5,7	36,8	1.360,3	890,8	100%	19%

Município	ETE	Produção de lodo seco (t/ano)	Produção de lodo úmido (t/ano)	Área de lavoura próxima (ha)	Produção de casca (t/ano)	Percentual do lodo utilizado (%)	Percentual da casca utilizada (%)
SETE LAGOAS	ETE FLÓRIDA	3,2	20,2	1.362,0	1.028,8	100%	9%
TAIOBEIRAS	ETE TAIOSBEIRAS	44,4	284,9	983,9	2.681,1	100%	49%
TEÓFILO OTONI	ETE TEÓFILO OTONI	532,0	3.410,3	1.431,7	1.094,0	7%	100%
TRÊS MARIAS	ETE TRÊS MARIAS	124,2	796,3	0,0	0,0	0%	0%
TURMALINA	ETE TURMALINA	55,4	355,4	151,3	200,3	12%	100%
UBERABA	ETE FRANCISCO VELLUDO	1.173,8	7.524,6	1.184,9	2.762,3	8%	100%
UNIÃO DE MINAS	ETE UNIÃO DE MINAS	14,7	94,0	0,0	0,0	0%	0%
VARGINHA	ETE SÃO JOSÉ	350,3	2.245,7	40.551,1	51.773,8	100%	20%
VARGINHA	ETE WALITA	4,5	28,6	37.588,3	46.787,2	100%	0%
VARGINHA	ETE SANTANA	318,4	2.041,0	41.245,0	52.801,8	100%	18%
VÁRZEA DA PALMA	ETE VARZEA DA PALMA	33,2	212,9	1.662,3	7.002,0	100%	14%
VARZELÂNDIA	ETE VARZELANDIA_SEDE	9,1	58,3	0,0	0,0	0%	0%
VAZANTE	ETE DE VAZANTE_SEDE	81,6	523,0	0,0	0,0	0%	0%
VESPASIANO	ETE NOVA PAMPULHA	101,4	650,1	373,8	117,5	4%	100%

**Apêndice 2 – Estimativas detalhadas por estação de tratamento de esgoto**

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
ÁGUAS VERMELHAS	ETE AGUAS VERMELHAS	8,8	1,3	3,8%	42%	95%	100%
AIMORÉS	ETE AIMORÉS	310,6	47,0	2,5%	42%	95%	100%
ALFENAS	ETE ALFENAS	1.793,0	214,1	0,6%	43%	60%	100%
ALMENARA	ETE ALMENARA	27,2	4,1	1,2%	42%	95%	100%
ARAÇUAÍ	ETE DE ARAÇUAÍ	0,7	0,1	0,3%	43%	60%	100%
ARAÚJOS	ETE DE ARAÚJOS- SANARJ	4,5	0,5	0,7%	43%	60%	100%
ARAXÁ	ETE DISTRITO INDUSTRIAL	16,2	1,6	0,0%	42%	57%	100%
ARAXÁ	ETE BARREIRINHO	58,2	5,9	0,1%	42%	57%	100%
ARAXÁ	ETE BOA VISTA	145,6	14,7	0,2%	42%	57%	100%
ARAXÁ	ETE _ VILA UNIVERSITÁRIA	64,7	6,5	0,1%	42%	57%	100%
ARAXÁ	ETE CAMUÃ	32,3	3,3	0,0%	42%	57%	100%
ARAXÁ	ETE CENTRAL _ ARAXÁ	2.151,6	216,9	2,3%	42%	57%	100%
BARBACENA	ETE - CAETES / BARBACENA	53,8	6,4	1,3%	43%	60%	100%
BELO HORIZONTE	ETE MINAS SOLIDÁRIA	0,3	0,0	2,7%	43%	60%	100%
BELO HORIZONTE	ETE JARDIM VITÓRIA	2,0	0,2	1,5%	43%	60%	100%
BELO HORIZONTE	ETE OLHOS DÁGUA	0,3	0,0	0,3%	43%	60%	100%
BELO HORIZONTE	ETE ONÇA	1,2	0,1	0,0%	43%	60%	100%
BERILO	ETE BERILO	19,8	3,0	2,1%	42%	95%	100%
BETIM	ETE SANTO ANTÔNIO	19,1	2,3	1,7%	43%	60%	100%
BETIM	ETE PETROVALE	10,8	1,3	1,2%	43%	60%	100%
BETIM	CACHOEIRA	40,9	4,9	2,0%	43%	60%	100%
BETIM	ETE TEIXEIRINHA	34,8	4,2	2,0%	43%	60%	100%
BETIM	ETE BANDEIRINHAS	34,2	4,1	1,7%	43%	60%	100%

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
BETIM	BETIM CENTRAL	40,9	4,9	2,0%	43%	60%	100%
BOA ESPERANÇA	ETE BOA ESPERANÇA	859,5	102,6	0,2%	43%	60%	100%
BOM DESPACHO	ETE MATADOURO	3,9	0,5	2,7%	43%	60%	100%
BOM REPOUSO	ETE BOM REPOUSO (PRINCIPAL) SEDE	141,9	16,9	0,5%	43%	60%	100%
BOM SUCESSO	ETE BOM SUCESSO	372,8	44,5	0,3%	43%	60%	100%
BORDA DA MATA	ETE PRINCIPAL DE BORDA DA MATA	364,2	43,5	0,8%	43%	60%	100%
BRASÍLIA DE MINAS	ETE BRASÍLIA DE MINAS	2,6	0,3	2,5%	43%	60%	100%
BUENO BRANDÃO	BUENO BRANDÃO (ETE PRINCIPAL)	138,1	16,5	0,3%	43%	60%	100%
BUENÓPOLIS	ETE BUENÓPOLIS	4,0	0,3	1,9%	42%	54%	100%
CABO VERDE	ETE CABO VERDE	182,5	21,8	0,1%	43%	60%	100%
CAMBUÍ	ETE DISRITO INDUSTRIAL	24,6	2,9	0,7%	43%	60%	100%
CAMPINA VERDE	ETE_CAMPINA VERDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
CAPITÃO ENÉAS	ETE CAPITÃO ENÉAS	81,6	8,2	3,5%	42%	57%	100%
CARANGOLA	ETE PRESIDENTE TANCREDO NEVES	89,1	10,6	0,0%	43%	60%	100%
CARBONITA	ETE CARBONITA	8,4	1,0	2,2%	43%	60%	100%
CARLOS CHAGAS	ETE CARLOS CHAGAS SEDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
CARNEIRINHO	ETE CARNEIRINHO SEDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
CONCEIÇÃO DA BARRA DE MINAS	ETE CONCEIÇÃO DA BARRA DE MINAS_SEDE	38,0	4,5	0,1%	43%	60%	100%
CAXAMBU	ETE CAXAMBU	537,1	64,1	1,3%	43%	60%	100%
CENTRALINA	ETE CENTRALINA	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
CLARO DOS POÇÕES	ETE CLARO DOS POÇÕES SEDE	2,8	0,4	2,0%	42%	95%	100%
CLÁUDIO	ETE CLÁUDIO	548,9	65,5	2,3%	43%	60%	100%

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	ETE CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	39,2	5,9	2,6%	42%	95%	100%
CONSELHEIRO LAFAIETE	ETE BANANEIRAS	60,5	9,2	1,7%	42%	95%	100%
CONTAGEM	EE NOVA CONTAGEM	60,5	7,2	3,3%	43%	60%	100%
CONTAGEM	INTEGRADA COM ETE ONÇA (BELO HORIZONTE)	1,2	0,1	0,0%	43%	60%	100%
CORAÇÃO DE JESUS	ETE CORAÇÃO DE JESUS	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
CORINTO	ETE CURRALINHO	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
CORONEL MURTA	ETE CORONEL MURTA	0,4	0,1	0,3%	42%	95%	100%
CRISTÁLIA	ETE CRISTALIA	16,2	2,4	2,2%	42%	95%	100%
CURVELO	ETE CURVELO	24,9	3,0	0,7%	43%	60%	100%
DESTERRO DO MELO	ETE DESTERRO DO MELO	36,6	4,4	1,0%	43%	60%	100%
DIVINÓPOLIS	ETE RIO PARÁ	9,2	1,4	1,3%	42%	95%	100%
DORES DO INDAIÁ	ETE DORES DO INDAIÁ	42,0	4,2	2,9%	42%	57%	100%
ENGENHEIRO NAVARRO	ETE ENGENHEIRO NAVARRO	14,8	1,3	3,8%	42%	55%	100%
ESMERALDAS	ETE ESMERALDA	120,5	14,4	3,8%	43%	60%	100%
FRANCISCO DUMONT	ETE FRANCISCO DUMONT	2,1	0,3	2,0%	42%	95%	100%
FRANCISCO SÁ	ETE FRANCISCO SÁ	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
FRUTAL	ETE FRUTAL	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
FUNILÂNDIA	ETE FUNILÂNDIA	13,6	1,6	0,2%	43%	60%	100%
GONÇALVES	ETE GONÇALVES_SEDE	25,4	3,0	0,5%	43%	60%	100%
GRÃO MOGOL	ETE GRÃO MOGOL	1,0	0,1	1,5%	42%	95%	100%
GUARDA-MOR	ETE RIBEIRÃO GUARDA-MOR	72,3	6,3	3,0%	42%	55%	100%
IPATINGA	ETE RIBEIRÃO IPANEMA -	84,1	12,7	1,6%	42%	95%	100%

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
	IPATINGA						
IPATINGA	ETE BELA VISTA - IPATINGA	64,0	9,7	1,5%	42%	95%	100%
IPATINGA	ETE HORTO - IPATINGA	56,4	8,5	1,6%	42%	95%	100%
IPATINGA	ETE AREAL - IPATINGA	61,7	9,3	1,6%	42%	95%	100%
ITABIRA	ETE LABOREAUX	50,6	6,0	1,8%	43%	60%	100%
ITABIRITO	ETE MARZAGÃO	7,8	1,2	2,5%	42%	95%	100%
ITACARAMBI	ETE DE ITACARAMBI_SEDE	112,0	16,9	2,6%	42%	95%	100%
ITAJUBÁ	ETE SAPUCAI	1.687,3	201,5	2,5%	43%	60%	100%
ITAOBIM	ETE DE ITAOBIM_SEDE	7,3	1,1	2,2%	42%	95%	100%
ITAPECERICA	ETE ITAPECERICA	360,4	43,0	1,1%	43%	60%	100%
ITURAMA	ETE ITURAMA	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
JAÍBA	ETE JAIBA	93,3	14,1	4,4%	42%	95%	100%
JANAÚBA	ETE JANAUBA	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
JANUÁRIA	ETE DE JANUÁRIA	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
JOAÍMA	ETE JOAIMA	13,3	2,0	2,0%	42%	95%	100%
JOÃO PINHEIRO	ETE EXTREMA	6,7	0,8	2,7%	43%	60%	100%
JOSENÓPOLIS	ETE JOSENÓPOLIS	15,7	2,4	2,3%	42%	95%	100%
JUATUBA	ETE NOVA ESPERANÇA	54,7	6,5	1,6%	43%	60%	100%
JURAMENTO	ETE DE JURAMENTO	0,4	0,1	0,3%	42%	95%	100%
LAGOA DA PRATA	ETE LAGOA DA PRATA	19,4	2,3	2,9%	43%	60%	100%
LAGOA FORMOSA	ETE 2	97,4	9,8	0,1%	42%	57%	100%
LAGOA FORMOSA	ETE 3	97,4	9,8	0,1%	42%	57%	100%
LAGOA FORMOSA	ETE 1	155,9	15,7	0,1%	42%	57%	100%
LAGOA SANTA	ETE VILA MARIA	44,9	5,4	0,7%	43%	60%	100%
LAMBARI	ETE BAIRRO RECANTO DA SERRA	1,6	0,2	0,0%	43%	60%	100%

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
LAVRAS	ETE RIBEIRÃO VERMELHO	1.549,5	185,0	0,8%	43%	60%	100%
LAVRAS	ETE ÁGUA LIMPA	688,8	82,2	0,3%	43%	60%	100%
LIMEIRA DO OESTE	ETE LIMEIRA DO OESTE_SEDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
MALACACHETA	ETE MALACACHETA	194,0	29,3	0,7%	42%	95%	100%
MANTENA	ETE MANTENA	173,7	26,3	1,7%	42%	95%	100%
MATA VERDE	ETE MATA VERDE	130,7	19,8	0,8%	42%	95%	100%
MIRABELA	ETE MIRABELA	33,7	3,4	3,2%	42%	57%	100%
MOEMA	ETE MOEMA	2,4	0,3	2,8%	43%	60%	100%
MONTE CARMELO	ETE MONTE CARMELO	629,9	63,5	0,3%	42%	57%	100%
MONTES CLAROS	ETE MONTES CLAROS	0,4	0,1	2,2%	42%	95%	100%
MONTE SIÃO	ETE MONTE SIÃO	391,9	46,8	0,7%	43%	60%	100%
NOVA LIMA	JARDIM CANADÁ	0,7	0,1	0,4%	43%	60%	100%
NOVA LIMA	VALE DO SERENO	0,3	0,0	0,4%	43%	60%	100%
NOVA PORTEIRINHA	INTEGRADA COM ETE JANAÚBA (JANAÚBA)	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
NOVA SERRANA	ETE NOVA SERRANA	35,3	5,3	1,9%	42%	95%	100%
PARÁ DE MINAS	ETE PARÁ DE MINAS	92,5	14,0	2,4%	42%	95%	100%
PARAGUAÇU	ETE PARANGUAÇU	443,5	53,0	0,1%	43%	60%	100%
PASSOS	ETE ANTÔNIO UBIRAJARA	924,7	93,2	3,4%	42%	57%	100%
PEDRA AZUL	ETE PEDRA AZUL	4,8	0,7	2,0%	42%	95%	100%
PEDRALVA	ETE PEDRALVA	136,3	16,3	0,1%	43%	60%	100%
PIRAPORA	ETE PIRAPORA	652,9	43,6	3,6%	42%	54%	100%
POÇOS DE CALDAS	ETE BORTOLAN	10,6	1,3	0,0%	43%	60%	100%
POÇOS DE CALDAS	ETE 3'	112,6	13,4	0,1%	43%	60%	100%
PORTEIRINHA	ETE PORTEIRINHA_SEDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
POUSO ALEGRE	ETE CIDADE JARDIM	338,8	40,4	0,4%	43%	60%	100%
POUSO ALEGRE	ETE SAPUCAI MIRM	1.847,3	220,6	2,4%	43%	60%	100%
RESPLENDOR	ETE RESPLENDOR MARGEM ESQUERDA	138,2	20,9	0,5%	42%	95%	100%
RESPLENDOR	ETE RESPLENDOR MARGEM DIREITA	144,9	21,9	0,5%	42%	95%	100%
RIBEIRÃO DAS NEVES	ETE JUSTINÓPOLIS	21,3	2,5	0,7%	43%	60%	100%
RIO PARDO DE MINAS	ETE RIO PARDO	56,5	6,7	2,8%	43%	60%	100%
RUBELITA	ETE RUBELITA	0,4	0,1	1,2%	42%	95%	100%
SALINAS	ETE SALINAS	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
SANTA LUZIA	ETE BOM DESTINO NORTE	26,9	3,2	0,7%	43%	60%	100%
SANTA LUZIA	ETE BOM DESTINO SUL	26,4	3,1	0,7%	43%	60%	100%
SANTA LUZIA	ETE SANTA LUZIA	15,0	1,8	0,5%	43%	60%	100%
SANTANA DA VARGEM	ETE SANTANA DA VARGEM	132,1	15,8	0,0%	43%	60%	100%
SANTA RITA DO SAPUCAÍ	ETE SANTA RITA DO SAPUCAI	789,3	94,2	0,8%	43%	60%	100%
SANTO ANTÔNIO DO MONTE	ETE SANTO ANTONIO DO MONTE	6,5	0,8	0,9%	43%	60%	100%
SÃO JOÃO DA PONTE	ETE DE SÃO JOÃO DA PONTE	21,6	2,2	1,7%	42%	57%	100%
SÃO JOÃO DEL REI	ETE COLÔNIA MARÇAL	339,3	40,5	2,4%	43%	60%	100%
SÃO JOÃO DO PARAÍSO	ETE SÃO JOÃO DO PARAISO	35,8	4,3	2,4%	43%	60%	100%
SÃO JOAQUIM DE BICAS	ETE BICAS	7,8	0,9	0,3%	43%	60%	100%
SÃO JOSÉ DA LAPA	ETE INÁCIA DE CARVALHO	12,0	1,4	0,3%	43%	60%	100%
SÃO JOSÉ DA	ETE SÃO JOSÉ DA LAPA	50,0	6,0	0,9%	43%	60%	100%

Município	ETE	Massa seca do composto final (t)	Área fertilizada (ha)	Área fertilizada (%)	Demanda de N atendida (%)	Demanda de P atendida (%)	Demanda de K atendida (%)
LAPA							
SÃO TIAGO	ETE SÃO TIAGO	141,3	16,9	0,5%	43%	60%	100%
SARZEDO	ETE SARZEDO	25,4	3,0	1,5%	43%	60%	100%
SENHORA DE OLIVEIRA	ETE BOA VISTA (SENHORA DE OLIVEIRA)	86,3	10,3	0,3%	43%	60%	100%
SERRA DOS AIMORÉS	ETE - SERRA DOS AIMORÉS	54,6	8,3	5,4%	42%	95%	100%
SERRO	ETE SERRO	48,3	7,3	2,5%	42%	95%	100%
SETE LAGOAS	ETE AREIAS	77,0	7,8	0,6%	42%	57%	100%
SETE LAGOAS	ETE PRIMAVERA	27,2	2,7	0,2%	42%	57%	100%
SETE LAGOAS	ETE FLÓRIDA	15,0	1,5	0,1%	42%	57%	100%
TAIOBEIRAS	ETE TAIIOBEIRAS	210,7	21,2	2,2%	42%	57%	100%
TEÓFILO OTONI	ETE TEÓFILO OTONI	175,0	26,5	1,8%	42%	95%	100%
TRÊS MARIAS	ETE TRÊS MARIAS	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
TURMALINA	ETE TURMALINA	32,0	4,8	3,2%	42%	95%	100%
UBERABA	ETE FRANCISCO VELLUDO	442,0	38,6	3,3%	42%	55%	100%
UNIÃO DE MINAS	ETE UNIÃO DE MINAS	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
VARGINHA	ETE SÃO JOSÉ	1.660,9	198,3	0,5%	43%	60%	100%
VARGINHA	ETE WALITA	21,1	2,5	0,0%	43%	60%	100%
VARGINHA	ETE SANTANA	1.509,5	180,2	0,4%	43%	60%	100%
VÁRZEA DA PALMA	ETE VARZEA DA PALMA	157,5	10,5	0,6%	42%	54%	100%
VARZELÂNDIA	ETE VARZELANDIA_SEDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
VAZANTE	ETE DE VAZANTE_SEDE	0,0	0,0	0,0%	0%	0%	0%
VESPASIANO	ETE NOVA PAMPULHA	18,8	1,9	0,5%	42%	57%	100%