INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

TAMARA BARBOSA PASSOS

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO LODO DE ESGOTO APÓS PROCESSO DE BENEFICIAMENTO VISANDO SEUS FINS COMERCIAIS

Vitória
2018

TAMARA BARBOSA PASSOS

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO LODO DE ESGOTO APÓS PROCESSO DE BENEFICIAMENTO VISANDO SEUS FINS COMERCIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Márcia Regina Pereira Lima
Coorientador: Prof. Dr. Aurélio Azevedo Barreto Neto

Vitória

2018

(Biblioteca Nilo Peçanha do Instituto Federal do Espírito Santo)

P289a Passos, Tamara Barbosa.
Avaliação das características físicas e químicas do lodo de esgoto após o processo de beneficiamento visando seus fins comerciais / Tamara Barbosa Passos. – 2018.
97 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Marcia Regina Pereira Lima.
Coorientador: Aurélio Azevedo Barreto Neto.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Vitória, 2018.

1. Esgotos. 2. Lodo. 3. Lodo residual como fertilizante. 4. Engenharia Sanitária. I. Lima, Márcia Regina Pereira. II. Barreto Neto, Aurélio Azevedo. III. Instituto Federal do Espírito Santo. IV. Título.

CDD: 628.3

TAMARA BARBOSA PASSOS

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO LODO DE ESGOTO APÓS PROCESSO DE BENEFICIAMENTO VISANDO SEUS FINS COMERCIAIS

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

Aprovada em 28 de agosto de 2018

COMISSÃO EXAMINADORA

Profª. Drª. Márcia Regina Pereira Lima
Instituto Federal do Espirito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Aurélio Azevedo Barreto Neto
Instituto Federal do Espirito Santo
Coorientador

Profª. Drª. Jacqueline Rogéria Bringhenti
Instituto Federal do Espirito Santo
Membro interno

Profª. Drª. Mariângela Dutra de Oliveira
Instituto Federal do Espirito Santo
Membro externo

Dr. Aureliano Nogueira da Costa
Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper)
Membro externo

Aos meus pais, irmãos e esposo
companheiros em todas as horas.

À professora Márcia pelos ensinamentos,
apoio e parceria.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades.

Aos meus pais Adelson e Tercília por proporcionarem uma valiosa educação, meus irmãos André e Alexandre pela amizade e apoio e ao meu amor Leonardo pelo incentivo, companheirismo e pela paciência nos momentos difíceis.

Ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis e seus professores pelo conhecimento compartilhado.

Ao Ifes-campus Vitória pelas contribuições.

À equipe de química do Ifes-campus Vitória, em especial à Paola Santos, Sammea Oliveira, Carol Arpini e Verônica Faccini pela paciência, atenção e cuidado durante o período que estivemos juntas.

À equipe da microbiologia do Ifes-campus Vitória, em especial à professora Adriana Korres, à Sheila Ribeiro e à Brunela dos Santos pelo auxílio nos experimentos microbiológicos.

À professora Geórgia Serafim e à aluna Barbara Santana pelo suporte no experimento de granulometria.

À professora Poliana Daré pela disponibilidade e ajuda nas análises estatísticas.

Às alunas Amanda Fraga e Lorena Bertrande pela parceria e dedicação à pesquisa.

À professora Márcia Regina Pereira Lima pelo companheirismo, pelo exemplo pessoal e profissional, pelos conhecimentos compartilhados, por sua confiança e tranquilidade na orientação do meu trabalho, em especial nos momentos de dificuldades e incertezas.

Ao professor Aurélio Azevedo Barreto Neto pela coorientação e contribuição.

Aos amigos do mestrado que comigo compartilharam momentos de ansiedade e alegrias.

À Fapes pelo apoio financeiro.

RESUMO

Esta pesquisa buscou avaliar o comportamento das características físicas e químicas de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos domésticos, após ser submetido a processo de beneficiamento (moagem), além de determinar a curva da umidade de equilíbrio visando obter um produto comercial. O estudo foi dividido em seis etapas, sendo a primeira a caracterização microbiológica do lodo (biofertilizante bruto) visando classifica-lo de acordo com a Resolução 375/2006, a segunda foi a determinação das características físicas e químicas do biofertilizante bruto. A terceira etapa consistiu no beneficiamento (moagem) do biofertilizante bruto obtendo quatro faixas granulométricas de acordo com a IN 25/2009. Na quarta determinou-se as características químicas e físicas do biofertizante beneficiado. Na quinta os dados obtidos na segunda e na quarta etapas foram tratados estatisticamente, onde foi possível avaliar as alterações sofridas pelo biofertilizante bruto após o seu beneficiamento e identificação de possível faixa granulométrica ideal para sua comercialização. E por fim foi determinada a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado. O biofertilizante bruto foi classificado como classe A de acordo com Resolução 375/2006 e trata-se de um material com elevado nível de estabilização e com características ácidas. O beneficiamento interferiu nos valores da umidade contida no material. Comparando os resultados de porosidade do biofertilizante beneficiado, foi identificado que quanto maior a faixa granulométrica, maior será sua capacidade de absorver água. Em umidades relativas abaixo de 75,3% a absorção será maior em faixas granulometricas maiores, já em ambientes onde a umidade relativa é maior, maior também será a absorção, porém a sua estabilização será mais lenta. A curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado se aproxima da curva de umidade de equilíbrio do papel jornal o que mostra um indicativo para possíveis materiais para embalagens. Devido a pouca variação dos teores de sólidos totais, a rápida absorção do biofertilizante beneficiado na faixa granulométrica granulado e a inviabilidade de utilização na faixa pó devido sua pulverulência, é possível dizer que para ambientes com umidade relativa em torno de 75,3% as faixas granulométricas ideais seriam farelado e farelado grosso.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Biofertilizantes. Beneficiamento. comercialização.

ABSTRACT

This paper aimed to evaluate the behavior of the physical and chemical properties of sludge produced in domestic sewage treatment plants when subjected to milling, as well as to determine its equilibrium moisture curve, in order to assess the material optimum properties for its beneficial uses, from a commercial perspective. The study was divided in six stages, the first being the microbiological characterization of the sludge (raw biofertilizer) for classification according to Resolution 375/2006; the second, the determination of the physical and chemical properties of the raw biofertilizer. The third stage consisted in the processing (milling) of the raw biofertilizer obtaining four grain size ranges according to IN 25/2009. In the fourth stage the chemical and physical properties of the processed biofertilizer were determined. In the fifth, the data obtained in the second and fourth stages were statistically treated, and it was possible to evaluate the changes undergone by the raw biofertilizer after its processing and identify the optimum grain size range for its commercialization. Finally, the equilibrium moisture curve of the processed biofertilizer was determined. When comparing the raw with the processed biofertilizer, it was found a significant variance in the total solids content only. For the grain size ranges of the processed biofertilizer, the results showed that, although they were statistically different, they did not show regularity in the total solids content. On the porosity of the processed biofertilizer, however, it was identified that the larger the grain size range, the greater its capacity to absorb water. In relative humidity below 75.3%, the absorption will be greater in larger grain size ranges. In environments where the relative humidity is higher, the absorption will be greater as well, but its stabilization will be slower. The equilibrium moisture curve of the processed biofertilizer approaches the equilibrium moisture curve of newsprint, which may be a reference for packaging materials. Due to the low variation of the total solids content, the fast absorption of the processed biofertilizer in the granulated grain size range and the unviable use of it in the powder range due to its pulverulence, it is possible to say that, for environments with relative humidity around 75.3%, the optimum grain size ranges would be flake and coarse flake.

Keywords: Sewage sludge. Biofertilizer. Processing. Commercialization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do lodo de esgoto conforme o teor de sólidos 25
Figura 2 – Moinho de martelos 41
Figura 3 – Moinho de rolos 41
Figura 4 – Moinho de disco 42
Figura 5 – Moinho de bolas 43
Figura 6 – Teor de umidade de equilíbrio em alguns materiais a 25ºC 45
Figura 7 – Localização geográfica da ETE Ulisses Guimarães 49
Figura 8 – Fluxograma do processo de tratamento de esgoto na ETE Ulisses Guimarães 51
Figura 9 – Fluxograma do desenvolvimento experimental da pesquisa 52
Figura 10 – Quarteamento da amostra 55
Figura 11 – Frações da amostra 55
Figura 12 – Pesagem do biofertilizante 59
Figura 13 – Secagem das amostras em estufa 60
Figura 14 – Transferência do biofertilizante para balões volumétricos 60
Figura 15 – Adição de álcool etílico 61
Figura 16 – Quarteamento do biofertilizante 62
Figura 17 – Soquete utilizado no destorroamento do biofertilizante 63
Figura 18 – Biofertilizante sendo peneirado em agitador mecânico 63
Figura 19 – Faixas granulométricas obtidas após o beneficiamento 64
Figura 20 – Conjuntos de câmaras de umidade com amostras do biofertilizante 65
Figura 21 – Cápsulas na mufla 67
Figura 22 – Biofertilizante sendo seco em estufa 68
Figura 23 – Colocação do sal no dessecador 69
Figura 24 – Preparação das soluções 70
Figura 25 – Câmaras de umidade com o biofertilizante 70
Figura 26 – Destinação final dos sais utilizados 71
Figura 27 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 75,3% de umidade . 79
Figura 28 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 32,8% de umidade ... 80

Figura 29 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 57,6% de umidade ... 81
Figura 30 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 84,3% de umidade ... 82
Figura 31 – Curvas de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado 84
Figura 32 – Comparação entre a curva da umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado e de outros materiais..... 85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resíduos gerados em cada nível do tratamento de esgoto doméstico 19
Quadro 2 – Interferência de fatores ambientais na viabilidade de ovos de helmintos e na sobrevivência de microrganismos presentes no lodo de esgoto. 23
Quadro 3 – Disposição final do lodo 28
Quadro 4 – Forças atuantes na redução de partículas de acordo com o tipo de moinho utilizado 39
Quadro 5 – Matriz da pesquisa 54
Quadro 6 – Conjuntos de peneiras utilizados para obtenção de cada faixa granulométrica 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consistência do lodo de esgoto conforme o teor de umidade 25
Tabela 2 – Faixas de densidades de diversos tipos de lodo 27
Tabela 3 – Descrição das concentrações máximas permitidas de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto ou produto derivado 32
Tabela 4 – Descrição das concentrações máximas permitidas de agentes patogênicos em lodos de esgoto ou produto derivado 32
Tabela 5 – Especificação granulométrica quanto a natureza física do produto para fins agrícolas 35
Tabela 6 – Preparação de soluções saturadas de sais a 25°C 48
Tabela 7 – Umidade relativa dos sais que serão utilizados no experimento 66
Tabela 8 – Quantidades para a preparação das soluções 69
Tabela 9 – Concentrações de substâncias inorgânicas detectadas no biofertilizante bruto 73
Tabela 10 – Características físicas e químicas do biofertilizante bruto 74
Tabela 11 – Características físicas e químicas do biofertilizante beneficiado .. 75
Tabela 12 – Comparação entre as médias de ST e densidade entre o biofertilizante bruto e as faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado pelo teste de Dunnett 76
Tabela 13 – Comparação entre as médias de ST, porosidade e densidade entre as faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado pelo teste de Tukey 78
Tabela 14 – Resultados dos sólidos totais e umidades do biofertilizante beneficiado após sua estabilização 83

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APA – Área de Preservação Ambiental

APM – Área de Preservação Marinha

APP – Área de Preservação Permanente

Cesan – Companhia Espírito Santense de Saneamento

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

DS – Decantador secundário

FBAS - Filtro Biológico Aerado Submerso

Ifes – Instituto Federal do Espírito Santo

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NMP – Número Mais Provável

pH – Potencial Hidrogeniônico

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

SF – Sólidos Fixos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

UASB – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 OBJETIVOS 17
2.1 OBJETIVO GERAL 17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17
3 REVISÃO DE LITERATURA 18
3.1 GERAÇÃO, TRATAMENTO E USOS BENÉFICOS DO LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO 18
3.1.1 Geração do lodo 19
3.1.2 Tratamento do lodo 20
3.1.3 Gestão do lodo 24
3.1.4 Usos benéficos do lodo 27
3.2 ASPECTOS LEGAIS DO LODO 30
3.2.1 Resolução n°375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 31
3.2.2 Outras legislações 34
3.3 COMERCIALIZAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE BIOFERTILIZANTE 36
3.3.1 Aspectos comerciais de biofertilizantes 36
3.3.2 Alternativa de beneficiamento - Moagem 38
3.3.3 Método de avaliação do comportamento do teor de umidade de produtos em diferentes ambientes – Curva de umidade de equilíbrio 44
4 METODOLOGIA 49
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 49
4.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL 51
4.2.1 Determinação dos ST, SF, SV, densidade e umidade 55
4.2.2 Determinação da porosidade do biofertilizante beneficiado 58
4.2.3 Determinação das faixas granulométricas - Beneficiamento 62
4.2.4 Determinação da curva de umidade de equilíbrio 64
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS 71
5 RESULTADO E DISCUSSÕES 73
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOFERTILIZANTE BRUTO 73

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO BIOFERTILIZANTE BENEFICIADO 75
5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS 75
5.4 COMPORTAMENTO DO BIOFERTILIZANTE BENEFICIADO NAS CÂMARAS DE UMIDADE..... 79
5.5 CURVA DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DO BIOFERTILIZANTE BENEFICIADO 82
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES..... 86
REFERÊNCIAS 88
ANEXO A - Teor de ST do biofertilizante beneficiado em cada câmara de umidade com o decorrer do tempo 96

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios enfrentados no setor de saneamento é a destinação adequada dos seus resíduos. No Brasil, a disposição em aterros sanitários é utilizada pelas companhias de saneamento como destinação final do lodo de esgoto. Segundo Kelessidis e Stasinakis (2012) a disposição em aterros sanitários é utilizada pela maioria dos países que compõem a União Europeia. Porém Cieslik, Namiesnik e Konieczka (2015) demonstraram que nesses países essa destinação final está sendo substituída por métodos que levam a reciclagem do lodo.

O aproveitamento das características benéficas desse material apresenta-se como uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável ao invés do seu envio para os aterros (KACPRZAK et al., 2017).

Autores como Trigueiro e Guerrini (2014) e Lobo et al. (2013), já desenvolveram estudos que comprovam a eficácia da utilização do lodo de esgoto para fins agrícolas, seja como substrato, fertilizante ou composto. Quando o lodo é tratado e beneficiado, podendo agora ser definido como biofertilizante, obtêm características permissíveis para o uso agrícola de maneira ambientalmente segura.

Isso se deve ao fato do lodo possuir nutrientes que atuam como condicionadores do solo, melhorando sua estrutura. Para Coscione et al. (2014) o principal benefício da reciclagem do lodo de esgoto é a substituição do uso de adubos químicos.

A utilização de lodo de esgoto como biofertilizante e condicionador de solos, permite ganhos ao produtor, por meio do aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais, bem como ganhos para os geradores de lodo, pela efetivação de métodos adequados e mais econômicos de destinação final desse resíduo (BONINI et al., 2015).

A gestão do lodo como biofertilizante, além dos benefícios ambientais já comprovados, representa um mercado com boas perspectivas nas áreas de projeto, planejamento e gestão de serviços, equipamentos e insumos, sendo assim uma importante ferramenta para o desenvolvimento sustentável.

Um exemplo é o produto com o rótulo de Milorganite, que é um lodo higienizado vendido pela Milwaukee Sewage Commision (EUA) e tem sido amplamente utilizado

como biofertilizante na América do Norte desde 1927 (MILORGANITE, 2018)[1]. No Brasil, a empresa Tera Ambiental produz a partir da compostagem de resíduos orgânicos, entre eles o lodo de esgoto, o fertilizante TeraFértil, indicado para diversas culturas como citros, eucalipto, cana-de-açúcar, flores, café, frutíferas, árvores, flores e gramados (TERA AMBIENTAL, 2018)[2].

Porém para a obtenção do biofertilizante é necessário tratar tecnicamente o lodo de esgoto para então gerar um produto mais estável, com menor volume, facilitando seu manuseio e, consequentemente, reduzindo os custos nas etapas subsequentes.

O tratamento se dá por meio de processos físicos, químicos e biológicos. Segundo Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003), usualmente, o tratamento do lodo inclui uma ou mais das seguintes etapas: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização.

No Brasil, a disposição final do lodo de esgoto na agricultura segue a Resolução 375 (BRASIL, 2006) que define critérios, procedimentos e providências para o uso agrícola de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos sanitários, bem como seus produtos derivados. Outra legislação importante, uma vez que o uso agrícola de lodo de esgoto envolve a adição de nutrientes e matéria orgânica ao solo é a Instrução Normativa 25 (BRASIL, 2009) que regulamenta os fertilizantes orgânicos.

Considerando as características que um biofertilizante deve apresentar e que estão estabelecidas pela Instrução Normativa 25 (BRASIL, 2009), destaca-se a granulometria. Submeter o biofertilizante (lodo de esgoto) a um processo de moagem para estabelecer faixas granulométricas, atribui a esse produto uma conotação comercial, equiparando-o a outros produtos agrícolas que já contemplam esta condição e estão disponíveis no mercado. Porém é necessário avaliar as características químicas e físicas do biofertilizante após esse processo e as microbiológicas quando necessário.

---

[1] MILORGANITE. Disponível em: <www.milorganite.com>. Acesso em: 07 jul. 2018.

[2] TERA AMBIENTAL. Disponível em: <www.teraambiental.com.br/fertilizante-organico-terafertil>. Acesso em: 07 jul. 2018.

Outro fator importante para a definição da qualidade ideal para comercialização de biofertilizantes é a curva de umidade de equilíbrio.

Segundo David (2002) uma das vantagens da determinação da curva de umidade de equilíbrio é a possível identificação de melhores materiais para a embalagem, validade e processo de estocagem do biofertilizante.

Assim, essa pesquisa é caracterizada por avaliar o comportamento das características físicas e químicas de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos domésticos, quando submetido a beneficiamento (moagem) além de determinar a curva da umidade de equilíbrio visando obter um produto comercial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as características físicas e químicas do lodo de esgoto (biofertilizante bruto) após ser submetido a processo de beneficiamento e determinar a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado visando obter um produto comercial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características físicas, químicas e microbiológicas do biofertilizante bruto.

- Submeter o biofertilizante bruto a processo de beneficiamento, para a obtenção de quatro faixas granulométricas diferentes pó, farelado, granulado e farelado grosso.

- Determinar as características físicas e químicas de cada faixa granulométrica do biofertilizante beneficiado.

- Comparar as características físicas e químicas do biofertilizante bruto com as do biofertilizante beneficiado.

- Determinar a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado em cada faixa granulométrica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 GERAÇÃO, TRATAMENTO E USOS BENÉFICOS DO LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Os esgotos de origem doméstica são basicamente constituídos por água, sólidos orgânicos e minerais. Sua composição média é de 99,9% de água e 0,1% de sólidos. Do total de sólidos, cerca de 70% são constituídos de materiais orgânicos como proteínas, carboidratos e gorduras e os 30% restantes são constituídos de materiais inorgânicos como areia, sais e metais (VON SPERLING, 2005).

De uma maneira geral, o tratamento de esgotos tem por objetivo separar os materiais sólidos e reduzir a carga de matéria orgânica presente, através de processos físicos, químicos e biológicos. Segundo Jordão e Pessôa (2009) este pode ser dividido em duas etapas: da fase líquida, na qual remove-se matéria orgânica e minerais suspensos e dissolvidos no esgoto; e da fase sólida onde esses materiais são estabilizados e concentrados. Como resultado final do tratamento obtém-se o efluente líquido, o lodo e gases.

O efluente líquido apresenta reduzidos teores de materiais poluentes e são lançados em corpos d’água de acordo com a carga remanescente e a classe do corpo receptor. Já o lodo que contém uma grande quantidade de matéria orgânica precisa ainda ser tratado antes de sua destinação final (VON SPERLING, 2005).

Atualmente a maior parte do lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos (ETE) é destinada aos aterros sanitários. Entretanto, o aproveitamento das características benéficas desse material apresenta-se como uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável ao invés do seu envio para os aterros (KACPRZAK et al., 2017).

Para isso é necessário tratar tecnicamente o lodo sendo que os processos de tratamento visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de água, a fim de se obter um material sólido e estável, que não constitua risco à saúde e que possa ser manipulado e transportado com facilidade e baixo custo (SANTOS et al., 2016).

3.1.1 Geração do lodo

O tratamento de esgoto doméstico possui quatro níveis básicos: preliminar, primário, secundário e terciário. Em cada um desses níveis são gerados resíduos que necessitam de tratamento e disposição final adequada. Os níveis de tratamento de esgoto doméstico e seus respectivos resíduos podem ser observados no quadro1.

Quadro 1 – Resíduos gerados em cada nível do tratamento de esgoto doméstico

Nível do tratamento	Resíduo gerado
Preliminar	Resíduos grosseiros (gradeamento), areia (desarenador) e escuma oleosa.
Primário	Lodo primário, lodo químico (quando possui etapa físico-química) e escuma.
Secundário	Lodo biológico
Terciário	Lodo químico

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005); Jordão e Pessôa (2009)

Os resíduos grosseiros e a areia são gerados no nível preliminar devido o gradeamento e o desarenador. No gradeamento os sólidos com dimensões maiores que o espaçamento entre as barras ficam retidos seguindo apenas a fase líquida para a próxima etapa do tratamento. No desarenador passam por sedimentação e se depositam no fundo do tanque. Posteriormente, esses resíduos são recolhidos e dispostos em aterros sanitários (VON SPERLING, 2005).

A geração do lodo nos sistemas de tratamento do esgoto ocorre, essencialmente, por causa da remoção da matéria orgânica, sendo mais significativa no nível primário e no secundário.

O lodo primário, juntamente com a escuma, é gerado na primeira etapa do tratamento de esgoto doméstico (nível primário). Essa etapa tem como objetivo remover os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes. Constitui-se em um conjunto de reservatórios ou tanques onde o esgoto flui vagarosamente forçando os sólidos que possuem maior densidade do que a massa líquida se depositem no fundo do tanque (VON SPERLING, 2005).

O lodo químico é produzido quando é necessária a etapa físico-química, na qual são adicionados produtos químicos para melhorar o desempenho dos decantadores primários ou para o polimento do efluente secundário (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

Tanto no nível preliminar como no primário os processos na maioria das vezes são físicos e mecânicos. Já no nível secundário, a remoção da matéria orgânica (dissolvida e em suspensão) ocorre por intermédio do contato efetivo entre micro-organismos e o material orgânico contido nos esgotos. Os micro-organismos se nutrem dessa matéria orgânica convertendo-a em gás carbônico, água e material celular. Nesse é gerado o lodo biológico, já o lodo misto é a mistura do lodo primário com o lodo biológico.

O nível secundário é feito em condições aeróbicas ou anaeróbicas. Em condições aeróbicas (com a presença de oxigênio) parte da matéria orgânica contida no esgoto se transforma em lodo, parte é oxidada e outra parcela não removida fica no efluente final. O lodo que é produzido nessas condições é altamente putrescível, necessitando passar por um processo de estabilização (PEDROZA et al., 2010).

Já nos tratamentos anaeróbicos (sem a presença de oxigênio) parte da matéria orgânica vai para o lodo, parte é digerida, virando metano e outros gases e outra não é removida e fica no efluente final.

As ETE podem contemplar ou não as etapas citadas acima, sendo que a implantação dessas varia de acordo com o projeto. Esse leva em consideração o tipo de afluente, área de implantação, recursos disponíveis entre outros aspectos para sua elaboração.

3.1.2 Tratamento do lodo

Os diferentes processos de tratamento do esgoto geram lodos diversificados com características distintas que devem ser observadas para melhor escolha dos processos de tratamento e disposição final.

Autores como Batista (2015) e Fernandes et al. (2001) destacam a importância da gestão do lodo pois essa orienta na aplicação de melhores práticas de manejo visando alcançar a redução do volume de lodo gerado e adequa as características

do lodo para as etapas de processamento as quais será submetido, sempre vislumbrando a alternativa de disposição final a ser aplicada.

O uso do lodo de esgoto, sem tratamento, é uma fonte de riscos à saúde pública e ao meio ambiente. São proliferadores de vetores e organismos nocivos à saúde. Além disto, podem conter metais pesados, compostos orgânicos e patógenos em concentrações que são nocivas à saúde e ao meio ambiente (BATISTA, 2015).

O principal objetivo do tratamento do lodo de esgoto é gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, consequentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes. O tratamento se dá através de processos físicos, químicos e biológicos que visam reduzir a umidade do lodo, sendo que a capacidade de desaguamento varia de acordo com a forma que a água está ligada às partículas do lodo.

Diferentes tipos de forças intermoleculares são responsáveis pela ligação da água aos sólidos nos lodos de esgoto. Segundo Gonçalves, Luduvice e von Sperling (2001) essas ligações podem ser distribuídas em quatro classes, sendo elas, água livre, água adsorvida, água capilar e água celular.

A remoção de cada tipo de água é realizada de maneira específica. A água livre é removida por simples ação gravitacional ou por flotação. A água adsorvida e a capilar exigem forças maiores como adição de produtos químicos (floculantes) ou força mecânica (filtros prensas e centrífugas). Já a água celular só é removida por força térmica (GONÇALVES, LUDUVICE E VON SPERLING, 2001).

Segundo Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) usualmente, o tratamento do lodo após a sua geração inclui uma ou mais das seguintes etapas: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização.

3.1.2.1 Adensamento do lodo

O adensamento é um processo físico que visa remover a água ligada ao lodo de forma livre por meio de ação gravitacional ou por flotação, produzindo lodos mais fluidos com teor de sólidos de aproximadamente 5%. Geralmente são utilizados equipamentos como adensadores por gravidade e flotadores por ar dissolvido.

Uma das principais funções do adensamento é reduzir a umidade do lodo, facilitando as etapas subsequentes do tratamento, como volume dos digestores e tamanho de

bombas. O volume do lodo chega a reduzir cerca de 60% em relação ao volume inicial (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2001).

3.1.2.2 Estabilização do lodo

Os processos de estabilização foram desenvolvidos com o objetivo de estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo e diminuir a concentração de patógenos.

Segundo Luduvice (2001) os processos de estabilização podem ser divididos em:

- Estabilização biológica (digestão anaeróbica e aeróbica) – utiliza micro-organismos;
- Estabilização química – adição de produtos químicos.
- Estabilização térmica – adição de calor.

3.1.2.3 Condicionamento do lodo

Visa a preparação do lodo, por intermédio da adição de produtos químicos, para aumentar sua aptidão ao desaguamento e melhorar a captura de sólidos nos sistemas de desaguamento do lodo (VON SPERLNG, 2005).

3.1.2.4 Desaguamento do lodo

O objetivo dessa fase é remover a água adsorvida e capilar reduzindo ainda mais o volume e produzindo lodo com comportamento próximo ao dos sólidos, chegando a teores superiores a 30% de sólidos. Com a remoção das águas livre, adsorvida e capilar o lodo chega a redução de 90 a 95% do seu volume original (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2001)

Os processos de desaguamento podem ser divididos em métodos de secagem natural e mecânicos. O método de secagem natural mais comum é o leito de secagem. Já entre os processos mecanizados utilizam-se centrífugas, prensas desaguadoras e filtros prensas.

Luduvice (2001) destacam como benefícios do desaguamento a redução do custo de transporte para o local de disposição final, a melhoria nas condições de manejo do lodo, o aumento do poder calorífico do lodo e a redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura.

3.1.2.5 Higienização do lodo

Devido a grande quantidade de matéria orgânica presente no lodo de esgoto, este torna-se um ambiente propício para o crescimento de agentes patogênicos. A patogenicidade do lodo de esgoto pode ser reduzida através dos processos de estabilização e tratamento, entretanto muitos parasitas (principalmente seus ovos) são pouco afetados por processo de digestão convencional, necessitando do processo de higienização.

Dentre os patógenos presentes no lodo, os mais importantes são os streptococos, *Salmonella* sp., *Shingella* sp., larvas e ovos de helmintos, cistos de protozoários e enterovírus e rotavírus (ANDREOLI; PEGORINI, 1998).

O quadro 2 mostra a interferência desses fatores na sobrevivência de microrganismos no lodo de esgoto.

Quadro 2 – Interferência de fatores ambientais na viabilidade de ovos de helmintos e na sobrevivência de microrganismos presentes no lodo de esgoto.

Fator Ambiental	Característica
Luz solar	Todos os organismos são sensíveis a irradiação ultravioleta a 265nm.
Temperatura	Temperatura ideal é de 18 a 28°C. Bactérias podem se reproduzir no verão. Para inviabilizar ovos de helmintos deve-se atingir temperaturas acima de 65°C por mais de cinco minutos.
Umidade	Muitos microrganismos são sensíveis à dessecação e a umidade ideal é acima de 70%.
pH	Valores extremos de pH desfavorecem a sobrevivência de organismos patogênicos.

Fonte: Adaptado de Faria (2015).

Alguns métodos de higienização empregados para reduzir a presença de patógenos a níveis aceitáveis são: digestão anaeróbia, estabilização química e secagem térmica.

Pinto (2001) diz que é importante salientar que o processo de higienização não é uma desinfecção, pois não são removidos todos os patógenos presentes no lodo. Esse processo busca reduzir a patogenicidade a níveis que não venham a causar risco à saúde da população de acordo com as exigências para cada utilização.

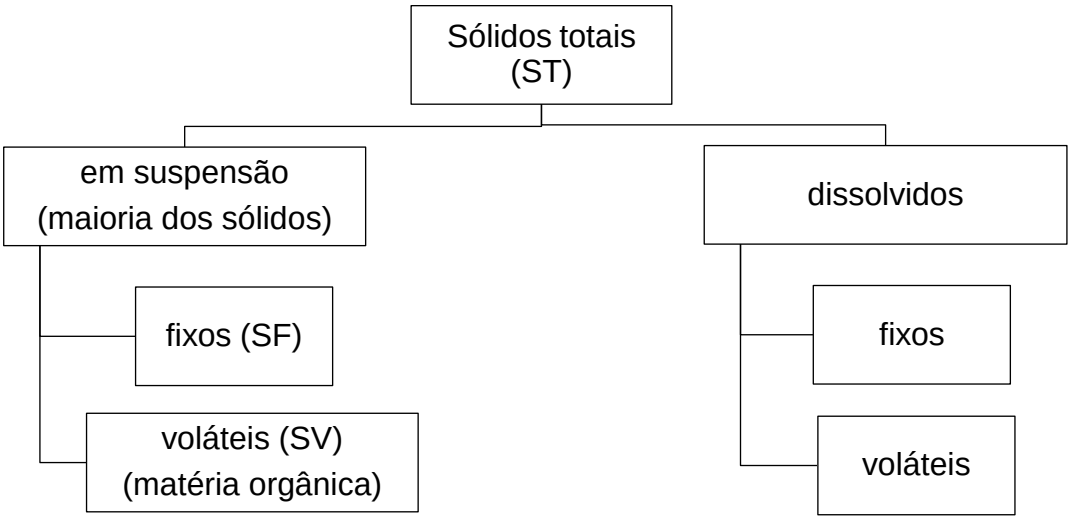
Autores como Bittencourt et al. (2013) e Lima (2009) demonstraram em seus estudos processos de higienização do lodo eficazes para a diminuição da sua patogenicidade, sendo diminuída a níveis aceitáveis pela Resolução 375 (BRASIL, 2006).

3.1.3 Gestão do lodo

Os principais fatores que influenciam na escolha do tratamento e disposição final do lodo são as quantidades de matéria orgânica, nutrientes, organismos patogênicos e metais pesados contidas no lodo. Para a quantificação desses fatores o entendimento de certas relações como a relação entre teor de sólidos e de umidade; relação entre sólidos totais, voláteis e fixos; e a densidade do lodo torna-se essencial.

O lodo de esgoto é constituído por sólidos e água, sendo que os sólidos totais são compostos pelos sólidos em suspensão e pelos dissolvidos. Segundo Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) a maioria dos sólidos que compõe o lodo está em suspensão (de maneira fixa ou volátil) sendo que a matéria orgânica que constitui o lodo de esgoto encontra-se na forma volátil. Portanto, a representação da quantidade de matéria orgânica contidas no lodo é expressa pela relação entre sólidos voláteis/sólidos totais, em porcentagem (%). A figura 1 mostra um fluxograma que descreve a composição do lodo de esgoto conforme os sólidos que nele contém.

Figura 1 – Composição do lodo de esgoto conforme o teor de sólidos



Fonte: adaptado de von Sperling e Gonçalves (2001).

Von Sperling e Gonçalves (2001) descrevem algumas indicações gerais de consistência do lodo de acordo com seu teor de umidade que podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1 – Consistência do lodo de esgoto conforme o teor de umidade

Teor de sólidos totais (%)	Umidade em base úmida (%)	Consistência do lodo
0 a 25	75 a 100	Lodo fluido
25 a 35	65 a 75	Torta semi-sólida
35 a 60	40 a 65	Sólido duro
60 a 85	15 a 40	Lodo em grânulos
85 a 100	0 a 15	Lodo desintegrado em pó fino

Fonte: von Sperling e Gonçalves (2001).

A densidade de sólidos no lodo depende da distribuição relativa entre a água e os sólidos fixos e voláteis contidos nele. Visto que a densidade das partículas de sólidos fixos situa-se em torno de 2,5 enquanto a densidade dos sólidos voláteis é próxima a 1 e a densidade da água é 1, podemos determinar a densidade de sólidos no lodo pela relação abaixo (TCHOBANOGLOUS, BURTON E STENSEL, 2003).

$$DSL = \frac{1}{\frac{\frac{SF}{ST}}{2,5} + \frac{\frac{SV}{ST}}{1}} \quad (1)$$

Onde:

DSL: Densidade de sólidos no lodo

SF: Sólidos Fixos

SV: Sólidos Voláteis

ST: Sólidos Totais

Segundo Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) a partir da densidade de sólidos no lodo é possível calcular a densidade do lodo (água e sólidos) pela equação 2:

$$\frac{1}{DL} = \frac{ST}{DSL} + \frac{UM}{DA} \quad (2)$$

Onde:

DL: Densidade do lodo

ST: Sólidos Totais

DSL: Densidade de sólidos no lodo

UM: Umidade

DA: Densidade da água

A tabela 2 mostra algumas faixas de densidade de diferentes tipos de lodo.

Tabela 2 – Faixas de densidades de diversos tipos de lodo

Tipo de lodo	Relação SV/ST	Densidade de sólidos
Lodo primário	0,75 – 0,80	1,14 – 1,18
Lodo secundário anaeróbio	0,55 – 0,60	1,32 – 1,37
Lodo secundário aeróbio	0,75 – 0,80	1,14 – 1,18
Lodo adensado	0,75 – 0,80	1,14 – 1,18
Lodo digerido	0,60 – 0,65	1,27 – 1,32
Lodo desidratado	0,60 – 0,65	1,27 – 1,32

Fonte: von Sperling e Gonçalves (2001).

Com relação aos nutrientes, o lodo de esgoto apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo, outros macros e micronutrientes (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Segundo autores como Jordão e Pêssoa (2009) e Lara, Andreoli e Pegorini (2001) a quantidade de nutrientes no lodo é menor que a encontrada nos fertilizantes comerciais, porém podem ser incorporado à esse, substâncias que aumentem seu poder nutricional, como a cal. Podendo também ser adequado para cada situação de acordo com a necessidade do solo onde será aplicado.

3.1.4 Usos benéficos do lodo

O quadro 3 mostra as principais alternativas utilizadas como disposição final do lodo de esgoto.

Quadro 3 – Disposição final do lodo

Alternativa	Descrição
Incineração	Tem como principal vantagem a redução do volume de resíduos, que chega a ser de aproximadamente 10 a 20% do volume total, além do aproveitamento energético devido ao processo de cogeração de energia.
Aterro sanitário	Geralmente utilizada para atender os objetivos de absorção dos lodos com características inadequadas ao uso benéfico, como a absorção de volumes excedentes à demanda, disposição de cinzas de incineração e garantia de disposição final adequada independente de quaisquer fatores. Entretanto, na disposição do lodo em aterro não há preocupação em recicle-lo ou se recuperar nutrientes.
Conversão em óleo combustível	É um processo termoquímico que vem sendo aplicado a diversas biomassas de origem urbana, industrial e agrícola, procurando-se por meio da conversão térmica transformar o lodo em produtos de potencial valor comercial.
“Landfarming” – disposição superficial no solo	Pode ser considerado também um sistema de tratamento de resíduos. Nesse caso, uma área é destinada exclusivamente para este fim. Não há a utilização dos nutrientes e da matéria orgânica do lodo para fins produtivos. O objetivo é apenas a degradação do lodo pelos microrganismos presentes no perfil arável e a retenção de metais na camada superficial do solo.
Recuperação de área degradada	A aplicação de lodos em áreas degradadas traz benefícios às propriedades físicas do solo, desempenhando o papel de condicionador do solo, melhorando a formação de agregados, a infiltração, a retenção de água e a aeração do solo.
Reciclagem agrícola	Disposição do lodo em solos agrícolas em associação ao plantio de culturas. Traz diversos benefícios tais como, a redução de custos, a conservação do ambiente e das características físicas e químicas do solo.

Fonte: Adaptado de Rigo et al. (2014)

Autores como Bittencourt et al. (2014), Rizzardini e Goi (2014) e Albuquerque et al. (2015) relatam os benefícios ao desenvolvimento vegetal e à conservação do solo e da água devido o uso do lodo de esgoto na agricultura. Bittencourt et al. (2014) diz que a aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas, quando realizada com controle sanitário, agronômico e ambiental, proporciona um destino final adequado, viabilizado devido às melhorias promovidas no solo, ao aumento do rendimento das culturas e à redução dos custos de produção.

Albuquerque et al. (2015), Bonini et al. (2015), Moretti et al. (2015), e Santos et al. (2014) já desenvolveram estudos que comprovam a eficácia da utilização do lodo de esgoto para fins agrícolas, seja como substrato, fertilizante ou composto. Segundo Barbosa e Filho (2006), quando o lodo é tratado e processado, obtêm características permissíveis para o uso agrícola de maneira ambientalmente segura.

No mercado existem produtos que utilizam o lodo de esgoto como biofertilizantes, como o Milorganite, que é um lodo higienizado vendido pela Milwaukee Sewage Commision (EUA) e tem sido amplamente utilizado como biofertilizante na América do Norte desde 1927 (MILORGANITE, 2018). No Brasil, a empresa Tera Ambiental produz a partir da compostagem de resíduos orgânicos, entre eles o lodo de esgoto, o fertilizante TeraFértil, indicado para diversas culturas como citros, eucalipto, cana-de-açúcar, flores, café, frutíferas, árvores, flores e gramados (TERA AMBIENTAL, 2018).

Isso se deve ao fato do lodo possuir nutrientes que são ricos em matéria orgânica que atuam como condicionadores do solo, melhorando sua estrutura. Para Coscione et al. (2014) a reciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes presentes no lodo é o principal benefício para o ambiente, podendo substituir parcialmente o uso de adubos químicos.

A utilização de lodo de esgoto como biofertilizante e condicionador de solos, permite ganhos ao produtor, por meio do aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais; bem como ganhos para os geradores de lodo, pela efetivação de métodos adequados e mais econômicos de disposição final desse resíduo (BONINI et al., 2015).

A aplicação do lodo de esgoto em solo degradado também é uma alternativa de disposição final desse resíduo. Segundo Lobo et al. (2013) alguns impactos positivos

dessa disposição nas características físicas no solo são: a estruturação e estabilização dos agregados, a diminuição da plasticidade, o aumento na capacidade de retenção de água, a granularização e a maior resistência aos agregados. Já a influência nas características químicas do solo são: a disponibilização de macro e micronutrientes, a alteração favorável no índice pH e a complexação/quelatação de elementos químicos tóxicos.

A gestão do lodo de esgoto além dos benefícios ambientais e sociais representa um mercado com boas perspectivas nas áreas de projeto, planejamento e gestão de serviços, equipamentos e insumos, sendo assim uma importante ferramenta para o desenvolvimento sustentável.

3.2 ASPECTOS LEGAIS DO LODO

Devido à crescente geração do lodo de esgoto surge à necessidade de legislações específicas para sua classificação quanto à periculosidade, tratamento e disposição final desse resíduo.

A lei 12.305 (BRASIL, 2010) institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos.

Como ferramenta de gerenciamento a PNRS (BRASIL, 2010) exige a formulação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, dos Planos Estaduais, dos Planos Municipais, com a possibilidade de serem elaborados enquanto planos intermunicipais, microrregionais, de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas, além dos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de alguns geradores específicos. Como o lodo de esgoto é um resíduo gerado em ETE, deve ser considerado na elaboração dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos, surgindo à obrigatoriedade de destiná-lo de maneira adequada.

Considerando as particularidades do lodo gerado em ETE, em 2006 foi publicada a Resolução 375 (BRASIL, 2006), sendo um documento importante para as atividades e possibilidades de gerenciamento do material. No entanto, considerando as exigências desta resolução e a consequente mudança exigida no gerenciamento do lodo, foi constatada a necessidade de revisão da legislação, para melhorias das diretrizes apresentadas.

Atualmente, alguns pesquisadores e empresas de saneamento estão discutindo propostas para alteração dessa Resolução.

3.2.1 Resolução n°375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)

A Resolução 375 (BRASIL, 2006), em vigor no país, define critérios, procedimentos e providências para o uso agrícola de lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgotos sanitários, bem como seus produtos derivados.

O parágrafo único, seção 1 da Resolução 375 (BRASIL, 2006) estabelece que, para a produção, compra, venda, cessão, empréstimo ou permuta do lodo de esgoto e seus derivados, além do previsto na Resolução, deverá ser observado o disposto no Decreto 4.954 (BRASIL, 2004a), que regulamenta a Lei 6.894 (BRASIL, 1980). Essa dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura.

Entre as medidas de controle contidas na Resolução 375 (BRASIL, 2006) está o estabelecimento de limites máximos de concentração para contaminantes inorgânicos, agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos. Esses listados respectivamente nas tabelas 3 e 4. O lodo de esgoto ou produto derivado que após análises químicas e biológicas não se enquadra nos limites e critérios estabelecidos deverão receber outra forma de destinação final.

Tabela 3 – Descrição das concentrações máximas permitidas de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto ou produto derivado

Lodos de esgoto ou produto derivado	
Substância Inorgânica	Concentração máxima permitida Resolução 375/2006* (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bario	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromio	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: *BRASIL (2006).

De acordo com as características referentes aos agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos o lodo de esgoto ou derivado é enquadrado em classe A ou classe B.

Tabela 4 – Descrição das concentrações máximas permitidas de agentes patogênicos em lodos de esgoto ou produto derivado

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Indicador	Concentração máxima permitida Resolução 375/2006*
A	Coliformes Termotolerantes	$<10^3$ 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 ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes	$<10^6$ NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos	< 10 ovos / g de ST

Nota: ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa

Fonte: *BRASIL (2006).

A Resolução 375 (BRASIL, 2006) estabeleceu um prazo limite de cinco anos a partir da data de sua publicação para a permissão da aplicação de lodo de esgoto e seus derivados na agricultura, sendo atualmente apenas a classe A é permitida para esses fins. Porém alguns autores como Reami e Bertoncini (2017) já desenvolveram pesquisas que comprovam o beneficio da aplicação de lodo de esgoto classe B na agricultura.

Para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis (SV) e sólidos totais (ST) for inferior a 0,7. Para a redução da atratividade de vetores foram definidos sete processos sendo eles digestão anaeróbia, digestão aeróbia, compostagem, estabilização química, secagem, aplicação subsuperficial e incorporação no solo (BRASIL, 2006).

Também são definidas restrições às culturas agrícolas que estão aptas a receberem lodo de esgoto ou produto derivado, sendo elas, 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. Além dessas, a Resolução 375 (BRASIL, 2006) estabelece locais onde não é permitida a aplicação de lodo de esgoto ou derivado como em:

- Unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental (APA);
- Área de Preservação Permanente (APP);
- Áreas de Proteção aos Mananciais (APM) e em outras áreas de captação de água para abastecimento público;
- Um raio mínimo de cem metros de poços rasos e residências;
- Uma distância mínima de quinze metros de vias de domínio público e drenos interceptores e divisores de águas superficiais e subterrâneas.

A Resolução Resolução 375 (BRASIL, 2006) define que a aplicação do lodo de esgoto e produtos derivados só poderá ocorrer mediante a existência de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), que deverá ser devidamente licenciada pelo órgão ambiental, segundo os mesmos procedimentos adotados para outras fontes de poluição. Estipula também que o licenciamento deverá obrigatoriamente

contemplar uma avaliação geral das possíveis áreas de aplicação existentes próximas à UGL.

A resolução constitui um grande avanço na promoção e regulamentação do uso agrícola dos lodos produzidos em estações de tratamento de esgotos, entretanto, ainda existem aspectos que necessitam ser bem discutidos podendo, futuramente, serem alterados, complementados e ajustados. Autores como Bittencourt (2014) e Pires (2006) consideram que deve existir uma constante revisão das normas e a continuidade dos estudos envolvendo o tema.

3.2.2 Outras legislações

Uma vez que o uso agrícola do lodo de esgoto envolve a adição de nutrientes e matéria orgânica ao solo, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) incluiu o lodo de esgoto na Instrução Normativa 15 (BRASIL, 2004b), em resposta ao Decreto 4.954 (BRASIL, 2004a) que regulamenta os fertilizantes orgânicos.

A principal diferença entre a Resolução 375 (BRASIL, 2006) e as Instruções Normativas do MAPA diz respeito à rastreabilidade. No caso do CONAMA, as áreas em que o lodo será aplicado também deverão ser controladas. As ETE deverão identificar qual lote do lodo foi aplicado em qual área agrícola. Somente assim, tem-se um controle do uso do resíduo, facilitando, inclusive, a identificação de falhas na aplicação e/ou avaliação da qualidade do lodo de esgoto utilizado (PIRES, 2006).

Já as Instruções Normativas do MAPA são voltadas ao estabelecimento de padrões mais específicos para comercialização, como embalagens, rótulos, granulometria e registros que não são abordados na Resolução 375 (BRASIL, 2006).

A Instrução Normativa 25 (BRASIL, 2009) (que revoga a Instrução Normativa 15 e a Instrução Normativa 23) estabelece normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura.

Esta classifica em “D” os fertilizantes que utilizam o lodo de esgoto como matéria-prima em sua produção. Nas garantias e especificações a Instrução Normativa 25 (BRASIL, 2009) estabelece a granulometria levando em consideração a natureza

física (sólido, fluído, pastoso ou gel) do fertilizante. Para fertilizantes sólidos a especificação granulométrica é descrita na tabela 5. Para os fertilizantes orgânicos e biofertilizantes que não atendam às especificações granulométricas, no rótulo ou etiqueta de identificação do produto deverá constar a expressão “produto sem especificação granulométrica”.

Tabela 5 – Especificação granulométrica quanto a natureza física do produto para fins agrícolas

Natureza Física	Especificação Granulométrica Instrução Normativa 25/2009*		
	Peneira	Passante	Retido
Granulado	4mm (ABNT n°5) 1mm (ABNT n°18)	95% mínimo 5% máximo	5% máximo 95% mínimo
Pó	2mm (ABNT n°10) 0,84mm (ABNT n°20) 0,3mm (ABNT n°50)	100% 70% mínimo 50% mínimo	0% 30% máximo 50% máximo
Farelado	3,36mm (ABNT n°6) 0,5mm (ABNT n°35)	95% mínimo 25% máximo	5% máximo 75% mínimo
Farelado Grosso	4,8mm (ABNT n°4) 1mm (ABNT n°18)	100% 20% máximo	0% 80% mínimo

Nota: ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

Fonte: *BRASIL (2009).

As características dos biofertilizantes devem ser respaldadas pela pesquisa oficial brasileira e aqueles produzidos, importados, comercializados e utilizados no território nacional deverão ser registrados no órgão do MAPA. Além disso, deverá ser apresentada recomendação da pesquisa oficial brasileira ou relatório técnico-científico conclusivo, que demonstre que a eficiência agronômica do produto se deve à ação do princípio ativo ou agente orgânico contido no biofertilizante.

3.3 COMERCIALIZAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE BIOFERTILIZANTE

3.3.1 Aspectos comerciais de biofertilizantes

Um dos principais fatores a ser observado na comercialização de biofertilizantes são as características físicas, pois suas deficiências podem ocasionar problemas relacionados com empedramento, esfarelamento ou formação de pó, baixa fluidez, segregação e excessiva higroscopicidade (UNIDO, 1980).

Esses problemas estão associados a densidade, porosidade e higroscopicidade do biofertilizante. Visto que essas características são influenciadas pela umidade do ambiente em que está inserido e pela distribuição granulométrica das partículas, tornasse essencial estudá-las para obter condições ideais para sua comercialização.

O empedramento, na maioria dos casos, é causado pelo crescimento de pontes cristalinas entre as partículas dos produtos, formando uma massa de dimensões muito maiores que a das partículas originais. Isso ocorre durante o período de armazenamento, por efeitos térmicos e reações químicas internas, entre os sais e a umidade do biofertilizante.

Materiais com tamanhos de partículas grandes têm menor números de pontos de contato entre as partículas, e consequentemente, a tendência a empedramento é menor (DAVID, 2006).

A granulometria do biofertilizante é uma importante característica, pois os fenômenos que dependem do contato, como higroscopicidade são intensificados ou reduzidos.

Já a higroscopicidade é a tendência que os materiais apresentam de absorver umidade do ar atmosférico, cada material possui um valor máximo de absorção de umidade relativa do ar na qual foi exposto. Um biofertilizante úmido apresenta vários inconvenientes como: queda no teor de nutrientes, menor resistência das partículas, além de dificultar o seu manuseio e distribuição (DAVID, 2006).

O conhecimento dessas características auxiliam na escolha de embalagens apropriadas para melhor conservação do produto durante o período de estocagem. Segundo Lantim et al. (2016) quando associado a uma embalagem adequada os produtos agrícolas podem conservar as características do produto por longos períodos.

Garcia et al. (1989) define embalagem como o conjunto de atividades de design e de fabricação de um recipiente ou envoltório para um produto, cujas principais finalidades se resumem em consumo, distribuição física, transporte, exportação e armazenagem.

Para Arlindo et al. (2007) a embalagem necessita preservar ao máximo a qualidade do produto durante o armazenamento, criando condições que minimizem alterações químicas, bioquímicas e microbiológicas.

Nos produtos agrícolas, o tipo de embalagem influencia na diminuição das reações metabólicas em função da alteração do microclima criado em seu interior, sendo assim uma barreira que impede ou dificulta o contato entre o ambiente externo e o produto (GARCIA et al., 1989).

Por outro lado, a estimativa da vida-de-prateleira de produtos agrícolas não é uma tarefa fácil, tornando-se imprescindível o máximo de informações ao ser conservado (ARLINDO et al., 2007).

Segundo a Associação Brasileira de Embalagens (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS, 2014), existem diversos tipos de embalagens que atendem a diversas funcionalidades e os materiais usados para sua fabricação são geralmente, o vidro, o aço, o alumínio, os materiais celulósicos (papel, cartão e papelão) e os plásticos.

Dentre os plásticos mais utilizados e de menor preço em todo o mundo, o polietileno é dos mais versáteis, apresentando resistência e flexibilidade que o torna mais aplicável. As principais vantagens do polietileno são: facilidade de soldagem, inércia química (resistente a ácidos, álcalis e solventes orgânicos), baixa permeabilidade ao vapor de água, grande resistência à tração e excelentes características de isolamento elétrico (CABRAL et al., 1980).

Outro tipo de embalagem muito utilizado são os laminados ou materiais flexíveis. Estes podem se apresentar de duas formas: como filme único de natureza plástica, celulósica ou metálica, ou como combinação de vários filmes simples, proporcionando aumento em sua utilização. Estas combinações aumentam a barreira contra o vapor de água e gases, devido as suas características (BUREAU; MULTON, 1995).

3.3.2 Alternativa de beneficiamento - Moagem

Quando se pretende comercializar qualquer produto é necessário avaliar as possíveis condições de atendimento às legislações vigentes. No caso desta pesquisa, a possibilidade de comercialização do produto, lodo de esgoto, é avaliada considerando a classificação apresentada pela Instrução Normativa 25 (BRASIL, 2009) (Tabela 5), que destaca aspectos relacionados à estrutura física do material. Neste aspecto, o entendimento de possíveis processos de beneficiamento para atendimento à legislação é importante para que a viabilização de sua implantação seja possível, quando for estruturada uma usina de gerenciamento de lodo.

Para promover as alterações relativas à estrutura física, especificamente relacionada à granulometria do material utilizado na agricultura, entende-se que a moagem de produtos seja uma alternativa interessante, por se tratar, segundo Brennan (2006), de um processo de redução de tamanho aplicada em insumos onde há necessidade de corta-los ou rompê-los em tamanhos menores para a elaboração do produto final.

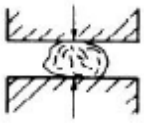
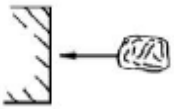
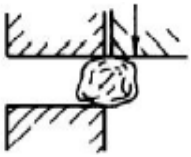
Algumas vantagens do processo de moagem citadas por Weiand e Rafael (2010) são: o aumento da relação superfície/volume o que aumenta a eficiência de operações posteriores e a uniformidade do tamanho das partículas o que auxilia na homogeneização de produtos.

As principais forças que atuam no processo de redução de tamanho das partículas são a compressão, o impacto, o atrito e o corte. Os equipamentos que realizam esse processo podem funcionar empregando um ou mais tipos de atuação da força simultaneamente. Existe uma grande variedade de equipamentos, que podem ser utilizados de acordo com o tamanho das partículas de alimentação e do produto (FELLOWS, 2000).

Os equipamentos mais utilizados para esse processo são os britadores que realizam a fragmentação de partículas de tamanho grande para médio, os trituradores que são utilizados para partículas de tamanhos médios e os moinhos que reduzem partículas médias a pó. Em processos agrícolas o moinho é o equipamento mais utilizado para redução de tamanho de partículas.

No quadro 4 é possível identificar as forças atuantes na redução de tamanho das partículas de acordo com o tipo de moinho utilizado.

Quadro 4 – Forças atuantes na redução de partículas de acordo com o tipo de moinho utilizado

Força	Sistema de operação	Tipo de equipamento
Compressão		Moinho de rolos
Impacto		Moinho de martelo
Atrito		Moinho de disco de atrito
Corte		Moinho de facas rotativas

Fonte: Fellows (2000).

Segundo (EARLE; EARLE, 1983) além da dimensão dos sólidos, algumas propriedades dos sólidos a serem moídos devem ser observadas sendo elas:

- a dureza, visto que afeta o consumo de energia e o desgaste da máquina sendo que para materiais duros e abrasivos é preciso usar máquina de baixa velocidade e proteger os apoios da poeiras abrasivas formadas;
- a estrutura, pois os materiais granulares normais, como carvão, minérios e rochas podem triturar-se eficientemente com o uso das forças normais, já para materiais fibrosos é necessário efetuar uma ação de rompimento;
- o conteúdo de umidade, pois verifica-se que os materiais não fluem bem se contiverem de 5 a 50% de umidade; nestas condições, os materiais tendem a se aglutinarem formando bolas;
- a resistência ao esmagamento, sendo que a potência necessária para o esmagamento é quase que diretamente proporcional à resistência do material ao esmagamento;

- a friabilidade, sendo essa a tendência a fraturar-se durante o manuseamento normal. Em geral, um material cristalino quebrará ao longo de planos bem definidos e a potência necessária pra o esmagamento aumentará à medida que o tamanho da partícula diminui;
- o empastamento, pois um material pegajoso tenderá a entupir o equipamento de moagem e, por isso, deverá ser moído numa instalação que possa ser rapidamente limpa;
- a tendência para escorregamento (fluidez) esta característica é, em geral, um reflexo do valor do coeficiente de atrito da superfície do material. Se o coeficiente de atrito for baixo, o esmagamento pode ser mais difícil.

Além dos detalhes construtivos específicos de cada tipo de operação, todo equipamento deve apresentar as seguintes características:

a) Permitir o afastamento rápido do sólido fragmentado da superfície de trabalho. Os finos que se produz na moagem, se permanecerem junto à superfície de trabalho funcionam como amortecedores do contato com as novas partículas a serem moídas. A descarga rápida do material moído pode ser feita por meio de água, ar comprimido e por força centrífuga.

b) Segurança: os britadores podem expelir partículas com grande energia durante a operação e, também, os moinhos podem provocar a queima ou explosão do material em decorrência do aquecimento excessivo ou acúmulo de pó fino durante a moagem. Somente uma operação bem conduzida poderá evitar estes problemas.

3.3.2.1 Principais tipos de moinhos utilizados na agricultura

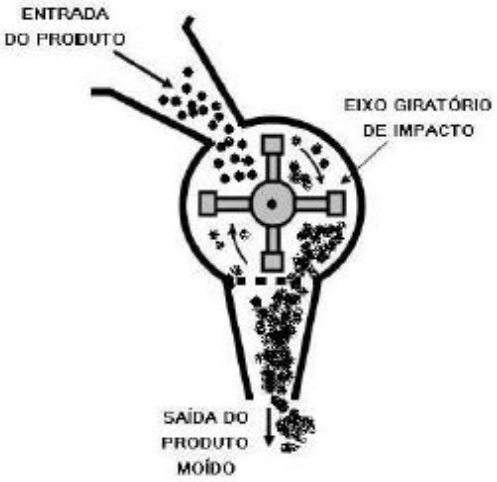
Dependendo do tipo de produto final processado, a operação requer um tipo específico de moagem. Os modelos de moinhos mais utilizado em processamentos na agricultura estão descritos abaixo.

a) Moinho de martelos

Os moinhos de martelo são usados para reduzir o material de tamanho entre intermediário a pequeno. Este tipo de moinho é utilizado para fragmentar materiais frágeis não abrasivos. Utiliza-se igualmente para materiais fribosos, como milho, soja e café, pois uma parte da ação de fragmentação é por corte. Também é muito utilizado para trituração de legumes e frutas, que irá posteriormente ser extraído o

seu suco através de peneiras. Neste tipo de moinho, um rotor montado em um cilindro horizontal gira em alta velocidade promovendo a trituração do material. Os martelos podem ser fixo ou móvel, isto é, balançam dentro do cilindro. Na figura 2 é possível observar o funcionamento de um moinho de martelos.

Figura 2 – Moinho de martelos



Fonte: Weiand e Rafael (2010).

b) Moinho de rolos

Os moinhos de rolos giram em direções opostas e em velocidades diferentes. Sua superfície sofre muito desgaste. Também existem os moinhos de rolos únicos que giram contra uma superfície fixa. São utilizados geralmente para sementes tipo mostarda, torta de cacau e amendoim.

Figura 3 – Moinho de rolos

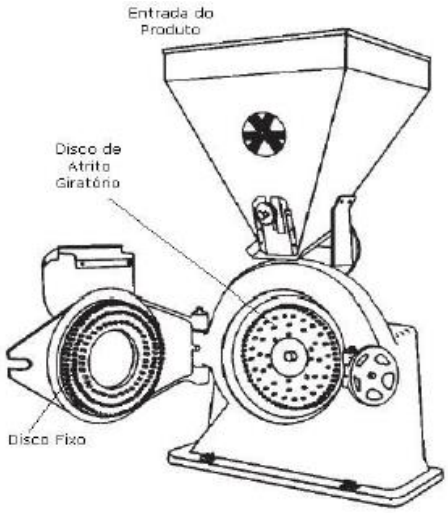
Fonte: Weiand e Rafael (2010).

c) Moinho de discos de atrito

Os moinhos de disco de atrito dependendo o tipo de alimento podem ser de disco simples ou disco duplo. No moinho de disco simples é formado por um disco giratório que gira comprimindo o alimento em um disco estacionário. O material é introduzido através do centro do disco estacionário e encontra o disco giratório que é provido de ranhuras, ocorrendo a trituração do mesmo.

O moinho de disco duplo possui dois discos giratórios dotado de ranhuras para a execução do trabalho de trituração do alimento, forçando o alimento moído atravessar uma tela perfurada na saída do moinho. Moinhos de disco são especialmente utilizados para alimentos fibrosos como, milho, arroz, castanha de cacau.

Figura 4 – Moinho de disco



Fonte: Weiand e Rafael (2010).

d) Moinho de bolas

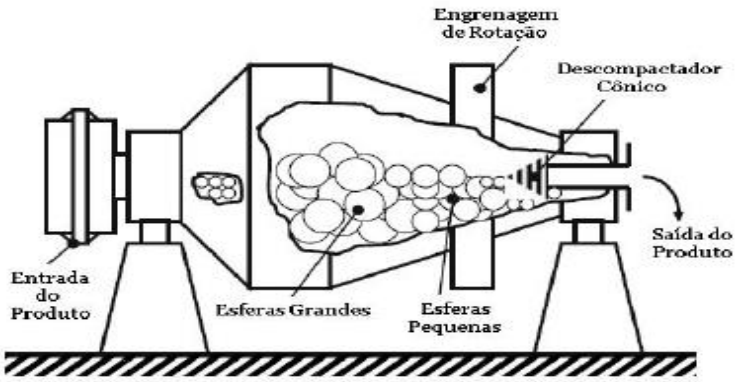
Na sua forma mais simples consiste em um tambor cilíndrico rotativo com dimensões regulares, que, em funcionamento é preenchido parcialmente com bolas. O material a moer é alimentado no tambor, junto com as bolas, e à medida que ele gira, as bolas caem sobre o material, promovendo a fragmentação.

O moinho de bolas é muito eficaz para moagem fina de pó tais como: moagem fina de cobertura de chocolate e polpa de cacau, nozes, castanha, amendoim, amêndoas, etc. O efeito da moagem se realiza no espaço entre o recipiente de trabalho cônico o estator e um rotor cônico. O movimento do rotor provoca o

movimento radial do alimento (esferas). O movimento é aumentado progressivamente à medida que avança no moinho, de modo que o esforço constante aplicado ao alimento moído aumenta constantemente durante a operação de moagem. O tamanho médio final das partículas moídas depende da dureza do material a moer e do tempo de moagem.

A moagem pode ser feita em circuitos abertos ou fechados. Na moagem em circuito aberto, o material passa uma só vez pelo moinho, pois já atinge a especificação de granulometria desejada. A moagem em circuito fechado existe um classificador que separa as partículas mais finas das mais grossas que o tamanho final desejado. As mais grossas retornam ao moinho para sofrer nova moagem, enquanto as mais finas são separadas através de sistema pneumático acoplado a um ciclone. A moagem em circuito fechado consegue tamanhos mais finos que o aberto, em virtude do controle de granulometria ser mais rígido.

Figura 5 – Moinho de bolas



Fonte: Weiand e Rafael (2010).

e) Moinho coloidal

A aplicação principal do moinho coloidal é a trituração de produtos em suspensão, emulsões extremamente viscosas (margarina, maionese).

No moinho coloidal, os ingredientes da mistura são forçados a passar através de uma válvula com ranhuras muito estreita. Esta válvula é composta de uma parte fixa e outra giratória que é o rotor e ocorre a dispersão em toda a mistura.

O intervalo entre o estator e o rotor é ajustável, conforme a necessidade do processo em relação a dispersão (emulsão) desejada do produto final.

f) Moinho de facas

O moinho de facas é utilizado especificamente para operação de redução de tamanho em formas de cubos, fatias e tiras dos alimentos. Os equipamentos utilizados para esta operação são chamados de cubeteadoras e, possui uma série de facas circulares, em forma de ele “L” e serrilhadas, que dão a forma desejada ao produto final. Este tipo de equipamento é bastante utilizado para queijos, e legumes em geral.

g) Moinho dispersor

Dispersores são moinhos especiais utilizados para a redução da mistura, em fragmentos muito pequenos fazendo com que os mesmos fiquem em suspensão. Os moinhos dispersores promovem a homogeneização de misturas pastosas, deixando um aspecto cremoso ao produto. Este tipo de moinho efetua o cisalhamento dos sólidos quebrando-os em partículas extremamente minúsculas.

3.3.3 Método de avaliação do comportamento do teor de umidade de produtos em diferentes ambientes – Curva de umidade de equilíbrio

Um fator essencial nos estudos de sistemas de secagem, manuseio, armazenagem, embalagem e transporte de produtos agrícolas é a relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a umidade relativa. Essa pode ser determinada pela curva de equilíbrio do produto com o ambiente (ARAÚJO; CORRÊA; SILVA, 2001).

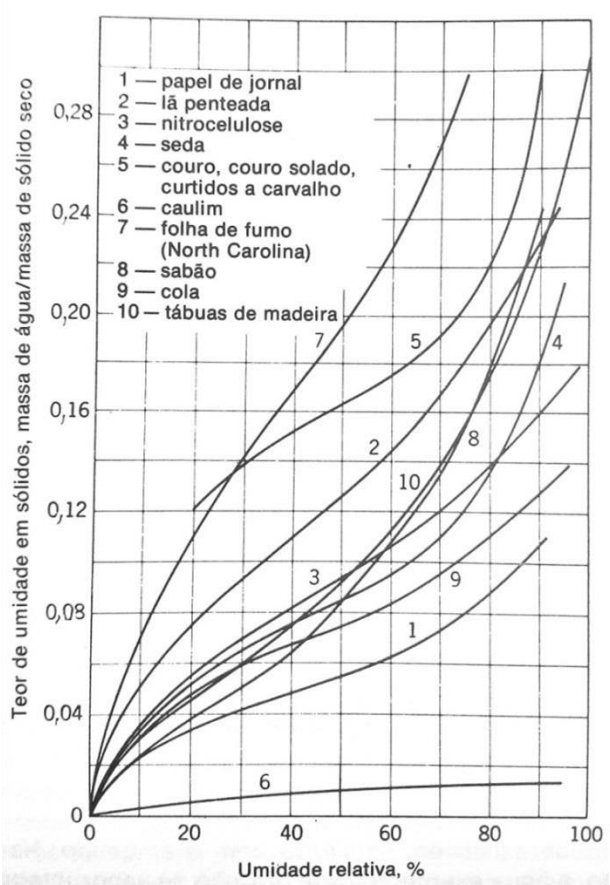
As curvas de umidade de equilíbrio são propriedades termodinâmicas úteis para a determinação das interações que ocorrem entre a água e os elementos componentes do produto (OLIVEIRA; MATA; DUARTE, 2004). Podendo também ser parâmetro indicativo para escolha de embalagens apropriadas para melhor conservação do produto durante o período de estocagem (CORRÊA; JUNIOR; STRINGHETA, 2000).

No processamento (beneficiamento, secagem e armazenagem) de produtos agrícolas surge à importância do conhecimento do seu comportamento higroscópico. Para a simulação de secagem ou armazenamento, por exemplo, o conhecimento prévio das curvas de umidade de equilíbrio do produto com o ambiente pode auxiliar na melhor escolha para o processo, já que essas simulam diferentes temperaturas e umidades (RUSCIOLELLI; COSTA; JUNIOR, 2011).

Autores como Omana et al. (2010); Aini et al. (2014) e Corrêa et al. (2014) desenvolveram estudos sobre a umidade de equilíbrio de alguns produtos agrícolas e avaliaram parâmetros para estocagem e armazenamento desses.

Cada material possui caraterísticas próprias quanto ao equilíbrio de umidade. Na figura 6, extraída de Foust et al. (1982), podemos observar as curvas típicas de umidade de equilíbrio de alguns materiais.

Figura 6 – Teor de umidade de equilíbrio em alguns materiais a 25ºC



Fonte: Foust et al. (1982)

Materiais como caulim e sabão possuem especificações técnicas baseadas nessas curvas, o caulim, por exemplo, é embalado em sacos de papel kraft de 3 folhas com peso líquido de aproximadamente 25 kg. Seu manuseio deve ser em local arejado e com boa ventilação e estocado em local seco com empilhamento máximo de 2 pallets (MINASOLO, 2017).

Já o sabão dependendo de sua textura pode ser acondicionado em tambores de ferro para 200 kg, barricas de papelão com saco plástico para 45 kg, balde plástico para 15 kg, caixa de papelão com 12 potes plásticos de 500g, caixa de papelão com

24 potes plásticos de 500g, caixa de papelão com 36 potes plásticos de 200g, caixa de papelão com 48 sachês plásticos de 500g, caixa de papelão com 24 sachês plásticos de 500g e caixa de papelão com 32 sachês plásticos de 350g. Seu prazo de validade nessas embalagens pode chegar a 12 meses a partir da data de fabricação (MINASOLO, 2017).

O período de vida útil do produto vai depender, principalmente, do tipo e nível de proteção oferecido pela embalagem de armazenamento, que pode ser estimado por equações matemáticas em função do teor de umidade do material, das condições ambientais e da taxa de permeabilidade ao vapor d'água da embalagem (ALVES et al., 1996).

A curva de umidade de equilíbrio do material pode ser obtida experimentalmente relacionando o conteúdo de umidade de equilíbrio do sólido com a umidade relativa do ar e a atividade da água, em temperatura constante (CHEN; JAYAS, 1998).

Em materiais orgânicos como a madeira, o papel e o sabão, o teor de umidade no equilíbrio varia regularmente numa ampla faixa à medida que a temperatura e a umidade variam.

Diversos autores afirmam que os valores de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos dependem, principalmente, da espécie e variedade do produto, do seu teor de umidade inicial e principalmente da temperatura e umidade relativa do ambiente em que se encontra o produto (MAROULIS et al., 1988; SAMANIEGO-ESGUERRA et al., 1991; MOREY et al., 1995; CHEN; JAYAS, 1998).

Um material, com uma determinada umidade, quando colocado em ambiente com condições constantes de temperatura, pressão e umidade relativa, evoluirá, ao longo do tempo para uma condição de equilíbrio com o meio, apresentando uma umidade que pode ser maior ou menor que a umidade inicial, denominada umidade de equilíbrio do sólido.

O fenômeno de higroscopicidade de produtos sólidos porosos é estudado por meio das equações que descrevem as isotermas de sorção de água, que são representações matemáticas da relação existente entre o teor de umidade do material em equilíbrio com diferentes valores de atividade de água e uma determinada temperatura (CORRÊA; MOURE, 2000).

Diferentes equações teóricas e empíricas têm sido propostas para representar as isotermas de equilíbrio higroscópico de inúmeros produtos (SUN; WOODS, 1994). Entretanto, Brooker et al. (1992) mencionam que nenhuma equação teórica é ainda capaz de prever com exatidão o teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas, processados ou não, em uma ampla faixa de temperatura e atividade de água.

Para Rossi (1980) os principais métodos para determinar a umidade de equilíbrio são: soluções aquosas saturadas de vários sais; soluções aquosas de diferentes concentrações de ácidos e métodos mecânicas. Sendo que os dois primeiros utilizam recipientes herméticos contendo soluções saturadas de sais ou ácidos em certas concentrações e a temperatura constante. Essas são as maneiras mais simples de se construir uma curva de umidade de equilíbrio.

O método de soluções aquosas saturadas de vários sais consiste em colocar amostras do material, inicialmente seco, dentro de câmaras com umidades controladas a uma temperatura constante e medir o ganho de massa das amostras, até que o seu equilíbrio tenha sido atingido. Stoloff (1978) considera esse método o mais adequado, pois pode liberar ou sorver água sem sofrer alteração significativa de suas atividades de água.

Labuza (1984) recomenda que para o preparo das soluções saturadas sejam utilizados sais puros e a mistura seja feita em recipientes herméticos limpos. Além de que a solução deve ser uma pasta contendo excesso de cristais e deve cobrir todo o fundo do recipiente com uma camada maior de dois milímetros de espessura. A solução deve ser preparada numa temperatura igual ou maior que a do ambiente, pois a solubilidade de muitos sais aumenta significamente com a temperatura. A água deve ser acrescentada aos poucos e a solução agitada constantemente, até que haja uma fina camada de liquido acima da camada de sal.

A tabela 6 mostra as quantidades de sal e água destilada que devem ser misturadas para obter uma solução supersaturada a 25°C de acordo Spiess e Wolf (1987) e as umidades relativas de equilíbrio proporcionadas pelos sais. Segundo esses autores para um período de exposição prolongado, a solução pode ser utilizada assim que estiver pronta e indefinidamente para a maioria dos sais, desde que devidamente guardada de forma a evitar perda substancial de umidade por evaporação.

Tabela 6 – Preparação de soluções saturadas de sais a 25°C

Sal	Umidade relativa (%)	Quantidade	
		Sal (g)	Água (mL)
LiCl	11,15	150	85
CH_3COOK	22,60	200	65
$MgCl_2$	32,73	200	25
K_2CO_3	43,80	200	90
$Mg(NO_3)_2$	52,86	200	30
NaBr	57,70	200	80
$SrCl_2$	70,83	200	50
NaCl	75,32	200	60
KCl	84,32	200	80
$BaCl_2$	90,26	250	70

Fonte: Adaptado de Spiess e Wolf (1987)

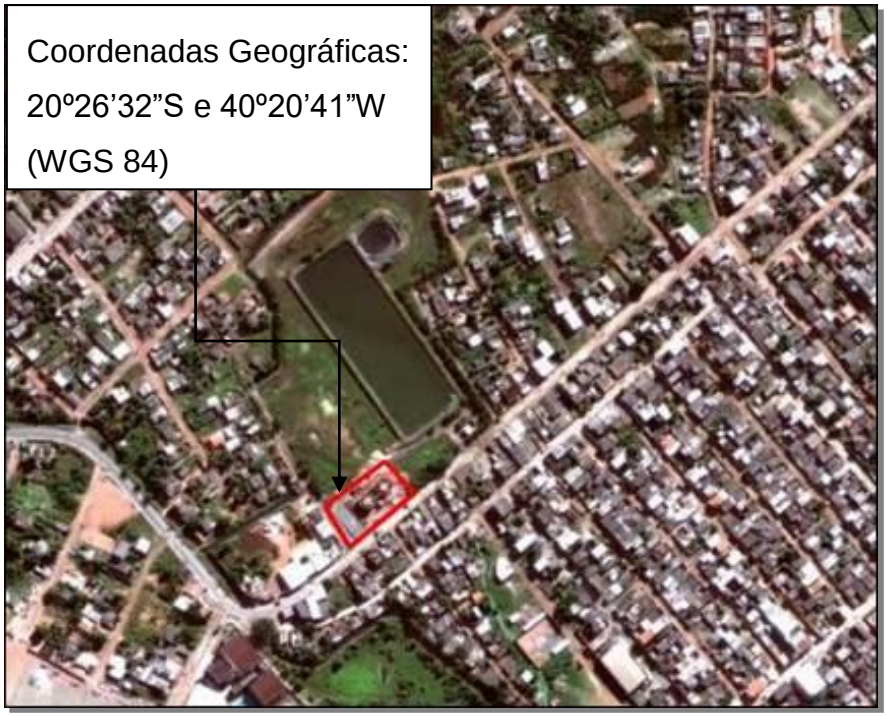
4 METODOLOGIA

De acordo com a classificação empregada por Gil (2002) esta pesquisa se enquadra nas seguintes categorias: quanto à área da ciência, em pesquisa metodológica; quanto aos objetivos, em descritiva; quanto ao objeto, em pesquisa de laboratório e quanto à forma de abordagem, em quantitativa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O lodo utilizado na pesquisa é proveniente da ETE Ulisses Guimarães que está situada na Rua Dom Pedro I, s/n, no bairro Ulisses Guimarães, no município de Vila Velha – ES, sua localização geográfica é ilustrada na figura 7.

Figura 7 – Localização geográfica da ETE Ulisses Guimarães



Fonte: CESAN (2011).

O sistema de esgotamento sanitário (SES) de Ulisses Guimarães atualmente atende os bairros Ulisses Guimarães, 23 de Maio, João Goulart, Normília da Cunha e Terra Vermelha, totalizando uma população de aproximadamente 19 mil habitantes, o que equivale a uma vazão média de esgotos de 30 L/s. O sistema de redes coletoras do SES está dividido em duas grandes bacias de contribuição com duas elevatórias de esgoto bruto (CESAN, 2011).

A ETE opera com as seguintes unidades: tratamento preliminar, reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), filtro biológico aerado submerso (FBAS), decantador secundário (DS) e sistema de desinfecção por ultravioleta (UV). São dois conjuntos dotados destas unidades, dimensionados para tratar uma vazão média de 15 L/s cada, totalizando 30 L/s.

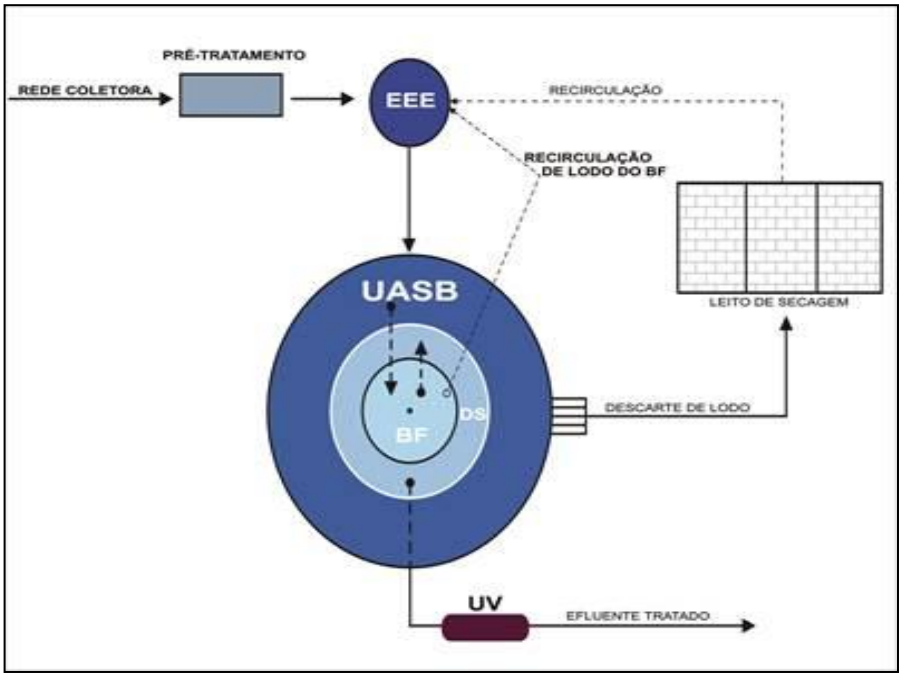
Os esgotos sanitários provenientes da rede coletora passam inicialmente pela etapa de tratamento preliminar composto por gradeamento (médio) e caixa de areia, para remoção de sólidos grosseiros e areia. A remoção de óleos e graxas é realizada por meio de uma caixa separadora. Após o tratamento preliminar, o esgoto é encaminhado, por recalque, para o reator UASB. No topo do UASB existe uma unidade de gradeamento fino e caixa de areia circular, com o objetivo de complementar o tratamento preliminar.

Após digestão anaeróbica o esgoto é direcionado por gravidade ao FBAS onde ocorre a remoção de compostos orgânicos e nitrogênio na forma solúvel. O decantador secundário promove a clarificação do efluente do FBAS que é direcionado por gravidade para a etapa final do tratamento que compreende desinfecção por ultravioleta, a qual promove significativa redução no número de organismos patogênicos presentes no efluente.

O lodo oriundo da lavagem dos FBAS e dos DS é recirculado para o UASB com a finalidade de promover a sua estabilização e seu adensamento. O lodo gerado no UASB é drenado, por descarga hidráulica, para as células do leito de secagem onde o teor de sólidos no lodo passa de cerca de 5% para 30% após desaguamento natural. Em seguida, o lodo desaguado é disposto em aterro sanitário particular, respeitando as características definidas pela empresa que gerencia o aterro.

O efluente líquido proveniente do desaguamento do lodo é conduzido para elevatória e, posteriormente, encaminhado ao UASB. Os gases gerados no reator anaeróbio são direcionados para um queimador de biogás e o efluente tratado é lançado no corpo receptor denominado Canal da Draga que é um afluente do Rio Jucu (CESAN, 2011). A figura 8 ilustra o fluxo operacional da ETE Ulisses Guimarães.

Figura 8 – Fluxograma do processo de tratamento de esgoto na ETE Ulisses Guimarães



Fonte: CESAN (2011).

O lodo utilizado na pesquisa foi coletado do leito de secagem na última semana de outubro de 2016 e encaminhado ao Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) - campus Vitória.

4.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Essa pesquisa foi caracterizada por avaliar o comportamento das características físicas e químicas do lodo de esgoto (biofertilizantes bruto) após ser submetido a processo de beneficiamento (moagem) além de determinar a curva da umidade de equilíbrio visando obter um produto comercial.

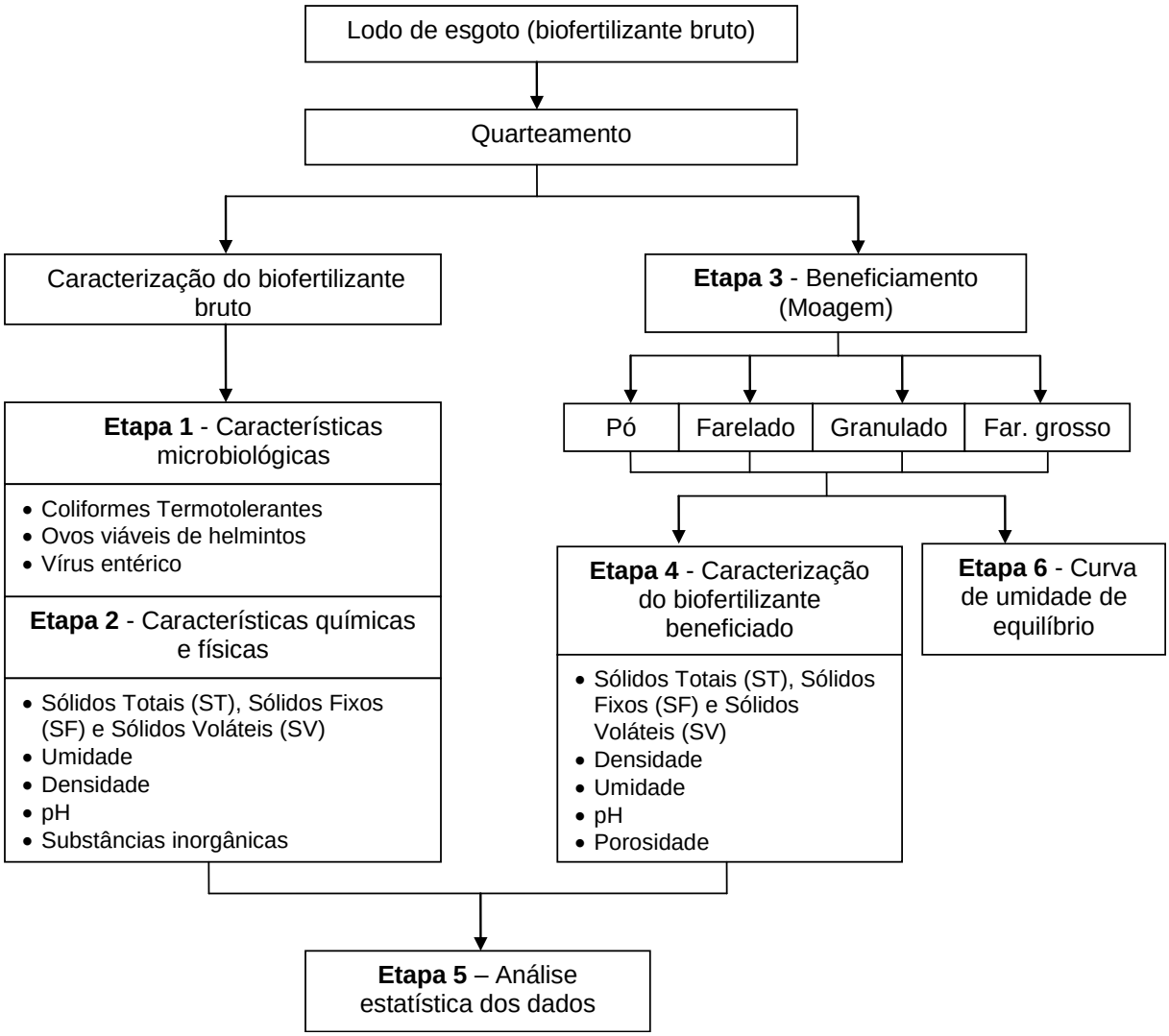
A terminologia dos lodos utilizados na pesquisa foi: biofertilizante bruto, para o lodo de esgoto retirado do leito de secagem e biofertilizante beneficiado para o lodo de esgoto após ser submetido ao beneficiamento.

Para melhor identificação do lodo e seguindo as exigências estabelecidas pela Resolução 375 (BRASIL, 2006), procedeu-se, além da caracterização físico/química, a caracterização microbiológica e de substâncias inorgânicas. Assim o lodo bruto foi quarteado e parte da amostra foi encaminhada para laboratórios do Ifes - campus

Vitória e laboratório particular especializado para a caracterização inicial do material (biofertilizante bruto) e outra para o beneficiamento.

Nos laboratórios do Ifes – campus Vitória foram determinados os seguintes parâmetros: densidade de coliformes termotolerantes no laboratório de microbiologia e sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV), umidade, densidade e pH no laboratório de química. E, no laboratório particular especializado foram determinados os seguintes parâmetros: substâncias inorgânicas, ovos viáveis de helmintos e vírus entérico. Na figura 9 é possível identificar as etapas do desenvolvimento experimental da pesquisa.

Figura 9 – Fluxograma do desenvolvimento experimental da pesquisa



Fonte: Própria autoria (2018).

O desenvolvimento experimental dessa pesquisa foi dividido em seis etapas, sendo a primeira a caracterização microbiológica do lodo (biofertilizante bruto) visando classifica-lo de acordo com a Resolução 375/2006. A segunda foi à determinação das características físicas e químicas do biofertilizante bruto.

Já a terceira etapa consistiu no beneficiamento (moagem) do biofertilizante bruto, na qual o material foi macerado manualmente e em seguida peneirado, obtendo quatro faixas granulométricas diferentes conforme Instrução Normativa 25 (BRASIL, 2009).

Na quarta determinou-se as características químicas e físicas do biofertilizante beneficiado, por intermédio dos parâmetros ST, SF e SV; umidade; densidade, porosidade e pH para cada faixa.

Na quinta os dados obtidos na segunda e na quarta etapas foram tratados estatisticamente, onde foi possível avaliar as alterações sofridas pelo biofertilizante bruto após o seu beneficiamento e identificação de possível faixa granulométrica ideal para sua comercialização. E por fim foi determinada a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado.

O período dos experimentos foi de maio de 2017 a novembro de 2017.

O quadro 5 mostra de forma resumida os métodos utilizadas em cada etapa do desenvolvimento experimental para alcançar os objetivos propostos na pesquisa.

Quadro 5 – Matriz da pesquisa

Objetivo geral	Objetivo específico	Etapa, método e objetivo esperado
Avaliar as características físicas e químicas do lodo de esgoto (biofertilizante bruto) após ser submetido a processo de beneficiamento que visa à obtenção de um produto (biofertilizante beneficiado) comercial.	1. Determinar as características físicas, químicas e microbiológicas do biofertilizante bruto.	**Etapa 1 -** Caracterização microbiológica: Coliformes termotolerantes (SILVA, 2010); Ovos viáveis de helmintos (MEYER; MILLER; KANESCHIRO, 1978); Vírus entérico (Real time PCR – sem quantificação). **Etapa 2 -** Químicas e físicas: ST, SF, SV, densidade e umidade (APHA, 2005); pH (US EPA, 2004); Substâncias inorgânicas (APHA, 2005). Objetivo: Caracterizar o biofertilizante bruto (BRASIL, 2006).
	2. Submeter o biofertilizante bruto a processo de beneficiamento, obtendo um biofertilizante beneficiado com quatro faixas granulométricas diferentes pó, farelado, granulado e farelado grosso.	**Etapa 3 -** Determinação das faixas granulométricas: Soquete manual e conjunto de peneiras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984). Objetivo: Biofertilizante beneficiado em pó, farelado, granulado e farelado grosso.
	3. Determinar as características físicas e químicas de cada faixa granulométrica do biofertilizante beneficiado.	**Etapa 4 -** Características químicas e físicas: ST, SF, SV e umidade (APHA, 2005); Densidade (TCHOBANOGLOUS, BURTON E STENSEL, 2003); pH (US EPA, 2004); Porosidade (EMBRAPA, 1997). Objetivo: Caracterizar o biofertilizante beneficiado.
	4. Comparar as características físicas e químicas do biofertilizante bruto com as do biofertilizante beneficiado.	**Etapa 5:** Tratamento estatístico dos dados obtidos (SPSS versão 21) Objetivo: avaliar as alterações das características físicas e químicas do biofertilizante bruto após o seu beneficiamento.
	5. Determinar a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado em cada faixa granulométrica.	**Etapa 6:** Determinar a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado (DAVID, 2002). Objetivo: avaliar possíveis processos comerciais para o biofertilizante beneficiado.

Fonte: Própria autoria (2018).

Tanto na caracterização do biofertilizante bruto quanto na do beneficiado o delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e cinco repetições para cada parâmetro determinado.

Nos itens seguintes serão detalhados os métodos utilizados para a determinação das características físicas e químicas, do beneficiamento e da curva de umidade de equilíbrio.

4.2.1 Determinação dos ST, SF, SV, densidade e umidade

Para a obtenção da umidade e densidade foi utilizada a metodologia descrita por APHA (2005) na qual obtêm os ST, SF e SV. Com esses dados é possível por meio de equações obter a variação da densidade do biofertilizante em função unicamente de características físicas do material.

i. Preparação das cápsulas

Foram utilizadas cinco cápsulas de porcelana (diâmetro = 95 mm) que foram lavadas com detergente neutro e água destilada. Em seguida, foram colocadas em estufa a 120°C por cinco minutos e depois encaminhadas para mufla a 550°C por uma hora. Uma vez preparadas, as cápsulas foram mantidas em dessecador de vidro, no qual resfriaram por quarenta e cinco minutos.

ii. Quarteamento da amostras

Foram retiradas por meio de quarteamento 250g do biofertilizante (figura 10 e 11), totalizando cinco amostras com 50g cada.

Figura 10 – Quarteamento da amostra

Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 11 – Frações da amostra

Fonte: Autoria própria (2017).

iii. Procedimento experimental

a) Pesagem das cápsulas e das amostras

Cada cápsula vazia foi identificada com grafite e colocada na balança analítica. Sua massa foi determinada como P1 e a balança tarada. Em seguida, preencheu-se a cápsula com 50 g de amostra de biofertlizante, sendo a massa desta amostra úmida identificada como P2**.** Nesta pesquisa, foram utilizadas duas casas decimais na pesagem das amostras (50,00 g).

b) Secagem da amostra em estufa

As cápsulas foram colocadas em estufa a 120°C por 24 horas. Passado esse período foram retiradas, reservadas no dessecador por 45 minutos e pesadas, o valor obtido nessa pesagem foi identificado como P3**.**

c) Calcinação da amostra em mufla

As amostras foram levadas para a mufla a 550°C por 1 hora. Em seguida, as amostras foram reservadas em dessecador, passados 45 minutos, foram pesadas. O valor obtido pela pesagem foi identificado como P4**.**

iv. Cálculos

a) Para obter o teor de ST é expresso pela equação 3.

$$ST = \frac{R_{S1} \text{ x } 100}{P_2} \quad (3)$$

Onde:

ST = Sólidos totais a 105ºC (%)

R_{S1}= (P3 – P1) = Massa (g) de resíduo seco a 105ºC

P1 = Massa da cápsula (g)

P2 = Massa da amostra úmida (g)

P3 = Massa da cápsula + massa do resíduo seco a 105ºC (g)

b) Já o teor de SF é expresso pela equação 4.

$$SF = \frac{R_{S2} \times 100}{P_2} \quad (4)$$

Onde:

SF = Sólidos Fixos a 550ºC (%)

RS2 = (P4 – P1) = Massa (g) de resíduo seco a 550ºC

P1 = Massa da cápsula (g)

P2 = Massa da amostra úmida (g)

P4 = Massa da cápsula (g) + massa de resíduo seco a 550ºC (g)

c) E o teor de SV de acordo com a relação abaixo.

$$SV = \frac{MV \text{ x } 100}{P_2} \quad (5)$$

Onde:

SV = Sólidos Voláteis a 550ºC (%)

MV = (P3-P4) = Massa de matéria volátil a 550ºC (g)

P2 = Massa da amostra úmida (g)

P3 = Massa do resíduo seco a 105ºC (g)

P4 = Massa de resíduo seco a 550ºC (g)

d) A relação entre o teor de ST e a umidade em um lodo é expressa da seguinte forma:

$$Uu = 100 - ST \quad (6)$$

Onde:

Uu = Umidade em base úmida (%)

ST = Sólidos Totais (%)

e) Já a umidade em base seca é definida como o quociente entre a massa de água contida no lodo e a massa isenta de água:

$$Us = \frac{ST}{Uu} \tag{7}$$

Onde:

Uu = Umidade em base úmida (%)

ST = Sólidos Totais (%)

A densidade foi determinada pelas equações 1 e 2.

4.2.2 Determinação da porosidade do biofertilizante beneficiado

A porosidade é calculada pela relação entre a densidade global e a densidade das partículas do lodo.

A densidade global consiste na relação entre a massa e o volume real, considerando os volumes da matriz sólida e da porosidade total. Já a densidade das partículas é a relação entre a massa de uma amostra e o volume que ocupam as partículas, desconsiderando o volume dos poros. Para ambas serão utilizadas metodologias realizadas por Bhattarai et al. (2010) e Embrapa (1997).

Foram utilizadas cinco amostras para cada faixa granulométrica do biofertilizante beneficiado.

i. <u>Materiais e equipamentos</u>

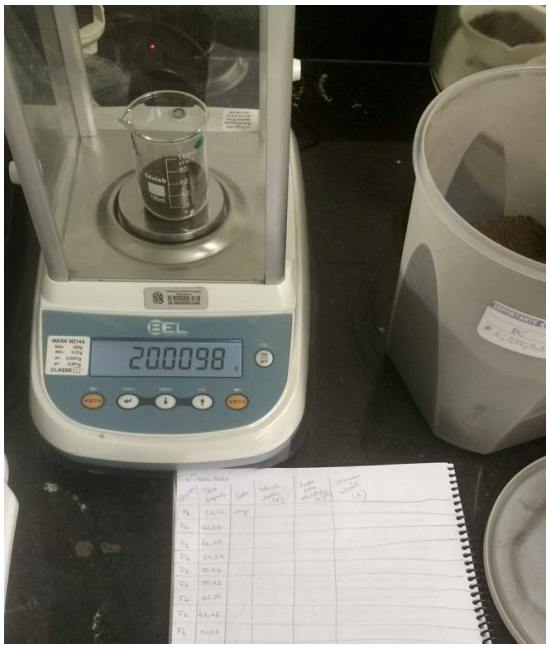
- Béquer.
- Balão graduado de 50 mL.
- Bureta.
- Estufa.
- Balança e álcool etílico.

ii. <u>Procedimento experimental</u>

a) Densidade Global

Para a determinação da densidade global colocou 20g do biofertilizante beneficiado em um béquer (figura 12) e anotou seu volume (identificado como “V”), em seguida secou-o em estufa a 105°C por 6h.

Figura 12 – Pesagem do biofertilizante



Fonte: Autoria própria (2017).

Depois pesou-se a amostra e identificou-a como “M” (figura 13). Ao final calculou-se a densidade global pela equação abaixo.

$$\mathrm{Dg} = \mathrm{M}/\mathrm{V} \tag{8}$$

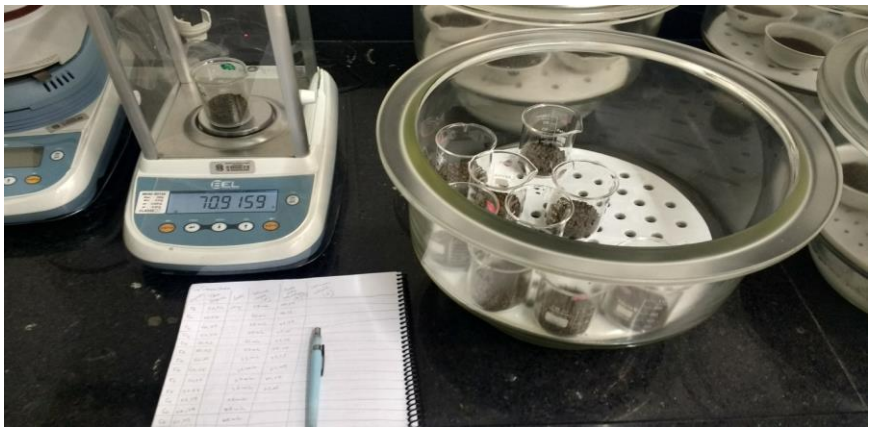
Onde:

Dg = Densidade global

M = massa seca em estufa à 105°C (g)

V = volume da amostra (cm^3)

Figura 13 – Secagem das amostras em estufa

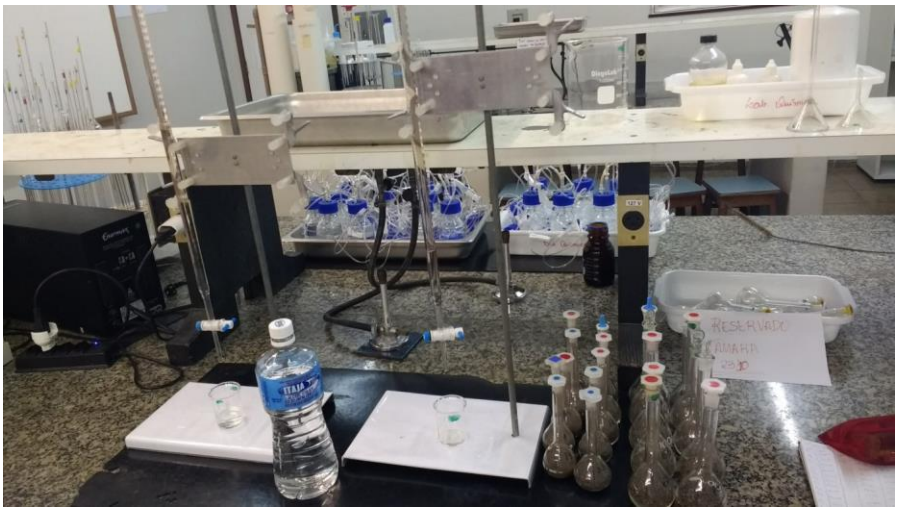


Fonte: Autoria própria (2017).

b) Densidade de partículas

Já para a densidade das partículas pesou 20g do biofertilizante beneficiado e levou-o à estufa por 6 horas em seguida dessecou-o e pesou-o, a fim de se obter o peso da amostra seca a 105°C (identificada como “a”). Transferiu a amostra para balão aferido de 50 ml (figura 14).

Figura 14 – Transferência do biofertilizante para balões volumétricos



Fonte: Autoria própria (2017).

Adicionou-se álcool etílico, agitando bem o balão para eliminar as bolhas de ar que se formaram. Prosseguiu-se com a operação, vagarosamente, até a ausência de bolhas e completou o volume do balão (figura 15). Anotou-se o volume de álcool

gasto (identificado como “b”). Ao final calculou-se a densidade das partículas pela equação 9 e a porosidade pela equação 10.

$$\mathrm{Dp} = \mathrm{a}/\mathrm{b} \tag{9}$$

Onde:

Dp = densidade das partículas (g/cm³)

a = peso da amostra seca a 105°C (g)

b = volume de álcool gasto (cm³)

$$\mathrm{P} = (\mathrm{Dg}/\mathrm{Dp})*100 \tag{10}$$

Onde:

P = Porosidade (%)

Dg = Densidade global (g/cm³)

Dp = Densidade das partículas (g/cm³)

Figura 15 – Adição de álcool etílico

Fonte: Autoria própria (2017).

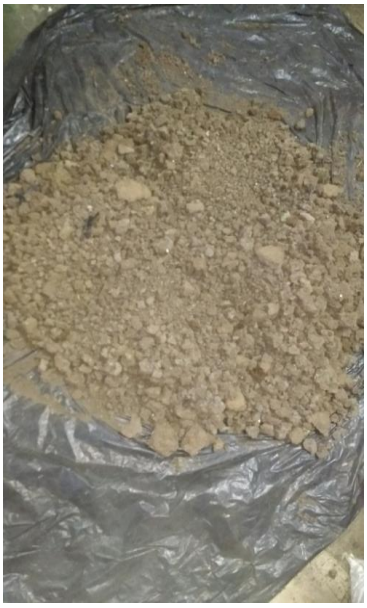
4.2.3 Determinação das faixas granulométricas - Beneficiamento

Para a determinação das faixas granulométricas estabelecidas pela Instrução Normativa 25 do MAPA (BRASIL, 2009) foram utilizados soquete e conjuntos de peneiras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984).

i. Preparação da amostra

Antes da determinação das faixas granulométricas, o biofertilizante bruto foi quarteado a fim de se obter uma amostra representativa, conforme mostra as figuras 16 e 17.

Figura 16 – Quarteamento do biofertilizante



Fonte: Autoria própria (2017).

Fonte: Autoria própria (2017).

ii. Materiais e equipamentos

- Conjuntos de peneiras nas seguintes faixas granulométricas: 2; 0.84; 0.3 (pó); 2.38; 0.5 (farelado); 4,75; 2,38; 1 (granulado) e 4,75; 1 (farelado grosso);
- Soquete;
- Agitador de peneiras;
- Cronômetro;
- Pá.

iii. Procedimento experimental

O objetivo do experimento foi obter três quilos de biofertilizante beneficiado para cada faixa granulométrica apresentada na Instrução Normativa 25 do MAPA (BRASIL, 2009). Para isso foram utilizados os conjuntos de peneiras apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Conjuntos de peneiras utilizados para obtenção de cada faixa granulométrica

Faixa granulométrica	Conjunto de peneiras
Pó	2; 0.84 e 0.3
Farelado	2.38 e 0.5
Granulado	4.75; 2.38 e 1
Farelado grosso	4.75 e 1

Fonte: Brasil (2009).

A amostra de biofertilizante bruto foi destorroada utilizando um soquete ilustrado na figura 17 e peneirada com o auxílio de um agitador mecânico de peneiras, durante dois minutos conforme mostra a figura 18.

Figura 17 – Soquete utilizado no destorroamento do biofertilizante

Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 18 – Biofertilizante sendo peneirado em agitador mecânico

Fonte: Autoria própria (2017).

Dessa maneira foram determinados os tratamentos nas faixas granulométricas, pó, farelado, granulado e farelado grosso ilustradas na figura 19. Essas foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados e encaminhadas para o laboratório de química do Ifes - campus Vitória.

Figura 19 – Faixas granulométricas obtidas após o beneficiamento

Fonte: Autoria própria (2017).

4.2.4 Determinação da curva de umidade de equilíbrio

Para elaboração da curva de equilíbrio do biofertilizante foi empregada a metodologia utilizada por David (2002) que constitui na colocação de amostras do biofertilizante beneficiado, inicialmente seco, dentro de câmaras com umidades conhecidas e controladas. Em seus interiores contiam soluções saturadas de sais, cujas atividades de água são conhecidas e, posteriormente, foram medidas as massas de água absorvidas do ar ambiente pelas amostras no decorrer do tempo até atingir os pontos de equilíbrio.

i. <u>Materiais e equipamentos</u>

- Estufa;
- Forno mufla;
- Balança analítica de precisão;
- Dessecadores;
- Cápsulas de porcelana de 130mL;

- Espátula;
- Becker de 1000mL e
- Proveta de 500mL.

ii. Procedimento experimental

Para a determinação da curva de umidade do biofertilizante beneficiado foram elaborados quatro conjuntos de câmaras de umidade. Sendo que cada conjunto havia quatro dessecadores com um determinado sal e cinco cápsulas com as amostras de uma determinada faixa granulométrica, conforme figura 20.

Figura 20 – Conjuntos de câmaras de umidade com amostras do biofertilizante

Fonte: Autoria própria (2017).

O procedimento para a montagem das câmaras de umidade foi realizado em dias diferentes para cada faixa granulométrica. Foram utilizados quatro dessecadores por vez de acordo com a sal que seria utilizado. Para o primeiro conjunto de câmaras de umidade foi utilizado o Cloreto de magnésio (MgCl), em seguida o Cloreto de Potássio (KCl) , depois o Cloreto de Sódio (NaCl) e por fim o Brometo de Sódio (NaBr).

Conforme Labuza (1982), o método considerado mais adequado para a formação de câmaras com umidades controladas é com a utilização de soluções saturadas de sais, pois estas podem liberar ou sorver água sem sofrerem alteração significativa de suas atividades de água.

Cada solução saturada de sal provoca a formação, dentro da câmara fechada, de um ambiente com umidade relativa bem definida e conhecida, conforme apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Umidade relativa dos sais que serão utilizados no experimento

Sal		Umidade relativa (%)
Fórmula	Denominação	
MgCl2	Cloreto de magnésio	32,8
NaBr	Brometo de sódio	57,6
NaCl	Cloreto de sódio	75,3
KCl	Cloreto de potássio	84,3

Fonte: adaptado de David (2002).

Para a realização destes experimentos, foi utilizado 1 Kg de cada sal puro do tipo PA (para análise). A escolha dos sais descritos na tabela 7 deu-se devido as suas umidades relativas e a sua disponibilidade no mercado.

a) Preparação das cápsulas

Foram utilizadas vinte cápsulas de porcelana (diâmetro = 95 mm), cinco para cada faixa granulométrica, estas foram lavadas com detergente neutro e água destilada. Em seguida, foram colocadas em estufa a 120°C por cinco minutos e depois encaminhadas para mufla a 550°C por uma hora (figura 21). Uma vez preparadas, as cápsulas foram mantidas em dessecador de vidro, no qual resfriaram por quarenta e cinco minutos. Para totalizar as vinte cápsulas foi necessário realizar o procedimento de calcinação na mufla por quatro vezes visto que essa comportava cinco cápsulas.

Figura 21 – Cápsulas na mufla

Fonte: Autoria própria (2017).

b) Preparação das amostras de biofertilizante

Foram retiradas por meio de quarteamento 250g de cada faixa granulométrica do biofertilizante beneficiado, totalizando vinte amostras com 50g.

d) Pesagem das cápsulas e das amostras

Cada cápsula vazia foi identificada com grafite e colocada na balança analítica. Sua massa foi determinada como P1 e a balança tarada. Em seguida, preencheu-se a cápsula com 50 g de amostra de biofertilizante, sendo a massa desta amostra úmida identificada como P2**.** Nesta pesquisa, foram utilizadas duas casas decimais na pesagem das amostras (50,00 g).

c) Secagem das amostras

As cápsulas contendo as amostras do biofertilizante foram colocadas em estufa a 104°C e deixadas por 24 horas para eliminação de toda umidade contida no biofertilizante (figura 22).

Figura 22 – Biofertilizante sendo seco em estufa

Fonte: Autoria própria (2017).

Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores contendo sílica gel para resfriamento, até a temperatura se igualar à temperatura ambiente. Após o completo resfriamento, as massas das cápsulas, contendo as amostras secas, foram medidas e identificadas por P3.

d) Preparação das soluções

Foi colocado 1 kg do sal em cada dessecador (figura 23), nesses foi acrescentada, aos poucos, água destilada previamente aquecida à temperatura de aproximadamente 40°C, nas quantidades descritas na tabela 8 (figura 24). A solução foi mexida à medida que a água foi sendo acrescentada. Sendo David (2002) o motivo de se utilizar água destilada aquecida é para garantir que a solução ficasse saturada, mesmo com a queda e equilíbrio da temperatura interna com a temperatura ambiente.

Figura 23 – Colocação do sal no dessecador

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 8 – Quantidades para a preparação das soluções

Sal	Quantidade	
	Sal (kg)	Água (mL)
MgCl2	1,0	125
NaBr	1,0	400
NaCl	1,0	300
KCl	1,0	400

Fonte: Adaptado de David (2002).

Figura 24 – Preparação das soluções

Fonte: Autoria própria (2017).

Após a preparação das soluções, foram colocadas as placas separadoras e os dessecadores foram tampados e deixados em ambiente com temperatura de 25°C a espera das amostras de biofertilizante.

e) Colocação das amostras de biofertilizante nos dessecadores com as soluções

Em cada câmara com umidade controlada, foram colocadas cinco cápsulas contendo amostras de biofertilizante seco sobre as placas separadoras (figura 25). As câmaras foram tampadas e mantidas no laboratório de química do Ifes - campus Vitória à temperatura ambiente.

Figura 25 – Câmaras de umidade com o biofertilizante

Fonte: Autoria própria (2017).

f) Acompanhamento da absorção de umidade

Seguindo a mesma metodologia utilizada por David (2002), após oito horas de permanência no interior das câmaras, as massas das amostras foram medidas e, em seguida, devolvidas para o mesmo lugar no interior das câmaras. Essa massa foi identificada como P3.

O mesmo procedimento foi executado diariamente e as massas sendo identificadas por P4, P5, P6 sucessivamente até a identificação do ponto de equilíbrio. Esse foi identificado quando não havia variação na segunda casa decimal da massa pesada.

Para cada valor de massa de amostra do biofertilizante, foi calculado o teor de sólidos, conforme equação 3.

g) Destinação final dos sais utilizados

Os sais utilizados no experimento foram armazenados no próprio recipiente e acondicionado no laboratório de química do Ifes – campus Vitória para ser utilizado futuramente (figura 26).

Figura 26 – Destinação final dos sais utilizados

Fonte: Autoria própria (2017).

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos utilizados foram: biofertilizante bruto

(T1), biofertilizante beneficiado pó (T2), biofertilizante beneficiado farelado (T3), biofertilizante beneficiado granulado (T4), biofertilizante beneficiado farelado grosso (T5).

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias de ST e densidade do biofertilizante bruto (T1) foram comparadas com as médias dos biofertilizantes beneficiados (T2, T3, T4, T5) pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade. Também foi realizado teste comparativo entre os biofertilizantes beneficiados (T2, T3, T4, T5), sendo comparadas as médias dos parâmetros ST, porosidade e densidade pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SPSS versão 21.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOFERTILIZANTE BRUTO

Na determinação de coliformes termotolerantes foi possível constatar a sua ausência no biofertilizante bruto. Além disso, não foram detectados ovos viáveis de helmintos e vírus entérico no material.

Já para as substâncias inorgânicas, as concentrações obtidas foram todas inferiores as concentrações máximas permitidas pela Resolução 375/2006 (BRASIL, 2006) e encontram-se apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Concentrações de substâncias inorgânicas detectadas no biofertilizante bruto

Substância inorgânica	Concentração detectada (mg/kg, base seca)	Concentração máxima permitida (mg/kg, base seca) Resolução 375/2006*
Arsênio	2,32	41,00
Bário	47,40	1300,00
Cádmio	0,05	39,00
Chumbo	10,05	300,00
Mercúrio	0,05	17,00
Níquel	5,71	420,00
Selênio	0,50	100,00
Zinco	128,54	2800,00
Cromo	6,91	1000,00
Molibdênio	3,54	50,00
Cobre	50,64	1500,00

Nota: *Brasil (2006)

Fonte: Autoria própria (2018).

Considerando as características microbiológicas, o biofertilizante bruto foi classificado como classe A de acordo com Resolução 375/2006 (BRASIL, 2006).

Cabe destacar que o lodo classe A pode ser utilizado para quaisquer culturas, respeitadas as restrições previstas nos arts. 12 e 15 da resolução.

As características físicas e químicas do biofertizante bruto estão apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 – Características físicas e químicas do biofertilizante bruto

Característica	Valor obtido
ST (%)	90,00
SV (%)	35,37
SF (%)	54,63
Umidade (%)	10,00
Densidade (g/cm^3)	1,27
pH	5,95

Nota: ST – Sólidos Totais; SV- Sólidos Voláteis; SF – Sólidos Fixos.

Fonte: Autoria própria (2018).

A Resolução 375/2006 (BRASIL, 2006) destaca que é importante verificar os parâmetros de ST e SV no lodo de esgoto ou produto derivado, pois indicam a redução do potencial de disseminação de doenças por meio de vetores e não apresentarem potencial de geração de odores e de atratividade de vetores, mesmo quando reumidificados.

Para tanto, a concentração de SV deve ser reduzida em 38% ou mais e a relação entre SV e ST deve ser inferior a 0,7 para o biofertilizante ser considerado um material estável. Nessa pesquisa foi encontrado 35,37% de SV e a relação entre SV e ST foi de 0,4 sendo possível afirmar que se trata de material com elevado nível de estabilização.

Com relação ao pH o valor encontrado é interessante sob ponto de vista agronômico, considerando que a faixa ideal para o desenvolvimento de culturas é de 5,5 a 6,5.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO BIOFERTILIZANTE BENEFICIADO

Na tabela 11 estão apresentados os resultados obtidos na caracterização do biofertilizante beneficiado, considerando os parâmetros sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos, umidade, densidade, porosidade e pH.

Tabela 11 – Características físicas e químicas do biofertilizante beneficiado

Parâmetro	Material beneficiado IN 25/2009* (Faixa granulométrica)			
	Pó	Farelado	Granulado	Farelado Grosso
ST (%)	86,61	85,73	87,04	86,11
SV (%)	34,33	34,08	34,60	35,42
Relação SV/ST	0,39	0,39	0,39	0,41
SF (%)	52,28	51,65	52,44	50,69
Umidade (%)	13,39	14,27	12,96	13,89
Densidade (g/cm^3)	1,26	1,26	1,26	1,27
Porosidade (%)	26,61	27,55	44,69	46,41
pH	5,95	5,95	5,95	5,95

Nota: * BRASIL (2009)

ST – Sólidos totais; SV- Sólidos voláteis; SF – Sólidos Fixos.

Fonte: Autoria própria (2018).

Dentre os resultados obtidos, cabe destacar que com a adoção dos processos de beneficiamento as quais foram submetidos o biofertilizante bruto não se pretendia interferir de forma significativa na condição de estabilização do material, bem como na sua alcalinidade. Sendo assim, a relação entre ST e SV manteve-se inferior a 0,7 e o pH não sofreu alteração.

Já com relação a ST e porosidade, a diferença nos resultados será melhor discutida na análise estatística dos valores obtidos.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Na tabela 12 estão apresentados os resultados da comparação entre as médias de ST e densidade do biofertilizante bruto (T1) e das faixas granulométricas do

biofertilizante beneficiado (T2, T3, T4, T5) pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade.

Tabela 12 – Comparação entre as médias de ST e densidade entre o biofertilizante bruto e as faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado pelo teste de Dunnett

Característica	Controle	Material beneficiado IN 25/2009** (Faixa granulométrica)			
	Bruto (T1)	Pó (T2)	Farelado (T3)	Granulado (T4)	Farelado Grosso (T5)
ST (%)	90,00	86,66*	85,74*	87,04*	86,07*
Densidade (g/cm^3)	1,27	1,26*	1,26*	1,26*	1,27

Nota: *Quando as médias de ST e densidade do biofertilizante beneficiado (T2, T3, T4, T5) apresentaram diferença estatística pelo teste de Dunnett com relação ao tratamento de referência (T1) usou-se * para identificá-lo.

**BRASIL (2009)

ST – Sólidos totais.

Fonte: Autoria própria (2018).

A capacidade de desaguamento varia de acordo com a forma em que a água está ligada às partículas do lodo. Segundo Gonçalves, Luduvice e von Sperling (2001) essas formas podem ser distribuídas em quatro classes, sendo elas, água livre, água adsorvida, água capilar e água celular e a remoção de cada tipo de água é realizada de maneira específica.

Pelo teste de Dunnett, os valores de ST apresentados para cada faixa granulométrica do biofertilizante beneficiado são diferentes, estatisticamente, quando comparados com o biofertilizante bruto.

Entende-se que devido o biofertilizante bruto possuir grãos maiores e uma heterogeneidade granulométrica é provável que o tempo e a temperatura as quais ele foi exposto não tenham sido suficientes para atingir todas as formas de água nele contida e, com isso, o teor de ST obtido para o biofertilizante bruto teve valor maior que a dos beneficiados. Essa avaliação sugere que o beneficiamento interferiu nos valores da umidade por possibilitar maior remoção das diferentes formas de água contidas no material.

O biofertilizante beneficiado apresenta teor de ST semelhante ao substrato à base de lodo de esgoto utilizado por Abreu et. al., (2017) que, na sua pesquisa, observou que as mudas produzidas com este substrato apresentaram resultados satisfatórios quando comparadas com substrato comercial à base de casca de pinheiro bioestabilizada, demonstrando assim seu potencial para uso agrícola.

O valor de densidade apresentado para o biofertilizante bruto é semelhante, estatisticamente, quando comparado ao biofertilizante beneficiado em farelado grosso, sugerindo que o mesmo volume foi ocupado pela mesma massa de material. Já quando comparado com os valores do biofertilizante beneficiado em pó, farelado e granulado houve diferença significativa, estatisticamente, provavelmente em razão da faixa granulométrica ter possibilitado uma melhor acomodação dos grãos na estrutura do material.

Para o parâmetro pH obteve-se um valor de 5,95 tanto para o biofertilizante bruto quanto para o beneficiado em todas as faixas granulométricas, podendo sugerir que este parâmetro químico não sofre alteração com o beneficiamento, considerando as faixas testadas.

Visando identificar uma faixa granulométrica ideal para comercialização do biofertilizante beneficiado comparou-se as médias de ST, porosidade e densidade pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. O resultado dessa comparação está apresentado na tabela 13. Utilizou-se letras para identificar as diferenças estatísticas entre os valores, onde letras iguais demostram semelhança estatística e letras distintas diferença estatística.

Tabela 13 – Comparação entre as médias de ST, porosidade e densidade entre as faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado pelo teste de Tukey

Característica	Material beneficiado IN 25/2009* (Faixa granulométrica)			
	Pó (T2)	Farelado (T3)	Granulado (T4)	Farelado Grosso (T5)
ST (%)	86,66a	85,74b	87,04c	86,07d
Porosidade (%)	26,61b	27,55b	44,69a	46,41a
Densidade (g/cm^3)	1,26a	1,26a	1,26a	1,27b

Nota: Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

*BRASIL (2009)

ST – Sólidos totais.

Fonte: Autoria própria (2018).

A comparação entre os valores de ST do biofertilizante beneficiado demonstrou que esses são estatisticamente diferentes nas quatro faixas granulométricas. Apesar dessa diferença estatística, Von Sperling (2005), relata que lodos com teor de ST maiores que 75% possuem características semelhantes.

Já para a variável densidade apenas na faixa granulométrica farelado grosso houve variância significativa. As demais faixas são semelhantes estatisticamente, sugerindo que o mesmo volume foi ocupado pela mesma massa de material.

Comparando os resultados de porosidade foi identificado semelhança estatística entre as faixas granulométricas pó e farelado; e granulado e farelado grosso. Isso mostra que quanto maior a granulometria do biofertilizante beneficiado, maior será sua capacidade de absorver água.

Marchini et al. (2015) constatou que o aumento da porosidade melhora as características químicas, físicas e biológicas de solo degradado, pois retêm água disponível para as plantas e fornecem abrigo para as bactérias.

Esse também é um parâmetro importante para determinação de material apropriado para embalagem, local adequado para estocagem e conservação do produto.

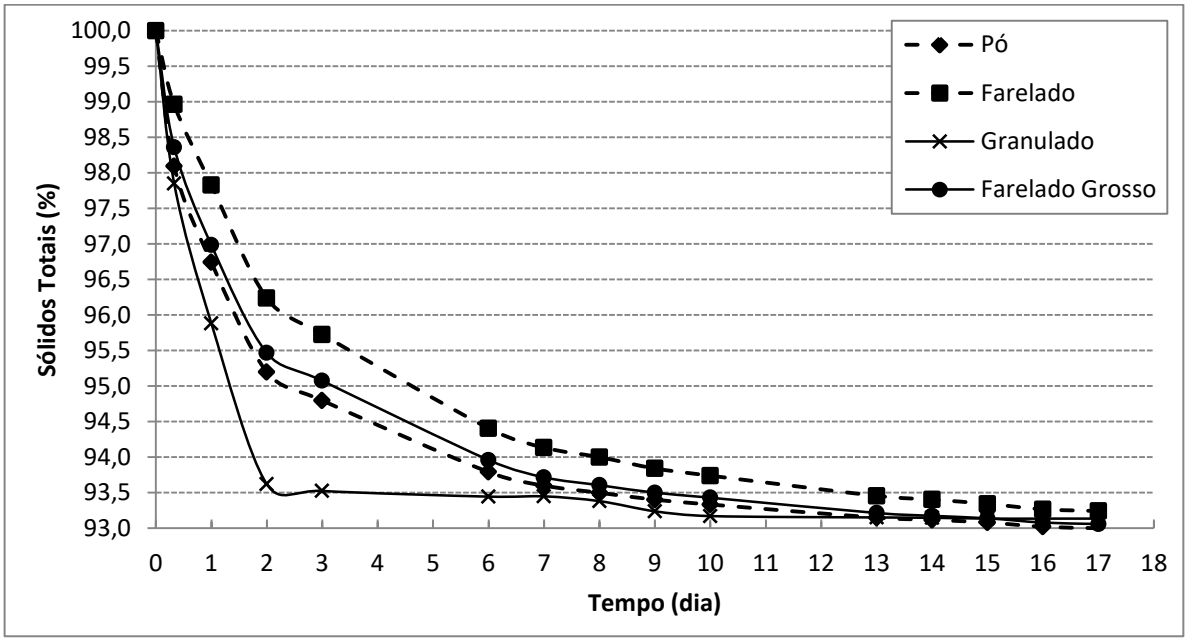
Com o manejo do biofertilizante beneficiado na faixa granulométrica pó foi possível observar a alta pulverulência do material, sendo necessária a utilização de máscara para manuseá-lo.

5.4 COMPORTAMENTO DO BIOFERTILIZANTE BENEFICIADO NAS CÂMARAS DE UMIDADE

Com os valores calculados de ST para cada pesagem foi elaborado um gráfico, onde foi relacionado o teor de sólidos, em porcentagem, com o dia em que foi efetuada a medida da massa do lodo para avaliar o comportamento temporal deste parâmetro. Dessa forma, para cada umidade relativa do ambiente e cada faixa granulométrica, foi construído um gráfico com o comportamento dos sólidos totais. Esses gráficos juntamente com os resultados das medições das massas das amostras do biofertilizante beneficiado efetuadas no decorrer dos experimentos estão apresentadas em anexo A.

A figura 27 apresenta a evolução do teor de sólidos totais das quatro faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado em câmaras com umidade relativa de 75,3%. Segundo David (2002) esse valor é comum para umidade relativa.

Figura 27 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 75,3% de umidade



Fonte: Autoria própria (2018).

Observando o comportamento do biofertilizante beneficiado em ambiente com umidade relativa de 75,3%, pode-se constatar que esse absorve gradualmente a

umidade chegando à saturação em torno do décimo terceiro dia. Com isso, de acordo com Unido (1980) pode-se afirmar que a partir desse período o biofertilizante pode sofrer processo de empedramento devido o aumento da umidade.

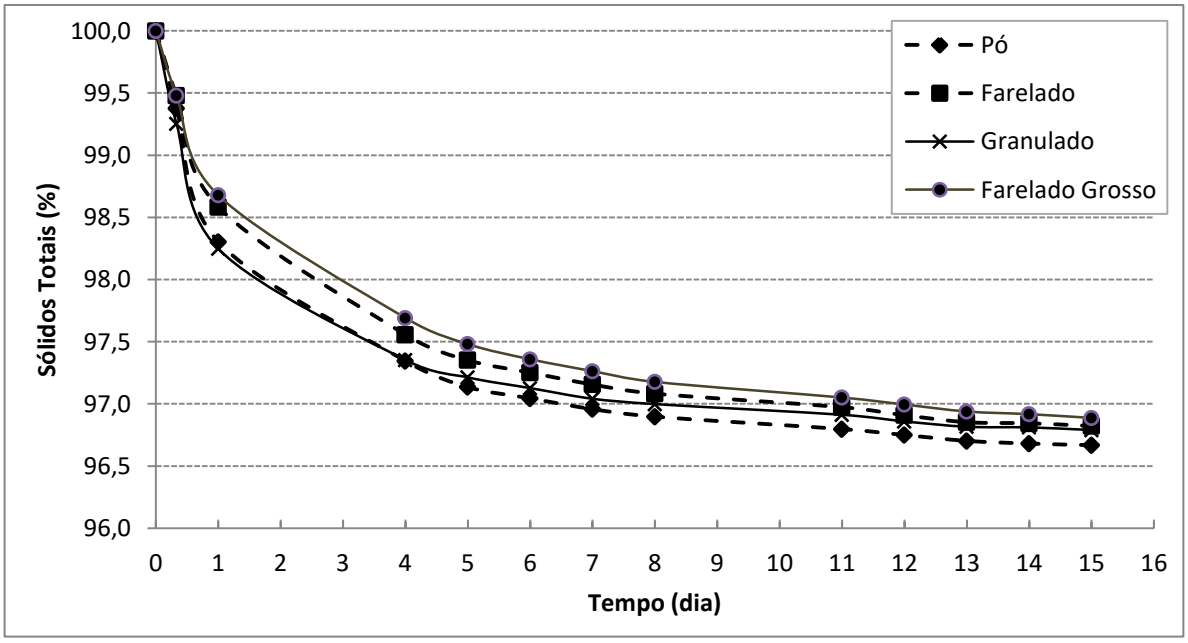
O comportamento dos ST das faixas granulométricas foi semelhante até a estabilização, porém na faixa granulado observou-se rápida absorção de umidade nos três primeiros dias, tendo pouca variação até chegar à saturação.

Devido a pouca variação dos teores de ST, a rápida absorção do biofertilizante beneficiado na faixa granulométrica granulado e a inviabilidade de utilização na faixa pó devido sua pulverulência, é possível dizer que para ambientes com umidade relativa em torno de 75,3% as faixas granulométricas ideais seriam farelado e farelado grosso.

As figuras 28, 29 e 30 apresentam as curvas de umidade das quatro faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado submetidas às demais condições de umidades relativas testadas, ou seja, 32,8%; 57,6% e 84,3%.

O comportamento dos ST das faixas granulométricas foi semelhante até a estabilização independente da umidade relativa em que estava submetida.

Figura 28 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 32,8% de umidade



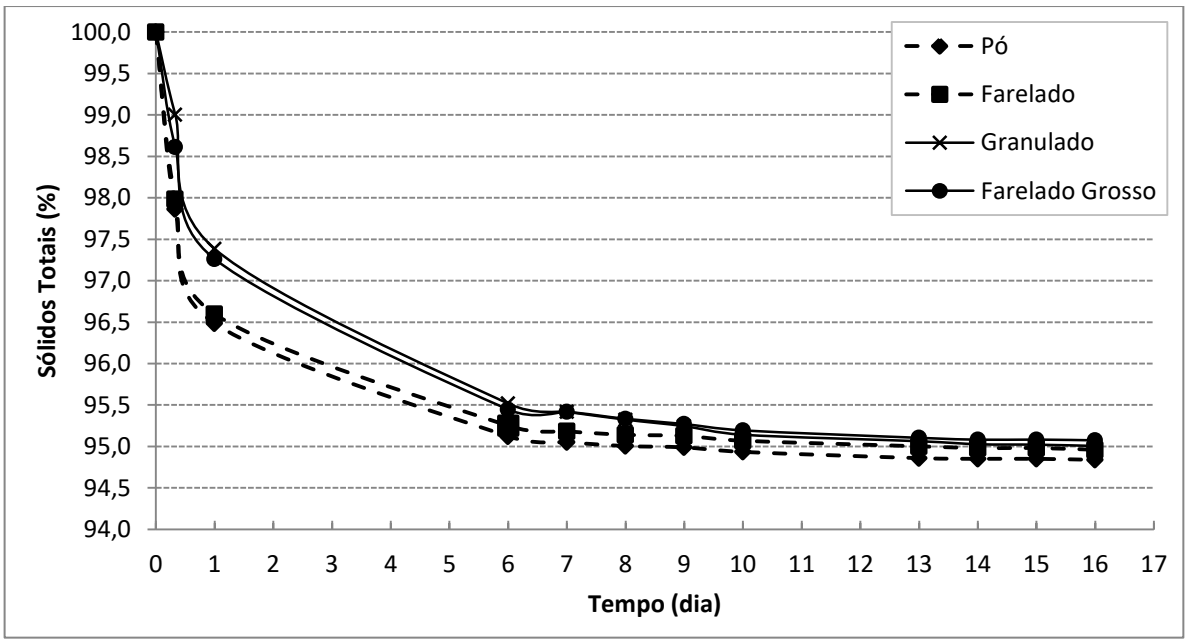
Fonte: Autoria própria (2018).

Foi possível observar, conforme figura 29, que nas câmaras com 32,80% de umidade os teores de ST do biofertilizante ficaram em torno de 97%. Já nas

câmaras com 57,6% de umidade esses valores chegaram à 95% (figura 29). E nas câmaras de umidade com 84,3% de umidade o teor de ST chegou à 92% como ilustrada a figura 30.

Isso demonstra que em umidades relativas abaixo de 75,3% a absorção será menor enquanto em umidades maiores que essa, a absorção será maior. De acordo com David (2002) isso ocorre devido a maior disponibilidade de umidade em ambientes com alta umidade relativa.

Figura 29 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 57,6% de umidade

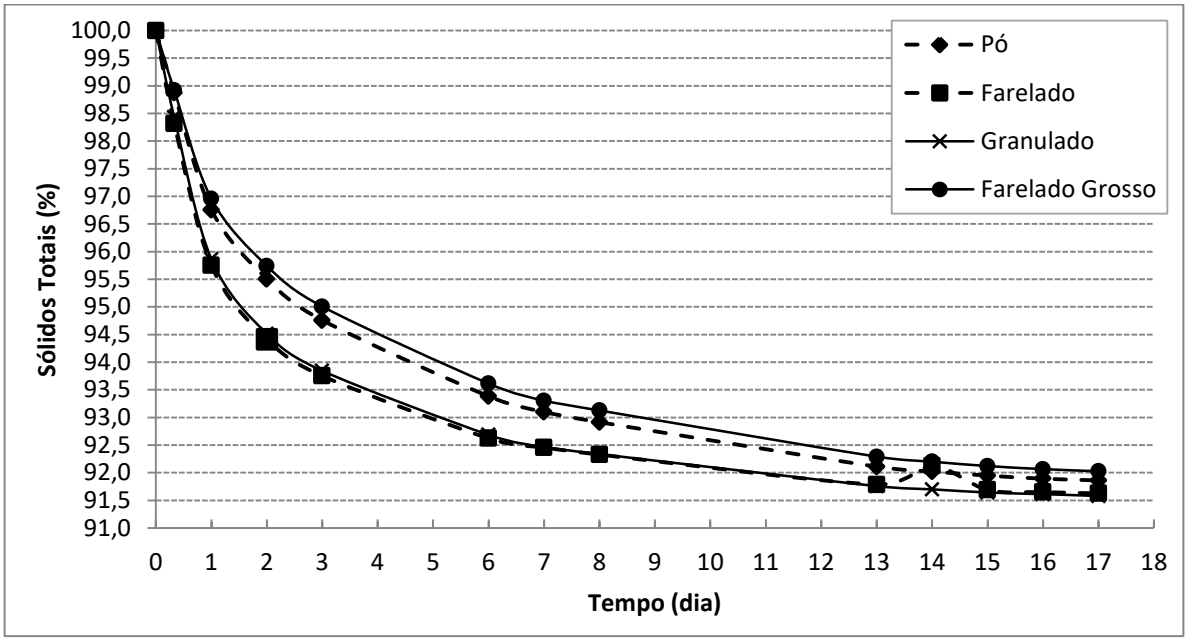


Fonte: Autoria própria (2018).

Quanto maior for a umidade relativa do ambiente onde se encontra o material maiores serão a velocidade de absorção e o tempo de estabilização da umidade conforme demonstram as figuras 28, 29, 30 e 31.

Enquanto em umidades relativas abaixo de 75,3% sua estabilização inicia-se entre o quarto e sexto dias, em umidades superiores isso ocorre em torno do décimo dia. O mesmo resultado foi encontrado por David (2002).

Figura 30 – Comportamento do biofertilizante nas quatro faixas granulométricas submetido à câmaras com 84,3% de umidade



Fonte: Autoria própria (2018).

5.5 CURVA DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DO BIOFERTILIZANTE BENEFICIADO

A curva de umidade de equilíbrio é normalmente expressa em gráfico com os valores de umidade, em base seca, e a umidade relativa do ambiente. Com as massas pesadas durante o experimento (ver anexo A) foi possível calcular as umidades em base seca no ponto de equilíbrio usando as equações 3, 6 e 7. Dessa forma, com esses valores foi possível elaborar para cada faixa granulométrica sua curva de umidade de equilíbrio. Na tabela 14 estão apresentados os valores de sólidos totais e das umidades e a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado é apresentada na figura 31.

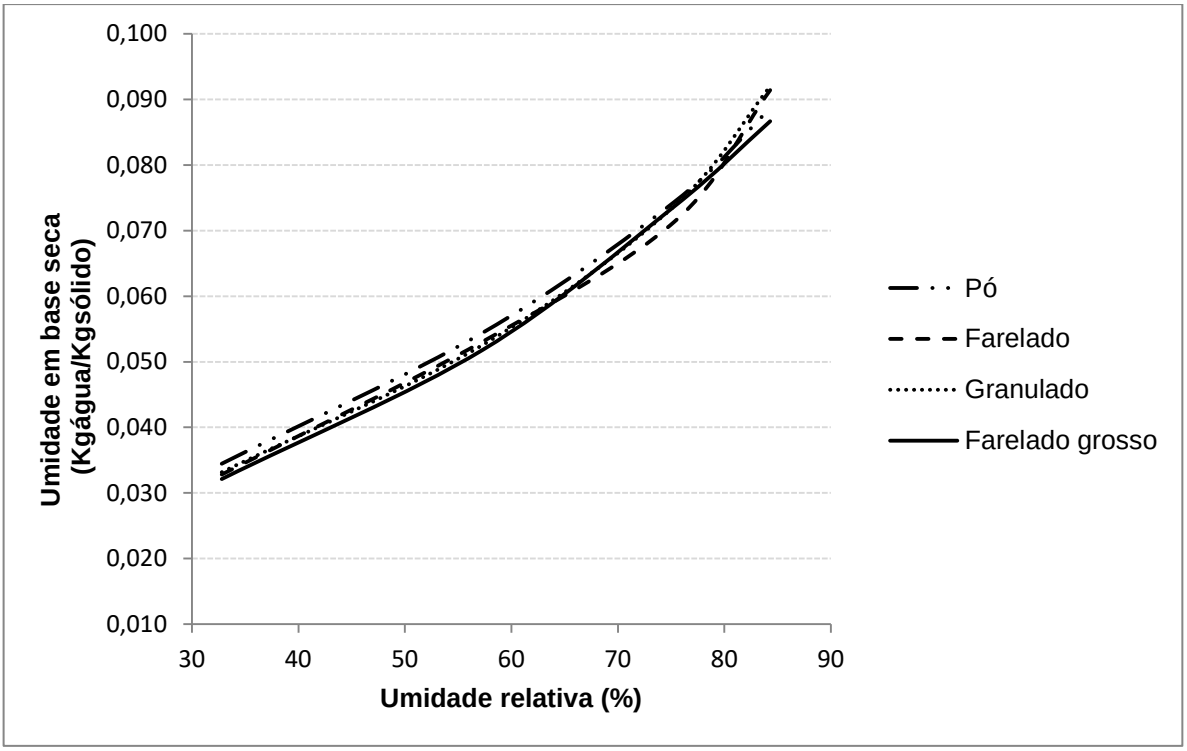
Tabela 14 – Resultados dos sólidos totais e umidades do biofertilizante beneficiado após sua estabilização

Faixa Granulométrica	Umidade relativa das câmaras	ST no ponto de equilíbrio (%)	Umidade em base seca	Umidade em base úmida (%)
Pó	32,8	96,67	0,034	3,33
	57,3	94,84	0,054	5,16
	75,3	93,08	0,074	6,92
	84,3	91,86	0,089	8,14
Farelado	32,8	96,82	0,033	3,18
	57,3	94,96	0,053	5,04
	75,3	93,34	0,071	6,66
	84,3	91,63	0,091	8,37
Granulado	32,8	96,79	0,033	3,21
	57,3	95,01	0,053	4,99
	75,3	93,13	0,074	6,87
	84,3	91,58	0,092	8,42
Farelado grosso	32,8	96,89	0,032	3,11
	57,3	95,07	0,052	4,93
	75,3	93,14	0,074	6,86
	84,3	92,03	0,087	7,97

Fonte: Autoria própria (2018).

Foi possível observar que a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado obteve a mesma tendência para as quatro faixas granulométricas conforme figura 31.

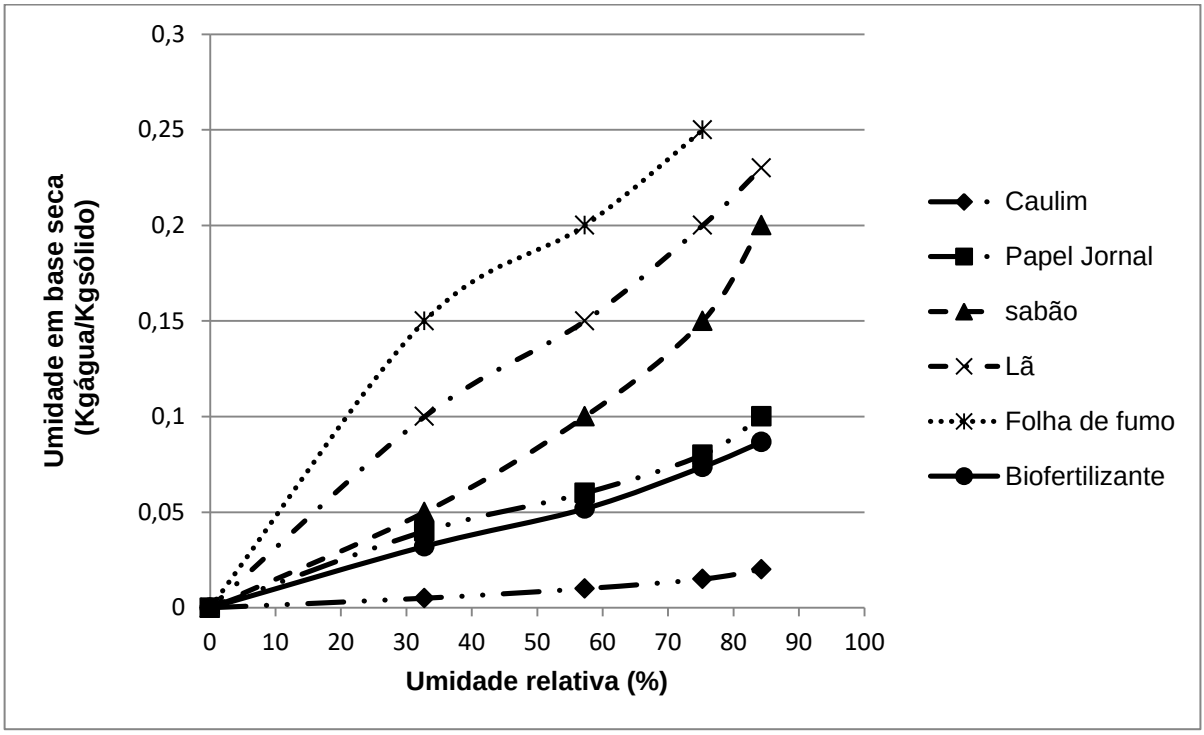
Figura 31 – Curvas de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado



Fonte: Autoria própria (2018).

Comparando a média das tendências das curvas de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado levantada nessa pesquisa com as curvas geradas por Foust et al. (1980), apresentadas na figura 6, referentes aos materiais: caulim, papel jornal, sabão, lã e folha de fumo, pode-se observar que a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado se aproxima da curva do papel jornal e entre as curvas de caulim e sabão (figura 32). Considerando que as condições de uso e possibilidades de materiais para embalagem de papel jornal não se assemelham ao biofertilizante, serão tomados como referências os materiais utilizados pra embalagens de caulim e sabão.

Figura 32 – Comparação entre a curva da umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado e de outros materiais



Fonte: Adaptado de Foust et. al (1980).

Conforme Minasolo (2017), materiais normalmente utilizados no acondicionamento destes são: papel kraft de 3 folhas, barricas de papelão com saco plástico, balde plástico, caixa de papelão e sachês plásticos.

Já sua estocagem deve ser em local seco, com boa ventilação e estocado com empilhamento máximo de dois pallets. Seu prazo de validade é em torno de doze meses a partir da data de fabricação (MINASOLO, 2017).

Como sugestão para futuras pesquisas seria interessante o acondicionamento do biofertilizante nesses diferentes tipos de embalagens para avaliar as mudanças em suas características e determinar de maneira efetiva o material ideal para embalagem, estocagem e prazo de validade.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Na caracterização do biofertilizante bruto, considerando os aspectos microbiológicos, o biofertilizante bruto, foi classificado como classe A de acordo com Resolução 375/2006 (BRASIL, 2006). Já com relação aos aspectos físicos e químicos, trata-se de um material com elevado nível de estabilização e com características ácidas. Os mesmos resultados foram observados no biofertilizante após o beneficiamento.

Na comparação do biofertilizante bruto com o beneficiado se observou que o beneficiamento interferiu nos valores da umidade contida no material. Já na densidade o biofertilizante bruto é semelhante, estatisticamente, quando comparado ao biofertilizante beneficiado em farelado grosso, sugerindo que o mesmo volume foi ocupado pela mesma massa de material, o que não acontece para as faixas pó, farelado e granulado.

Comparando as faixas granulométricas do biofertilizante beneficiado, o parâmetro ST demonstrou-se estatisticamente diferente, mas com valores superiores à 75%, o que caracteriza um material com características semelhantes. Já nos resultados de porosidade do biofertilizante beneficiado, foi identificado que quanto maior a faixa granulométrica, maior será sua capacidade de absorver água.

Em umidades relativas abaixo de 75,3% a absorção será maior em faixas granulometricas maiores. Já em ambientes onde a umidade relativa é maior, maior também será a absorção. Porém a sua estabilização será mais lenta. Já em umidades relativas baixas a absorção é menor, porém o seu tempo de estabilização é menor.

Pode-se observar que a curva de umidade de equilíbrio do biofertilizante beneficiado se aproxima da curva de umidade de equilíbrio do papel jornal o que mostra um indicativo para possíveis materiais para embalagens.

Devido a pouca variação dos teores de ST, a rápida absorção do biofertilizante beneficiado na faixa granulométrica granulado e a inviabilidade de utilização na faixa pó devido sua pulverulência, é possível dizer que para ambientes com umidade relativa em torno de 75,3% as faixas granulométricas ideais seriam farelado e farelado grosso.

Para melhor determinação dos parâmetros comerciais seria interessante realizar o estudo do comportamento desses faixas granulométricas em diferentes embalagens, podendo assim avaliar condições ideais de estocagem, embalagens e estocagem.

Para o parâmetro pH obteve-se um valor de 5,95 tanto para o biofertilizante bruto quanto para o beneficiado em todas as faixas granulométricas, demonstrando boa eficiência na absorção dos nutrientes pelas plantas, não necessitando de adição de cal virgem.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M; MARZOLA, L. B; MELO, L. A; LELES, P. S. S; ABEL, E. L. S; ALONSO, J. M. Urban solid waste in the production of Lafoensia pacari seedling. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n. 2, p. 83-87, 2017.

AINI, N; PRIHANANTO, V; WIJONARKO, G. Moisture sorption isotherm of instan corn flour from four variety of corn. **Agritech**, v.34, n. 1, p. 50-55, 2014.

ALBUQUERQUE, H. C; JUNIO, G. R. Z; SAMPAIO, R. A; FERNANDES, L. A; ZONTA, E; BARBOSA, C. F. Produção e nutrição de girassol adubado com lodo de esgoto. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.19, n. 6, p. 553-559, 2015.

ALVES, R.M.V., BORDIM, M.R.; GARCIA, E.E.C. Aplicação de um modelo matemático na estimativa da vida-de-prateleira de biscoitos “cream craker”. **Coletânea do ITAL**, Campinas, v.26, n.1, p.89-101, 1996.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - APHA/AWWA/WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2005.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E.S. Gestão de Biossólidos: Situação e perspectivas. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1.; 1998, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba: SANEPAR, p. 1-7, 1998.

ARAÚJO, E. F; CORRÊA, P. C; SILVA, R. F. Comparação de modelos matemáticos para descrição das curvas de dessorção de sementes de milho-doce**. Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 991-995, 2001.

ARLINDO, D. M., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIREDO, R.M.F. Armazenamento de pimentão em pó em embalagem de polietileno. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais,** v. 9, p.111-118, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS. **Estudo macroeconômico da embalagem**. São Paulo. Disponível em: <http://www.abre.org.br/setor/dados-de-mercado>. Acesso em: 29 de jan. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise granulométrica do solo. Rio de Janeiro: 1984. 13p.

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**. 2015. 214f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BARBOSA, G. M. C; FILHO, J. T. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Semina: ciências agrárias**, v. 27, n. 4, p.565-580, 2006.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p. Disponível em http://www.cnpma.embrapa.br/download/LivroLodoEsgoto.pdf

BHATTARAI, R; KALITA, P. K; YATSU, S; HOWARD, H. R; SVENDSEN, N. G. Evaluation of compost blankets for erosion control from disturbed lands. **Journal of Environmental Management**, p. 803-812, 2011.

BITTENCOURT, S; SERRAT, B. M; ANDREOLI, C. V; MOURA, E. N; TOGNY, F. L; SILVA, L. A. T. P. Lodo de esgoto submetidos ao revolvimento: efeito sobre sólidos totais, pH e ovos viáveis de helmitos. **Revista Acadêmica de Ciência Agrária e Ambiental**, v. 11, p. S191-S200, 2013.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná:** aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06. 2014. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BITTENCOURT, S; SERRAT, B. M; AISSE, M. M; GOMES, D. Sewage Sludge Usagein Agricultura in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. **Water Air Soil Pollut,** p. 2-8, 2014.

BONINI, C. S. B; ALVES, M. C; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n. 4, p. 388-393, 2015.

BRASIL. Lei n.° 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa o Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1980.

BRASIL. Decreto n.° 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Aprova o Regulamento da Lei n.° 6.894, de 16 de dezembro de 1980. **Diário Oficial [da] República Federativa o Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2004a.

BRASIL. Instrução Normativa n.° 15, de 22 de dezembro de 2004. Regulamenta o registro dos estabelecimentos e dos produtos destinados à alimentação animal **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2004b.

BRASIL. Resolução n.° 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Ministério do Meio Ambiente,** Poder Executivo, Brasília, DF, 2006.

BRASIL. Instrução Normativa n.° 25, de 23 de julho de 2009. Estabelece normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2009.

BRASIL. Lei n.° 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa o Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2010.

BRENNAN, J.G. **Food Processing Handbook**. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 559p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKENA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI, 1992. 450p.

BUREAU, G; MULTON, J. L. **Embalaje de los alimentos de gran consumo.** Zaragoza: Acribia, 146 p, 1995.

CABRAL, A. C. D; ORTIZ, S. A; MADI, L. F. C; SOLER, R. M.; GAZETA, E. F. Embalagem das frutas tropicais e seus produtos. In: **Aspectos tecnológicos das frutas tropicais e seus produtos.** Campinas: ITAL, cap. 4, p. 199-296, 1980.

CIESLIK, B. M; NAMIESNIK, J; KONIECZKA, P. Review of sewage sudge management: standards, regulations and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p .1-15, 2015.

CHEN, C.; JAYAS, D. S. Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.41, n.6, p. 1755-1760, 1998.

COMPANHIA ESPIRITO SANTENSE DE SANEAMENTO (CESAN). **Plano operacional de gerenciamento de resíduos sólidos, sistema de esgotamento sanitário Ulisses Guimarães.** Espírito Santo: CESAN, 2011.

CORRÊA, P. C; JUNIOR, P. C. A; STRINGHETA, P. C. Estudo do fenômeno de adsroção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p .19-25, 2000.

CORRÊA, P.C.; MOURE, J. Higroscopicidad y propiedades térmicas de semillas de sorgo. **Alimetancion Equipos y Tecnologia**, Madri, v.29, n.1, p.149-153, 2000.

CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F. M; BOTELHO, S. C; GONELI, A. L. D. Isortermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p.1047-1052, 2014.

COSCIONE, A. R; SILVA, L. F. M; DE MARIA, I. C; ANDRADE, C. A; FERRACINE, V. L. Solução do solo e análise de componentes principais para monitoramento da

aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p .1654-1662, 2014.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodo de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 2002.

EARLE,R.L.,EARLE,M, D. **Unit Operations in Food Processing.** New Zealand: NZIFST, 1983,

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

FARIA, M. F. **Avaliação da persistência de microrganismos patogênicos em solo cultivado com eucalipto e fertilizado com lodo de esgoto sanitário**. Botucatu, 2015. 60 f. Dissertação (Faculdade de Ciências Agronômicas) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2015.

FELLOWS, P. **Food processing technology:** principles and practice. USA: CRC Press, 2000, 563p.

FERNANDES, Fernando; LOPES, Deize D; ANDREOLI, Cleverson V; SILVA, Sandra M C P. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, Cleverson V; SPERLING, Marcos V; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001. cap. 7, p. 299-317.

FOUST, A. S; WENZEL, L.A; CLUMP, C. W; MAUS, L; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias.** 2 ed. Rio de Janerio: LTC, 1982.

GARCIA, E. E. C; PADULA, M; SARANTÒPOULOS, C. I. G. L. **Embalagens plásticas:** Propriedades de barreira. Campinas: ITAL, 1989. 44p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2002.

GONÇALVES, R. F; LUDUVICE, M; SPERLING, M. V. Remoção da umidade de lodos de esgoto. In: ANDREOLI, Cleverson V; SPERLING, Marcos V; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001. cap. 5, p. 159-257.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL – INCAPER. **Calagem.** Espírito Santo: Vitória, 2007.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 5 ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2009.

KACPRZAK , M; NECZAJ, E; FIJAŁKOWSKI, K; GROBELAK, A; GROSSER, A; WORWAG, M; RORAT, A; BRATTEBO, A; ALMÅS, A; SINGH, B. Sewage sludge

disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research,** v. 156, p. 39-46, 2017.

KELESSIDIS, A; STASINAKIS, A. S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. **Waste Management,** v.32, p. 1186-1195, 2012.

LABUZA, T.P. Shelf-life of coffee and tea. In:**Shelf-life dating of foods**. Westport: Food & Nutrition Press Inc., 1982. p.359-372.

LARA, AI; ANDREOLI, C,V; PEGORINI, E, S. Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. In: ANDREOLI, Cleverson V; SPERLING, Marcos V; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001. cap. 11, p. 465-482.

LANTIM, A. P. M; BERNARDO, C. O; MARTINS, I. B. A; FRANCISCO, M. R; SANTOS, M. B; MELO, N. R. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Revista Polímeros**, v.26, p. 82-92, 2016.

LIMA, Márcia R P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. 2009. 286f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Escola Politécnica da Univesidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LOBO, T. F; FILHO, H. G; BULL, L. T; KUMMER, A. C. B. Efeito do lodo de esgoto e do nitrogênio nos fatores produtivos do girassol . **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 5, p .504-509, 2013.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V; SPERLING, M. V; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001. cap. 4, p. 123-157.

MARCHINI, D. C; LING, T. C; ALVES, M. C; CRESTANA, S; FILHO, S. N. S; ARRUDA, O. G.. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n. 6, p. 574-580, 2015.

MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. **Journal of Food Engineering**, Londres, v.7, n.1, p.63-78, 1988.

MINASOLO COMÉRCIO E REPRESENTAÇÕES LTDA. **Boletim técnico**. São Paulo, 2017.

MILORGANITE. **Milorganite.** Disponível em: <www.milorganite.com>. Acesso em: 07 jul. 2018.

MORETTI, S. M. L; BERTONCINI, E. I; JUNIOR, C. H. A. F. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em nitossolo háplico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.39, p. 1796-1805, 2015.

MOREY, V.; WILCKE, W. F.; MERONUCK, R. A., LANG, J. P. Relationship between equilibrium relative humidity and deterioration of shelled corn. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.38, n.4, p. 1139-1145,1995.

OLIVEIRA, J. R; MATA, M. E. R. C; DUARTE, M. E. M. Isotermas de dessorção de grãos de feijão macassar verde. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 6, n. 1, p .61-70, 2004.

OMANA, M; CORTES, F; GARCIA, A. Isotermas de sorcíon de agua en residuos de extracción de jugo de naranja. **Facultad de Ciencias Agropecuarias**, v. 8, n. 1, p .61-67, 2010.

PEDROZA, M. M; VIEIRA, G. E. G; SOUSA, J. F; PICKLER, A. C; LEAL, E. R M; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, n. 16, p .151-160, 2010.

PIRES, A. M. M. **Uso agrícola do lodo de esgoto:** aspectos legais. São Paulo: Embrapa, 2006.

PINTO, M, T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, Cleverson V; SPERLING, Marcos V; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001. cap. 6, p.261-297.

REAMI, L.; BERTONCINI, E. I. O valor do lodo de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, DA ABES, O ENCONTRO TÉCNICO AESABESP E A 28ª FEIRA NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE – FENASAN, 2017, São Paulo. **Anais eletrônicos**...São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/aesabesp/detalhes-2527_ o-valor-do-lodo-de-esgoto>. Acesso em: 23 janeiro 2017.

ROSSI, S. J; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários.** Ed. Shigueo Watanabe, Publicação ACIESP n° 22, 1980.

RIGO, M. M; RAMOS, R. R; CERQUEIRA, A. A; SOUZA, P. S; MARQUES, M. R. Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. **Gaia Scientia**, v.8, n. 1, p. 174-186, 2014.

RIZZARDINI, C. B; GOI, D. Sustainability of Domestic Sewage Sludge Disposal. **Sustainability,** v.6, p. 2424-2434, 2014

RUSCIOLELLI, L. B; COSTA, A. O. S; JUNIOR, E. F. C. Determinação da curva de equílibrio higroscópico do urucum. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 1803-1810, 2011.

SANTOS, F. E. V; KUNZ, S. H; CALDEIRA, M. V. W; AZEVEDO, C. H. S; RANGEL, O. J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 9, p. 971-979, 2014.

SANTOS, D. S; TESHIMA, E; DIAS, S. M. F; ARAUJO, R. A; SILVA, C. M. R. Efeito da secagem em leito nas características físico-química e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, 2016.

SAMANIEGO-ESGUERRA, C.M.; BOAG, I.F.; ROBERTSON, G.L. Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables. **Journal of Food Engineering**, Londres, v.13, n.2, p.115-133, 1991.

SILVA, N; JUNQUEIRA, V, C, A; SILVEIRA, N, F A; TANIWAKI, M, H, SANTOS, R, F, S; GOMES, R, A, R. **Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos e água**. São Paulo: Varela Editora, 2010.

STOLOFF, L. Calibration of water activity measuring instruments and devides: collaborative study. **Journal of the Associantion of Official Aalitical Chemists,** v. 61, n. 5, p.1166-1178, 1978.

SPIESS, W. E. L; WOLF, W. R. **Critical evalution of methods to determine moisture sorption ishotherms.** In: ROCKLAND, L. B; BEUCHAT, L. R. Water Activity: Theory and Applications to food. New York, Marcel Dekker Inc., New York, p. 215-233, 1987.

SUN, D.W.; WOODS, J.L. The selection of sorption isotherm equations for wheat based on the fitting of available data. **Journal of Stored Product Research**, Londres, v.30, n.1, p.27-43, 1994.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering:** treatment, disposal, and reuse. 4. ed. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw-Hill., 2003, 1771p.

TERA AMBIENTAL. **Tera Ambiental**. Disponível em: < www.teraambiental.com.br/fertilizante-organico-terafertil >. Acesso em: 07 jul. 2018.

TRIGUEIRO, R. M; GUERRINI, I. A. Utilização de lodo na produção de mudas de aroeira-pimenteira. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p .657-665, 2014.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION – UNIDO. **Fertilizer manual.** Development and transfer of technology – series n. 13, New York, 1980.

UNITED STATES ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. **Test methods for evaluating solid waste, physical chemical methods**. Washington: 9045D, 4 ed, 2004. Disponível em: <www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/9045d.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2018.

VON SPERLING, M; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V; SPERLING, M. V; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001. cap. 2, p. 17-67.

VON SPERLING, M. Tratamento e disposição final do lodo. In: _____. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. cap. 4 e cap. 5, p. 249-388.

WEIAND, C.; RAFAEL, T.; **Separação e redução de sólidos**. 2010. Disponível em:< http://reducaosolidos.tripod.com/>. Acesso em: 12 de abr. 2017.

ANEXO A – Teor de ST do biofertilizante beneficiado em cada câmara de umidade com o decorrer do tempo

Câmara com 32,8% de umidade

Faixa granulométrica	Sólidos Totais (%)												
	10-ago	após 8h	11-ago	14-ago	15-ago	16-ago	17-ago	18-ago	21-ago	22-ago	23-ago	24-ago	25-ago
Pó	100,00	99,38	98,30	97,35	97,14	97,04	96,96	96,90	96,80	96,75	96,70	96,68	96,67
Farelado	100,00	99,48	98,58	97,56	97,35	97,25	97,16	97,08	96,97	96,91	96,85	96,84	96,82
Granulado	100,00	99,25	98,25	97,35	97,21	97,13	97,04	97,00	96,91	96,86	96,82	96,81	96,79
Farelado Grosso	100,00	99,48	98,68	97,69	97,48	97,36	97,26	97,18	97,05	96,99	96,94	96,92	96,89

Câmara com 57,6% de umidade

Faixa granulométrica	Sólidos Totais (%)												
	10-out	Após 8h	11-out	16-out	17-out	18-out	19-out	20-out	23-out	24-out	25-out	26-out	27-out
Pó	100,00	97,86	96,48	95,12	95,05	95,01	95,01	94,99	94,93	94,86	94,85	94,85	94,84
Farelado	100,00	97,98	96,60	95,25	95,18	95,14	95,14	95,13	95,07	95,00	94,98	94,98	94,96
Farelado Grosso	100,00	98,61	97,26	95,45	95,42	95,33	95,34	95,27	95,19	95,10	95,08	95,08	95,07
Granulado	100,00	99,00	97,38	95,52	95,42	95,32	95,31	95,25	95,14	95,06	95,03	95,02	95,01

Câmara com 75,3% de umidade

Faixa granulométrica	Sólidos Totais (%)														
	19-set	após 8h	20-set	21-set	25-ago	25-set	26-set	27-set	28-set	29-set	2-out	3-out	4-out	5-out	6-out
Pó	100,00	98,09	96,74	95,20	94,80	93,79	93,60	93,50	93,40	93,33	93,15	93,12	93,08	93,02	93,00
Farelado	100,00	98,96	97,83	96,24	95,72	94,40	94,13	94,00	93,84	93,74	93,45	93,40	93,34	93,26	93,24
Granulado	100,00	97,85	95,88	93,62	93,52	93,44	93,45	93,38	93,24	93,17	93,15	93,15	93,13	93,13	93,13
Farelado Grosso	100,00	98,36	96,98	95,46	95,07	93,96	93,72	93,60	93,50	93,43	93,21	93,17	93,14	93,08	93,06

Câmara com 84,3% de umidade

Faixa granulométrica	Sólidos Totais (%)												
	29-ago	29-ago - após 8h	30-ago	31-ago	25-ago	4-set	5-set	6-set	11-set	12-set	13-set	14-set	15-set
Pó	100,00	98,87	96,76	95,50	94,76	93,38	93,10	92,91	92,11	92,02	91,95	91,89	91,86
Farelado	100,00	98,32	95,75	94,41	93,75	92,62	92,45	92,33	91,79	92,13	91,69	91,65	91,63
Farelado Grosso	100,00	98,92	96,96	95,74	95,01	93,61	93,30	93,13	92,29	92,20	92,12	92,07	92,03
Granulado	100,00	98,43	95,86	94,51	93,84	92,69	92,46	92,34	91,76	91,70	91,64	91,61	91,58