UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIELLE BOLANDIM COSTA

USO DE PROCESSOS FÍSICO E FÍSICO-QUÍMICO NA SEPARAÇÃO DE LODO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ETE DE ILHA SOLTEIRA-SP E DIFERENTES PROCESSOS DE SECAGEM

ILHA SOLTEIRA
2015

DANIELLE BOLANDIM COSTA

USO DE PROCESSOS FÍSICO E FÍSICO-QUÍMICO NA SEPARAÇÃO DE LODO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ETE DE ILHA SOLTEIRA-SP E DIFERENTES PROCESSOS DE SECAGEM

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO
Orientador
Prof. Dr. WILLIAM DEODATO ISIQUE
Profª. Drª. GLAUCIA AMORIM FARIA
Co-orientadores

ILHA SOLTEIRA
2015

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C837u

Costa, Danielle Bolandim.
Uso de processos físico e físico-químico na separação de lodo de lagoas de estabilização da ETE de Ilha Solteira-SP e diferentes processos de secagem / Danielle Bolandim Costa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
113 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2015

Orientador: Tsunao Matsumoto
Co-orientadores: William Deodato Isique, Glaucia Amorim Faria
Inclui bibliografia

1. Engenharia sanitária. 2. Recursos hídricos. 3. Tecnologias ambientais. 4. Lodo de lagoa de estabilização. 5. Adensamento de lodo. 6. Secagem de lodo.

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Uso de processos físico e físico-químico na separação de lodo de lagoas de estabilização da ETE de Ilha Solteira-SP e diferentes processos de secagem

AUTORA: DANIELLE BOLANDIM COSTA
ORIENTADOR: Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. WILLIAM DEODATO ISIQUE
CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. GLAUCIA AMORIM FARIA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL , Área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. LILIANE LAZZARI ALBERTIN
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. SÉRVIO TÚLIO ALVES CASSINI
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Federal do Espirito Santo

Data da realização: 29 de maio de 2015.

DEDICO

Aos meus pais, Geraldo Gonçalves Costa e Inez Aparecida Bolandim, que me educaram e me possibilitaram mais essa conquista.

Aos meus irmãos, Elton Bolandim e Aline Bolandim Costa, que sempre torcem por mim.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela proteção e força para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Geraldo e Inez, irmãos Elton e Aline, ao Rafael e toda minha família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Tsunao Matsumoto, pela oportunidade e confiança, além do apoio e profissionalismo.

Aos professores Tsunao, Liliane, Luzenira, Sérgio e Edson Tangerino, pelos ensinamentos e apoio.

Aos co-orientadores, Prof. Dr. William Deodato Isique e Profª. Drª. Glaucia Amorim Faria, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus parceiros Letícia, Leonardo e Luan, pesquisadores de iniciação científica da graduação, que muito fizeram para a concretização deste trabalho.

Ao senhor Cavassano pela disponibilidade na manutenção da estrutura do trabalho.

As amigas Ana Beatriz e Natalia, por todo apoio e companheirismo.

A todos amigos de turma, em especial, Moacir, Bruno, Daiane, Danilo e Bruno Cesar, pelo grande apoio no laboratório.

À amiga Franciane pelo incentivo para ingressar no curso.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, ao Departamento de Engenharia Civil e Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, a Biblioteca e Seção Técnica, e principalmente aos funcionários de cada área que possibilitam a realização de trabalhos como este.

À Comissão Examinadora, composta pelo Prof. Dr. Tsunao Matsumoto, Profª. Drª. Liliane Lazzari Albertin e Prof. Dr. Sérvio Túlio Alves Cassini, pelo empenho em trazer melhorias para este trabalho e aos Suplentes, pela disposição em colaborar.

À FAPESP pelo investimento financeiro que possibilitou a realização deste trabalho (Processo 12/13889-3) e pela concessão de bolsas de estudos aos alunos de iniciação científica Letícia Amadeu Freddi (Processo 13/13247-4) e Luan de Souza Leite (Processo 14/00291-8). À PIBIC pela concessão de bolsa de estudos ao aluno de iniciação científica Leonardo Melotto. À CAPES pela bolsa de estudos de mestrado concedida a mim. Tais investimentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, muito obrigada!

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar o uso de Decantador de Coluna (DC) seguido de Floco-Decantador de Manta de Lodo (FDML) com aplicação de coagulante hidroxi-cloreto de alumínio (PAC) na separação de fases (sólida e líquida) de lodo de lagoa de estabilização e a secagem do lodo adensado, de forma natural em estufa agrícola e artificial com lâmpadas de radiação infravermelha, visando facilidade de manuseio do mesmo. O desafio foi a busca de alternativa técnica, econômica e ambientalmente vantajosa de tratamento e destinação final do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Em conjunto com o sistema proposto foram analisados parâmetros como Turbidez, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Fósforo Total e Nitrogênio Total, de amostras de lodo bruto afluente do DC e efluente do FDML. Foram verificadas diferenças estatísticas nos valores de Turbidez, DBO, DQO, ST e também para Nitrogênio e Fósforo, com remoção média de 85,79% e 98,65%, respectivamente. Na secagem em estufa agrícola, no décimo dia de secagem os lodos adensados no DC alcançaram em média 35,25% de umidade e os lodos adensados do FDML 14,53% de umidade. Os maiores teores de Nitrogênio e Fósforo foram encontrados nos lodos secos do FDML, em média 37,35 g/kg e 2937,50 mg/L, respectivamente. Na secagem de lodo sem drenagem, por radiação infravermelha, alcançou-se a estabilização da massa das amostras em 3,5; 4 e 5,5 horas respectivamente com quatro, três e duas lâmpadas acesas. Com a drenagem a redução da umidade foi acelerada. O posicionamento das lâmpadas, em relação as amostras, influenciou o resultado de secagem de modo relativo.

Palavras-chave: Lodo de lagoa de estabilização. Decantador de coluna. Floco-decantador de manta de lodo. Adensamento. Secagem.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the use of Column Settler (CS) followed by Sludge Blanket Settler Flocculator (SBSF) with application of Poly Aluminum Chloride as coagulant, in the phase separation (solid and liquid) of stabilization pond sludge and drying the dense sludge, naturally and artificially, in agricultural greenhouse and with infrared lamps radiation, aiming to ease of handling. The challenge was the search for alternative technique, economically and environmentally advantageous treatment and disposal Wastewater Treatment Plants Sludge (WWTP). In conjunction with the proposed system were analyzed parameters such as turbidity, Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Solids (TS), Total Phosphorus and Total Nitrogen, raw sludge samples tributary of the CS and effluent the SBSF. Statistical differences were observed in the turbidity values, BOD, COD, TS and also to nitrogen and phosphorus, with average removal of 85.79% and 98.65%, respectively. Drying in a greenhouse on the tenth day of drying the sludge compacted in CS were on average 35.25% of moisture and the dense mud from SBSF 14.53% humidity. The highest levels of nitrogen and phosphorus were found in the dried sludge SBSF on average 37.35 g/kg and 2937.50 mg/L, respectively. On drying without drainage sludge by infrared radiation has reached the stabilization of the mass of samples in 3.5; 4 and 5.5 hours respectively with four, three and two lighted lamps. With drainage to reduce the moisture was accelerated. The positioning of the lamps, for the samples, influence on the result of the drying mode.

Keywords: Sludge stabilization pond. Column settler. Sludge blanket settler flocculator. Thickening. Drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição dos sólidos nos esgotos 16
Figura 2 – Quadro de municípios por região, total e com tratamento do efluente sanitário realizado nas Estações de Tratamento de Efluente - ETEs, por tipo de tratamento. 18
Figura 3 – Esquema simplificado do funcionamento de uma lagoa facultativa – seção longitudinal. 18
Figura 4 – Quadro da relação entre a umidade e as propriedades mecânicas do lodo 22
Figura 5 – Quadro das características do lodo gerado e a ser disposto, segundo o tratamento de esgotos por lagoa facultativa. 23
Figura 6 – Desenho do Decantador de Coluna 25
Figura 7 – Vista lateral do módulo experimental 26
Figura 8 – Estágios de formação da manta de lodo: dispersa e densa, respectivamente. 27
Figura 9 – Fluxograma esquemático da instalação experimental 28
Figura 10 – Processo de formação de manta de lodo no Floco Decantador de Manta de Lodo. 28
Figura 11 – Esquema do protótipo do leito de drenagem 29
Figura 12 – Quadro com as principais vantagens e desvantagens dos leitos de secagem 31
Figura 13 – Modelo dos leitos utilizados na pesquisa: (a) descobertos e (b) cobertos 32
Figura 14 – Esquema representativo do protótipo do leito de secagem com cobertura plástica. 33
Figura 15 – Leitos de secagem forçada: (a) modelo dos leitos, (b) disposição dos leitos. 34
Figura 16 – Mecanismo de secagem 36
Figura 17 – Migração da água no interior do lodo 36
Figura 18 – Alguns microrganismos encontrados no lodo e doenças causadas no homem 37
Figura 19 – Esquema resumido do plano de reciclagem de lodo 44
Figura 20 – Projeto das Lagoas de Estabilização da ETE Ilha Solteira, São Paulo, Brasil 47
Figura 21 – Imagem aérea da ETE de Ilha Solteira - SP. 47
Figura 22 – Reservatórios de armazenamento de lodo bruto 48
Figura 23 – Ensaio em reatores estáticos ‘Jarteste’ 49
Figura 24 – Esquema da instalação experimental 50
Figura 25 – Decantador de Coluna seguido de Floco-Decantador de Manta de Lodo 51
Figura 26 – Fluxograma do sistema 52
Figura 27 – Processo de decantação 54
Figura 28 – Sobrenadante levado para a rede de esgoto 54
Figura 29 – Sistema DC-FDML em funcionamento 54
Figura 30 – Bandeja de fundo perfurado 55
Figura 31 – Bandeja de fundo perfurado revestida com manta sintética 55
Figura 32 – Leito de drenagem constituído de bandeja de fundo perfurado revestida com manta sintética sobre bandeja sem furos. 56
Figura 33 – Leito de drenagem em uso, mostrando o acúmulo de líquido drenado. 56
Figura 34 – Leito de drenagem com lodo retirado do DC (LD1-DC) 56
Figura 35 – Leito de drenagem com lodo retirado do FDML (LD-FDML) 56
Figura 36 – Planta baixa da estrutura da estufa agrícola com dimensões em cm e direção do norte magnético no qual ela foi construída 57
Figura 37 – Vista frontal da estrutura da estufa com dimensões em cm e dimensões do metalon em mm 58
Figura 38 – Estufa agrícola construída para secagem do lodo 58
Figura 39 – 3M Petrifilm para contagem de coliformes *E. coli* 63

Figura 40 – 3M Petrifilm inoculados e incubados a 45°C. 63
Figura 41 – Secador térmico antes da colocação da placa frontal, para visualização das 4 lâmpadas ligadas 64
Figura 42 – Lâmpada Infravermelha 64
Figura 43 – Plaqueta refratária utilizada 64
Figura 44 – Secador térmico 64
Figura 45 – Lodo adensado por DC e após três dias de secagem em estufa agrícola 65
Figura 46 – Posicionamento das lâmpadas e placas de Petri (numeração de 1 a 8) 66
Figura 47 – Combinações de secagem. a) primeira lâmpada ligada b) terceira lâmpada ligada 66
Figura 48 – Diferença visual de amostra do lodo bruto e do sobrenadante 67
Figura 49 – Lodo adensado disposto no leito de secagem. 74
Figura 50 – Leitos com lodo adensado ao longo da secagem natural 74
Figura 51 – Gráfico do teor de umidade médio do lodo de lagoa de estabilização adensado durante o tempo de secagem em estufa agrícola. 76
Figura 52 – Gráfico com linhas de tendência de secagem dos lodos oriundos do DC e do FDML 76
Figura 53 – Evolução da secagem do lodo retirado do DC, com 1, 2, 5 e 10 dias de secagem respectivamente. 79
Figura 54 – Evolução da secagem do lodo retirado do FDML, com 3, 5 e 7 dias de secagem respectivamente. 79
Figura 55 – Gráfico da relação entre a umidade final e a espessura da camada de lodo final, após 10 dias de secagem em estufa agrícola. 80
Figura 56 – Amostras de lodo após 10 dias de secagem em estufa agrícola 81
Figura 57 – Análise de coliformes no lodo bruto da repetição 11 84
Figura 58 – Análise de coliformes no sobrenadante da repetição 11 84
Figura 59 – Análise de coliformes no lodo seco do DC e FDML da repetição 11 84
Figura 60 – Análise de coliformes no lodo bruto da repetição 12 85
Figura 61 – Análise de coliformes no sobrenadante da repetição 12 85
Figura 62 – Análise de coliformes no lodo seco do DC e FDML da repetição 12 85
Figura 63 – Análise de coliformes no lodo bruto da repetição 16 86
Figura 64 – Análise de coliformes no sobrenadante da repetição 16 86
Figura 65 – Análise de coliformes no lodo seco do DC e FDML da repetição 16 86
Figura 66 – Amostras após secagem: a) FDML e b) DC, respectivamente. 87
Figura 67 – Curva da variação média da umidade do lodo do DC no processo de secagem térmica por radiação infravermelha 88
Figura 68 – Curva da variação média da umidade do lodo do FDML no processo de secagem térmica por radiação infravermelha 88
Figura 69 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Terceira lâmpada do secador acesa (série 1) 91
Figura 70 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Terceira lâmpada do secador acesa (série 3) 91
Figura 71 – Curvas de secagem com a terceira lâmpada do secador acesa 92
Figura 72 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Primeira lâmpada do secador acesa (série 1) 94
Figura 73 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Primeira lâmpada do secador acesa (série 2) 94
Figura 74 – Curvas de secagem com a primeira lâmpada do secador acesa 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de caracterização do lodo. 59
Tabela 2 – Parâmetros do lodo de lagoa de estabilização analisados, métodos e equipamentos utilizados. 60
Tabela 3 – Classificação da correlação baseada no Coeficiente de Correlação de Pearson 62
Tabela 4 – Características do lodo bruto afluente do DC. 68
Tabela 5 – Características do sobrenadante efluente do FDML. 69
Tabela 6 – Características do lodo bruto afluente do DC e do sobrenadante efluente do FDML. 72
Tabela 7 – Umidade média do lodo, previamente adensado por DC e por FDML, durante o período de 10 dias de secagem em estufa agrícola. 75
Tabela 8 – Desdobramento da relação entre a umidade do lodo adensado e os decantadores utilizados no adensamento (DC e FDML) e os dias de secagem em estufa agrícola. 75
Tabela 9 – Coeficientes de correlação de Pearson 77
Tabela 10 – Teores de nutrientes e sólidos dos lodos secos oriundos de material adensado do DC e do FDML. 81
Tabela 11 – Contagem de coliformes termotolerantes 83
Tabela 12 – Contagem de *E. coli* 83
Tabela 13 – Perda de umidade do lodo das placas de Petri colocadas nas oito diferentes posições, com somente a terceira lâmpada do secador acesa. 90
Tabela 14 – Média da perda de umidade do lodo das placas de Petri (1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8), com somente a terceira lâmpada do secador acesa. 90
Tabela 15 – Dados das curvas de secagem com a terceira lâmpada do secador acesa 92
Tabela 16 – Perda de umidade do lodo das placas de Petri colocadas nas oito diferentes posições, com somente a primeira lâmpada do secador acesa. 93
Tabela 17 – Média da perda de umidade do lodo das placas de Petri (1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8), com somente a primeira lâmpada do secador acesa. 93
Tabela 18 – Dados das curvas de secagem com a primeira lâmpada do secador acesa 95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DC	Decantador de Coluna
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FDML	Floco Decantador de Manta de Lodo
SDF	Sólidos Dissolvidos Fixos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SDV	Sólidos Dissolvidos Voláteis
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1.	Objetivo geral	15
2.2.	Objetivos específicos	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Esgoto sanitário	16
3.2	Sistema de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização	17
3.3	Formação, constituição e acúmulo de lodo em lagoas de estabilização	19
3.4	Processamento do lodo	21
3.5	Decantador de Coluna	23
3.6	Floco-Decantador de Manta de Lodo	25
3.7	Drenagem / Desaguamento	29
3.8	Secagem	29
3.8.1	Secagem natural de lodo	30
3.8.2	Secagem artificial de lodo	33
3.9	Riscos ambientais do lodo de esgoto	36
3.10	Disposição final do lodo	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	Área de coleta do lodo	46
4.2	Armazenamento do lodo	48
4.3	Ensaio preliminar ‘Jarteste’	49
4.4	Instalação experimental	50
4.5	Funcionamento do sistema Decantador de Coluna – Floco-Decantador de Manta de Lodo	52
4.6	Drenagem	55
4.7	Secagem	56
4.7.1	Secagem em estufa agrícola	57
4.7.2	Secagem por radiação infravermelha	64
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Sistema Decantador de Coluna – Floco-Decantador de Manta de Lodo	67
5.2	Secagem em estufa agrícola	74
5.3	Secagem por radiação infravermelha	87
6.	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
	ANEXO A – Dados climáticos de Ilha Solteira referentes aos dias de secagem	

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é ferramenta básica para a melhoria das condições de vida de uma população. O abastecimento de água, o esgotamento sanitário, o manejo de águas pluviais e o manejo de resíduos são alguns dos requisitos para uma gestão mais adequada ao desenvolvimento das pessoas e do ambiente em que vivem.

No Brasil, a situação dos municípios é bastante desigual quanto ao esgotamento sanitário, contudo a demanda por melhorias gerais é crescente nesse serviço básico. Em função da grande disponibilidade de área, do clima quente e da facilidade operacional, o sistema de tratamento de esgotos por lagoas de estabilização é o mais utilizado no País (VON SPERLING, 2002).

Assim como os outros tipos de tratamento de esgoto, o sistema por lagoas gera um subproduto denominado lodo de esgoto. Os lodos brutos contêm, normalmente, de 88% a 99,75% de umidade, que correspondem a um percentual de 0,25% a 12% de sólidos totais e se encontram na forma líquida ou semi-sólida (LIMA, 2010).

Ao longo dos anos de funcionamento das lagoas, o lodo vai se acumulando, podendo interferir na eficiência do sistema. O correto tratamento e disposição deste resíduo deveriam fazer parte do projeto desde a sua concepção, entretanto não é essa a realidade encontrada nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) brasileiras, onde essa questão constitui hoje um dos grandes problemas operacionais. São facilmente encontradas no País estações nas quais as quantidades de lodo acumuladas são tão grandes que este aflora na superfície das lagoas.

Segundo Von Sperling et. al. (2001), as principais etapas do gerenciamento do lodo são adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação, higienização e disposição final. Os dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB (IBGE, 2010) mostram que a disposição final em aterros sanitários, mesmo sendo considerada uma disposição sem fins benéficos, foi a principal forma de descarte de lodo no Brasil em 2008, sendo apontada em 41,42% dos 1091 municípios que realizaram descarte de lodo no País.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, criada pela Lei nº 12.305, de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 2010, prevê a redução de resíduos sólidos urbanos úmidos dispostos em aterros sanitários, desta forma esse tipo comum de descarte do lodo deve ser eliminado no País. A nova legislação prioriza a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e a destinação final ambientalmente segura dos resíduos sólidos, nesta ordem. Com isso as Estações de Tratamento de Esgoto devem reestruturar-se e incluir em suas atividades o processamento do lodo para fins de reuso. Para isso, as empresas de

saneamento também precisam estabelecer critérios para o recebimento de esgotos, já que as características deste determinarão as possibilidades de reuso.

De acordo com Souza (2012), o custo para o tratamento e disposição final dos lodos gerados em uma ETE é da ordem de 20% a 40% do custo operacional de toda a estação. Somados o alto custo, a elevada produção de lodo e a perspectiva de melhorias no saneamento básico nacional, além da recém criada Política Nacional de Resíduos Sólidos, eleva-se o desafio da busca por novas tecnologias de manejo desse resíduo.

Diante deste cenário, este trabalho se propõe a dar suporte ao gerenciamento do lodo gerado nas ETEs que utilizam o sistema de lagoa de estabilização, com o estudo de processos simplificados e alternativos, que poderão trazer contribuições importante sob os aspectos ambiental, econômico e social. O estudo avalia a viabilidade de processos de separação e secagem de lodo de lagoas de estabilização como alternativa para o desassoreamento das lagoas, uma vez que a redução dos volumes de lodo contribui na melhoria da eficiência do sistema de tratamento e na redução da poluição do solo e dos corpos d'água. Além do estudo para uma destinação final ambientalmente segura deste resíduo sólido, como por exemplo, a utilização deste na agricultura, o que pode contribuir para reduzir o consumo de fertilizantes inorgânicos, devido à presença de nutrientes essenciais ao crescimento das plantas e matéria orgânica para condicionamento do solo, denotando assim uma redução de custos e melhoria na produtividade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

A pesquisa teve como objetivo geral a avaliação de um sistema de separação e secagem de lodo de lagoa de estabilização da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Ilha Solteira – SP.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar os lodos gerados e derivados de sistema 'ETE – Lagoa Facultativa'

- Avaliar um sistema proposto de separação de fase sólida de lodos de lagoa facultativa

- Verificar as eficiências de separação de sólidos e remoção de nutrientes de lodos de lagoa facultativa

- Avaliar a eficiência de processos de secagem por estufa agrícola e por radiação infravermelha propostos para lodos gerados e derivados de lagoa facultativa.

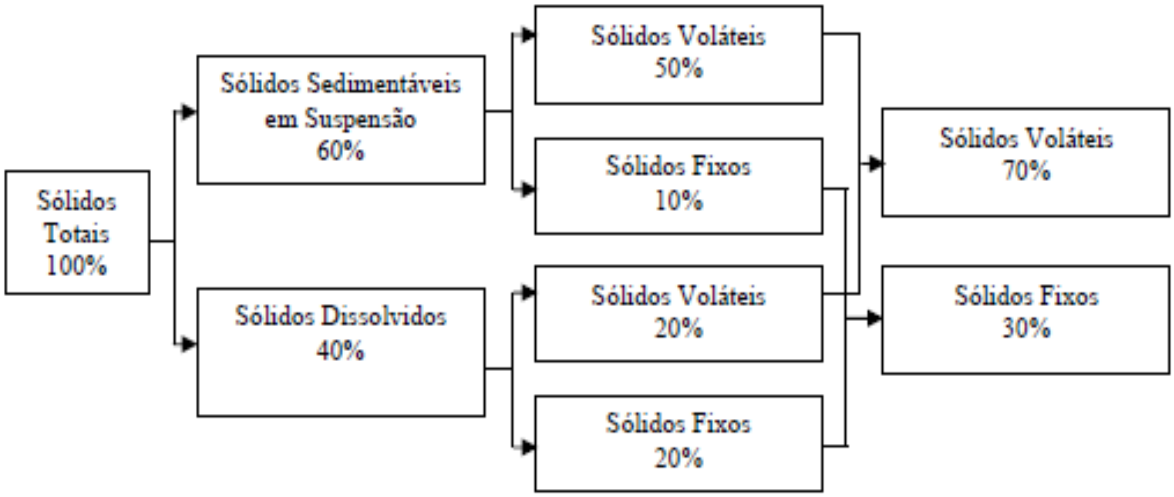
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Esgoto sanitário

O esgoto sanitário, sem separação de materiais de origem, é constituído por águas que foram utilizadas em banheiros, cozinhas, lavanderias, possuindo em sua composição fezes, urina, sabões e restos de comida, dentre outros compostos orgânicos e inorgânicos. Sua composição é aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos que se compõem de proteínas, carboidratos, óleos e graxas, nutrientes como nitrogênio e fósforo, produtos químicos, defensivos agrícolas como os agrotóxicos e alguns metais pesados (CAMPOS et al., 1999). Do total de sólidos encontrados nos esgotos cerca de 30% são de origem inorgânica, como metais, areia e sais, e 70% de compostos orgânicos (MARA, 1976).

A Figura 1 indica a classificação e as frações dos sólidos que compõem o esgoto.

Figura 1 - Composição dos sólidos nos esgotos



Fonte: Jordão e Pessoa (1982).

As características do esgoto podem retratar a realidade de comunidades, que diferem desde hábitos alimentares, produção per capita de esgoto e a concentração de organismos patógenos, que servem como indicadores da qualidade de vida de determinada comunidade.

Algumas características conferem às águas residuárias um aspecto indesejável do ponto de vista físico, químico ou biológico (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

3.2 Sistema de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização

Os sistemas de lagoas de estabilização constituem a forma mais simples para o tratamento dos esgotos. Há diversas variantes dos sistemas de lagoas de estabilização, com diferentes níveis de simplicidade operacional e requisitos de área. Entre os sistemas de lagoas estão: lagoas facultativas, sistema de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, lagoas aeradas facultativas e sistema de lagoas aeradas de mistura completa seguidas por lagoas de decantação. De maneira geral, as lagoas de estabilização são bastante indicadas para regiões de clima quente e países em desenvolvimento, devido a disponibilidade de área em um grande número de localidades, ao clima favorável (temperatura e insolação elevadas), a operação simples e a necessidade de poucos ou nenhum equipamento (VON SPERLING, 2002).

Uma lagoa de estabilização de águas residuárias é uma estrutura simples, na verdade um reservatório escavado no solo. Quando as águas residuárias são lançadas na lagoa se realiza na mesma, de forma expontânea, um processo com o nome de auto-depuração, ou estabilização natural, com a ocorrência de fenômenos do tipo físico, químico, bioquímico e biológico (AISSE, 2000).

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2008 (IBGE, 2010) aponta os principais sistemas de tratamento de efluentes adotados nos 1513 municípios onde havia ETEs no ano da pesquisa. Dentre os processos citados, as lagoas facultativas representaram o sistema mais utilizado (672 municípios), conforme detalhado na Figura 2.

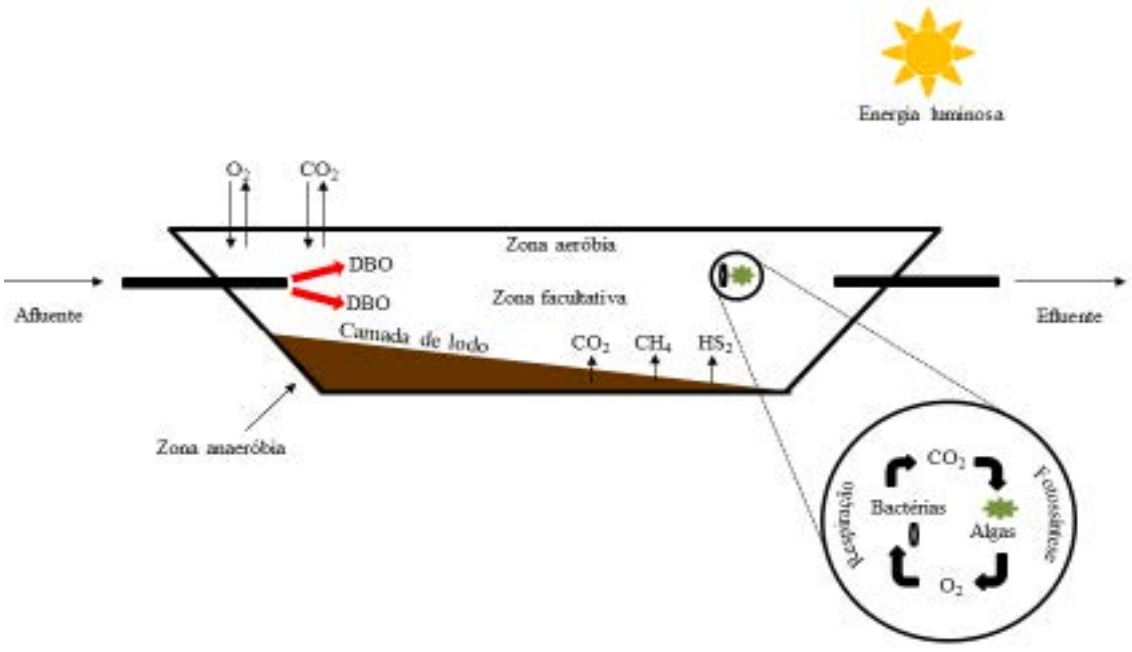
Dentro das lagoas facultativas ocorrem três zonas de tratamento dos esgotos: zona aeróbica, zona facultativa e zona anaeróbia. A matéria orgânica em suspensão sedimenta constituindo o lodo de fundo – zona anaeróbia – onde ocorre a decomposição por microorganismos anaeróbios. A matéria orgânica dissolvida permanece dispersa, sendo que na camada mais superficial – zona aeróbia – ela é oxidada por meio da respiração aeróbia. O oxigênio é suprido ao meio pela fotossíntese realizada pelas algas, mantendo-se um equilíbrio entre o consumo e produção de oxigênio e gás carbônico. As bactérias consomem oxigênio e produzem gás carbônico. Na zona intermediária, onde a penetração da luz solar é menor, a partir de uma certa profundidade vai ocorrer a ausência de oxigênio livre. Essa zona onde grupos de bactérias sobrevivem tanto na presença de oxigênio (condições aeróbias) quanto na de nitratos (condições anóxicas) e sulfatos e CO2 (condições anaeróbias) é denominada zona facultativa (VON SPERLING, 2005). A Figura 3 representa um esquema simplificado do funcionamento de uma lagoa facultativa.

Figura 2 – Quadro de municípios por região, total e com tratamento do efluente sanitário realizado nas Estações de Tratamento de Efluente - ETEs, por tipo de tratamento.

Unidades Da Federação	Municípios														
	Total	Com tratamento do efluente sanitário realizado nas ETEs													
		Total	Tipo de tratamento												
			FB	RA	VO	LA	LAn	LAe	LAer	LF	LM	LMa	FS	WET. Solo PA	Outro
Brasil	5 564	1513	317	188	565	27	431	131	93	672	65	238	20	109	129
N	449	35	6	4	14	2	11	10	4	19	2	6	1	4	2
NE	1 793	308	67	20	84	4	68	29	26	130	25	90	5	33	43
SE	1668	782	151	123	238	14	251	56	42	387	25	78	11	42	54
S	1188	271	82	34	178	6	49	22	8	70	6	16	3	28	20
CO	466	117	11	7	51	1	52	14	13	66	7	48	-	2	10

Nota: FB: Filtro Biológico; RA: Reator Anaeróbio; VO: Valo de Oxidação; LA: Lodo Ativado; LAn: Lagoa Anaeróbia; LAe: Lagoa Aeróbia; LAer: Lagoa Aerada; LF: Lagoa Facultativa; LM: Lagoa Mista; LMa: Lagoa de Maturação; FS: Fossa Séptica; WET: Wetlands; PA: Plantas Aquáticas; N: Norte; NE: Nordeste; SE: Sudeste; S: Sul; CO: Centro-Oeste. Nota: O município pode apresentar mais de um tipo de tratamento do efluente sanitário.
Fonte: Adaptado de IBGE (2010).

Figura 3 – Esquema simplificado do funcionamento de uma lagoa facultativa – seção longitudinal.



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2002).

3.3 Formação, constituição e acúmulo de lodo em lagoas de estabilização

A produção de lodo a ser gerado é função do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida. Em princípio, todos os processos de tratamento biológico geram lodo. Os processos que recebem o esgoto bruto em decantadores primários geram o lodo primário, composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. Na etapa biológica de tratamento, tem-se o assim denominado lodo secundário, lodo biológico ou lodo excedente. Este lodo é a própria biomassa que cresceu às custas do alimento fornecido pelo esgoto afluente (VON SPERLING, 2005).

O termo "lodo" tem sido utilizado para designar a fase sólida do tratamento de esgotos. Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, a qual compõe o lodo secundário, constituído principalmente de sólidos biológicos, e por esta razão também denominado biossólido. Para que este termo possa ser adotado é necessário ainda que suas características químicas e biológicas sejam compatíveis com uma utilização produtiva, como, por exemplo, na agricultura. O termo "biossólido" é uma forma de ressaltar os seus aspectos benéficos, valorizando a utilização produtiva, em comparação com a mera disposição final improdutiva (VON SPERLING, 2005).

Pedroza et al. (2010) estimaram a produção de lodo no Brasil entre 150 e 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Considerando que apenas 30% da população urbana tinha seu esgoto coletado e tratado, é de se esperar que a geração de lodo superaria 400 mil toneladas por ano, caso os esgotos fossem totalmente tratados no País.

O lodo produzido no tratamento de esgotos se acumula no fundo das lagoas de estabilização ao longo dos anos de funcionamento, sem a necessidade de remoção durante vários anos, contudo há um momento em que seu grande acúmulo diminui a eficiência do sistema, comprometendo a qualidade do efluente final em termos de sólidos em suspensão e matéria orgânica. A taxa de acúmulo média de lodo em lagoas facultativas é da ordem de 0,03 a 0,08 m^3/hab.ano, a altura e as características da camada de lodo variam ao longo das lagoas (GONÇALVES, 1999).

As características do lodo armazenado nas lagoas de estabilização são função do tempo de retenção deste na lagoa, usualmente da ordem de alguns a vários anos. Neste período, o lodo sofre adensamento e digestão anaeróbia, o que se reflete nos elevados teores de sólidos totais (ST) e na baixa relação de sólidos voláteis / sólidos totais (SV/ST). O lodo de

lagoas operando há vários anos usualmente se apresenta bem digerido, com teores de SV/ST inferiores a 50% (GONÇALVES, 1999).

Os lodos brutos contêm, normalmente, de 88% a 99,75% de umidade, que correspondem a um percentual de 0,25% a 12% de sólidos totais e se encontram na forma líquida ou semi-sólida, dependendo da operação e do processo adotado no tratamento da fase líquida (LIMA, 2010).

Outra característica do lodo é sua rica composição em nutrientes, como nitrogênio e fósforo, devido ao processo de lagoas de estabilização apresentar baixo desempenho na remoção destes (PIVELI et al., 2008). Esses nutrientes são importantes nos processos fotossintéticos, sendo responsáveis, muitas vezes, pela proliferação de algas nos ambientes aquáticos (VON SPERLING, 1998). As algas são extremamente importantes dentro do sistema de tratamento com lagoas de estabilização, são elas que fornecem o oxigênio para as bactérias degradarem a matéria orgânica (simbiose natural), mas quando o efluente sai do sistema de tratamento as algas tornam-se um inconveniente podendo demandar oxigênio nos corpos receptores e causar a eutrofização dos corpos aquáticos (CARVALHO et al, 2006). A remoção das algas proporciona ao efluente um melhor aspecto estético, como também diminui a DBO e DQO, reduzindo assim os riscos de consumo de oxigênio e a contaminação dos mananciais (ARAÚJO, 2004). Ainda dentro do sistema de tratamento, a proliferação demasiada de algas também gera um grande problema nas lagoas facultativas, o excesso de produção primária, que resulta no aumento de parâmetros de referência, alterando a qualidade.

A respeito de coliformes, os teores situam-se entre 10^2 e 10^4 CF/g ST, ocorrendo uma mortandade dos mesmos durante o período de acúmulo na lagoa (GONÇALVES, 1999). Os ovos de helmintos apresentam-se em grandes quantidades no lodo de lagoas, uma vez que o principal mecanismo de remoção dos ovos da fase líquida é a sedimentação. As contagens variam bastante de ETE para ETE, em função da variabilidade das contagens no esgoto bruto das localidades. O longo período de digestão do lodo na lagoa parece contribuir com a redução da viabilidade, no entanto, é importante destacar que mesmo após vários anos, o lodo contém ainda ovos viáveis, o que deve ser levado em conta no seu gerenciamento (GONÇALVES, 1999).

Devido ao acúmulo de lodo em ETEs, ao aumento do número de ETEs e a necessidade de se atender as legislações ambientais de lançamento de efluentes e de disposição final de lodo, o tratamento deste vem ganhando expressão no Brasil. A remoção do lodo gerado nas lagoas deve ser bem planejada uma vez que a técnica utilizada pode alterar suas características (aumentar umidade) e dificultar sua disposição final (PEDROZA et al., 2010).

3.4 Processamento do lodo

O tratamento do lodo tem como propósito gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar o manuseio e, consequentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes (CASSINI, 2003). Segundo Metcalf e Eddy (1991) os principais métodos para o processamento do lodo numa ETE são: pré-tratamento, adensamento, estabilização, condicionamento, desinfecção, desidratação, secagem, compostagem e redução térmica.

Segundo Gonçalves et al (2001), os principais processos utilizados para o adensamento do lodo são: adensadores por gravidade, flotadores por ar dissolvido, centrífugas e prensas desaguadoras. Adensadores por gravidade possuem uma estrutura similar à de decantadores, onde usualmente o formato é circular, a alimentação central, a saída do lodo pelo fundo e a saída do sobrenadante pela periferia.

A desidratação do lodo pode ser feita de diversas maneiras. Nos processos de secagem natural ao ar livre, destacam-se os leitos de secagem convencionais, contudo, em locais onde não há disponibilidade de área, em razões de 20 hab/m², deve-se optar por equipamentos mecanizados (PULKOW; AISSE, 1996).

Para Van Haandel e Lettinga (1994) o tempo total necessário para um ciclo de secagem do lodo (Tt) num leito se compõe de quatro períodos diferentes, dado pela Equação 1.

$$\mathrm{T}t = \mathrm{T1} + \mathrm{T2} + \mathrm{T3} + \mathrm{T4} \quad (1)$$

Na qual:

T1 = Tempo para preparação do leito e descarga do lodo

T2 = Tempo de percolação

T3 = Tempo de evaporação para se atingir a fração desejada de sólidos

T4 = Tempo para remoção dos sólidos secos

Os períodos T1 e T4 dependem essencialmente de fatores relacionados com a gerência do leito.

Segundo os autores, a água no lodo pode ser dividida em quatro classes distintas, de acordo com a facilidade de separação:

- Água livre - Pode ser removida por gravidade (adensamento, flotação).

- Água adsorvida - Pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de floculante.

- Água capilar - Mantém-se adsorvida à fase sólida por força capilar, distinguindo-se da água adsorvida pela necessidade de uma força maior para sua separação.

- Água celular - É parte da fase sólida e só pode ser removida através de uma mudança no estado de agregação da água, isto é, através de congelamento, evaporação ou lise celular.

A parte sólida do lodo pode ser classificada segundo o tamanho e a fração orgânica. Em relação ao tamanho das partículas é representada pelos sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos. Em relação à matéria orgânica, os sólidos dividem-se em fixos ou inorgânicos (SF) e sólidos voláteis ou orgânicos (SV). A relação entre os sólidos voláteis e os sólidos totais indica a fração orgânica dos sólidos do lodo, e o nível de digestão no lodo. A fração volátil do lodo digerido (SV/ST) situa-se entre 0,60 e 0,65, enquanto lodos não digeridos apresentam valores de SV/ST entre 0,75 e 0,80 (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

A relação entre o teor de sólidos secos e a umidade em um lodo se dá da seguinte forma, como mostrado na Equação 2:

$$Umidade\ (\%) = 100 - Sólidos\ secos\ (\%) \qquad (2)$$

Uma massa de lodo com umidade de 80% possui teor de sólidos de 20%. Assim, em cada 100 kg de lodo úmido, 80 kg são de água e 20 kg são de sólidos. Quando disposta em uma área de 1m², corresponderá a uma carga de aplicação de 20 kgSST/m².

Supondo que a massa de sólidos não varie durante a evaporação, é possível determinar a umidade do lodo, basta dividir a massa de água nas amostras de lodo pela massa total (Equação 3).

$$U = \frac{Ma}{(Ms+Ma)} = \frac{(Mt-Ms)}{Mt} \qquad (3)$$

U: umidade do lodo

Mt: massa total de lodo úmido (kg)

Ma: massa de água no lodo (kg)

Ms: massa dos sólidos do lodo (kg)

A umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo, sendo que estas influenciam o seu tipo de manuseio e de disposição final. A relação entre a umidade e as propriedades mecânicas encontra-se na Figura 4.

Figura 4 – Quadro da relação entre a umidade e as propriedades mecânicas do lodo

Umidade	Teor de sólidos secos	Propriedades mecânicas do lodo
100% a 75%	0% a 25%	Lodo fluido
75% a 65%	25% a 35%	Torta semi-sólida
65% a 40%	35% a 60%	Sólido duro
40% a 15%	60% a 85%	Lodo em grânulos
15% a 0%	85% a 100%	Lodo desintegrado em pó fino

Fonte: Van Haandel e Lettinga (1994)

Na medida em que a percentagem de água do lodo diminui, o lodo se torna pastoso, perdendo a característica de um fluido, tornando-se uma torta semi-sólida, quando a umidade está entre 65% e 75%, obtendo consistência sólida para umidade abaixo de 65% e sendo considerado um sólido duro quando a umidade é inferior a 40%. Caso a umidade do lodo seja inferior a 15%, o mesmo tende a se desintegrar, formando um pó fino. O lodo pode ter seu volume final reduzido a 10% do seu volume inicial, mostrando assim a vantagem da secagem.

A Figura 5 apresenta valores típicos de geração de lodo líquido (a ser tratado) e de lodo desidratado (a ser disposto). A massa de lodo, expressa como sólidos, representa a fração sólida do lodo gerado. O restante do lodo é constituído por pura água. O cálculo do volume per capta de lodo produzido por dia é feito tendo por base a carga per capta diária e a concentração de sólidos secos.

Figura 5 – Quadro das características do lodo gerado e a ser disposto, segundo o tratamento de esgotos por lagoa facultativa.

Lodo líquido (a ser tratado)	Teor de sólidos secos (%)	5-15
	Massa de lodo (gSS/hab.d)	12-32
	Volume de lodo (L/hab.d)	0,1-0,25
Lodo desidratado (a ser disposto)	Teor de sólidos secos (%)	30-40
	Massa de lodo (gSS/hab.d)	20-25
	Volume de lodo (L/hab.d)	0,05-0,08

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

Outra importante etapa do processamento do lodo é a higienização, a qual busca garantir um nível de patogenicidade que, ao ser disposto no solo, o lodo não cause riscos à população nem ao meio ambiente e somente após esse processo é que o lodo estará pronto para ser transportado. O tempo para conclusão da higienização depende do tipo de processo adotado pela unidade de gerenciamento e de sua eficiência, variando de zero, na secagem térmica, a 30/60 dias na caleação (VON SPERLING, 2001).

3.5 Decantador de Coluna

No tratamento de esgotos, tem-se basicamente quatro tipos distintos de sedimentação, sendo: Discreta, Floculenta, Zonal e Compressão. É provável que mais de um tipo ocorra em um dado tempo, sendo também possível que os quatro ocorram simultaneamente. Quando no tratamento se tem uma concentração de sólidos bastante elevada, destaca-se a sedimentação por compressão. A compressão ocorre devido ao peso das partículas, constantemente adicionadas como resultado da sedimentação das partículas situadas no líquido sobrenadante.

Com a compressão, parte da água é removida da matriz do floco, reduzindo o seu volume (VON SPERLING, 1996).

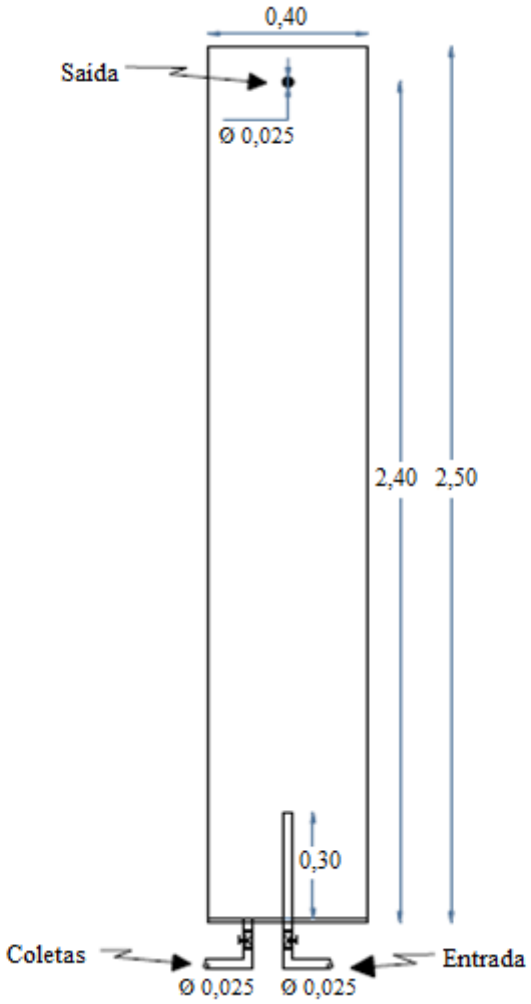
A sedimentação é uma operação física de separação de partículas sólidas com densidade superior à do líquido circundante. Em um tanque em que a velocidade de fluxo de água é bem baixa, as partículas tendem a ir para o fundo sob a influência da gravidade. O líquido sobrenadante torna-se em consequência clarificado, enquanto as partículas no fundo formam uma camada de lodo, e são removidas conjuntamente com ele. A sedimentação é uma operação de grande importância em diversos sistemas de tratamento de esgotos, inclusive no tratamento do lodo, com sedimentação e adensamento do lodo primário e/ou do lodo biológico excedente, por meio de adensadores por gravidade. Na maior parte das aplicações, o principal objetivo é o de se produzir um efluente clarificado, ou seja, com baixas concentrações de sólidos em suspensão. No entanto, é também frequente a situação em que se deseja obter, concomitantemente, um lodo adensado, para facilitar o seu posterior tratamento (VON SPERLING, 1996).

Matsumoto et al (2005) utilizaram um Decantador de Coluna com adição de coagulante como pré-tratamento de reator anaeróbio para efluentes de curtume. O processo físico foi realizado com um Decantador de Coluna de fluxo ascendente projetado para um tempo de detenção hidráulica de uma hora, com sistema operando a uma vazão de 125 L/h. O tratamento físico-químico foi realizado através da adição de polieletrólito catiônico ao afluente. O Decantador de Coluna demonstrou ser um bom dispositivo de pré-tratamento físico-químico utilizado para reator anaeróbio tratando efluente de curtume, apesar dele não remover matéria orgânica dissolvida, foi eficiente na remoção de sólidos tanto sedimentáveis como suspensos.

Maigual-Enríquez (2011) estudou Sistemas de Recirculação para Aquicultura utilizando 3 tanques de plástico com capacidade de 0,20 m^3, Decantador de Coluna, Reator de Leito Fluidizado Aeróbio com Circulação em Tubos Concêntricos, tendo como meio de suporte areia de diâmetro efetivo (D_{10}) = 0,29 mm e na sequência Reator de Transferência de Oxigênio e Remoção de CO_2. O uso do Decantador de Coluna construído em PVC de 400 mm, com 2,50 m de comprimento (Figura 6) tinha como objetivo a remoção dos sólidos suspensos com diâmetro maior ou igual a 0,25 mm. A entrada se dava por uma tubulação localizada na base, com 0,30 m de comprimento para evitar o carregamento de sólidos do fundo. Eram realizadas retiradas de lodo decantado três vezes por dia num volume de 0,03 m^3 por vez. Os valores de remoção dos ST, STV e SST observados no DC foram de 44,44%, 45,65% e 71,71% respectivamente, podendo considerar o DC como uma alternativa para a

melhora da qualidade do efluente. A eficiência para a remoção da DBO e DQO no DC foi de 48,01%, mantendo valores baixos destes parâmetros.

Figura 6 – Desenho do Decantador de Coluna



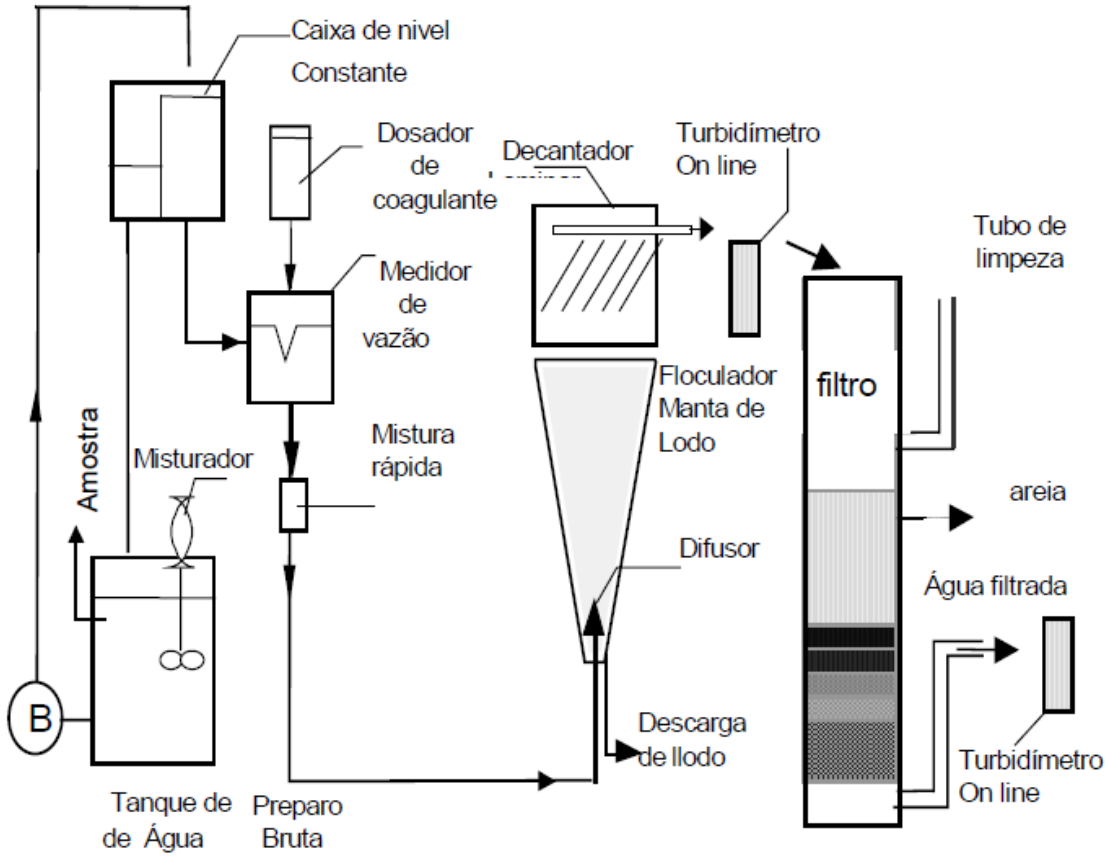
Fonte: Adaptado de Maigual-Enríquez (2011).

3.6 Floco-Decantador de Manta de Lodo

Cavazzana e Matsumoto (2004) observaram a necessidade de otimização e de atualização das Estações de Tratamento de Água (ETA) tradicionais e utilizaram Floco-Decantador de Manta de Lodo associado à diferentes coagulantes (polímeros) e filtragem. Os resultados no Módulo Experimental (Figura 7) apresentaram-se bons para as taxas de 160, 200 e 240 m^3/m^2/dia, fazendo-se pertinente a sua aplicação. A taxa de filtração na ordem de

240 m³/m²/dia em ensaio de 24h, resultou em água decantada com turbidez sempre abaixo de 6 UT e água filtrada abaixo de 0,1 UT. O Sistema Floculador de Manta de Lodo mostrou ser mais eficiente na remoção da turbidez quando a manta atingia 0,50 m e melhorando conforme seu aumento.

Figura 7 – Vista lateral do módulo experimental



Fonte: Cavazzana e Matsumoto (2004)

Cavazzana et al. (2008) afirmam que no uso do Floco-Decantador de Manta de Lodo associado à aplicação de polímeros há uma tendência de a dosagem ótima de polímero ser inversamente proporcional ao tempo de floculação, para efluente de mesma ordem de grandeza. Ou seja, floculação em manta de lodo realizada com tempos mais elevados tende a requerer menores dosagens de polímero e vice-versa. Confirmou-se também nos ensaios a evolução da performance em termos de redução da turbidez do efluente à medida do aumento da consistência da manta de lodo (Figura 8).

Os autores concluíram que após a definição das condições ótimas de coagulação, a tecnologia avaliada apresentou resultados plenamente satisfatórios, habilitando-a ao

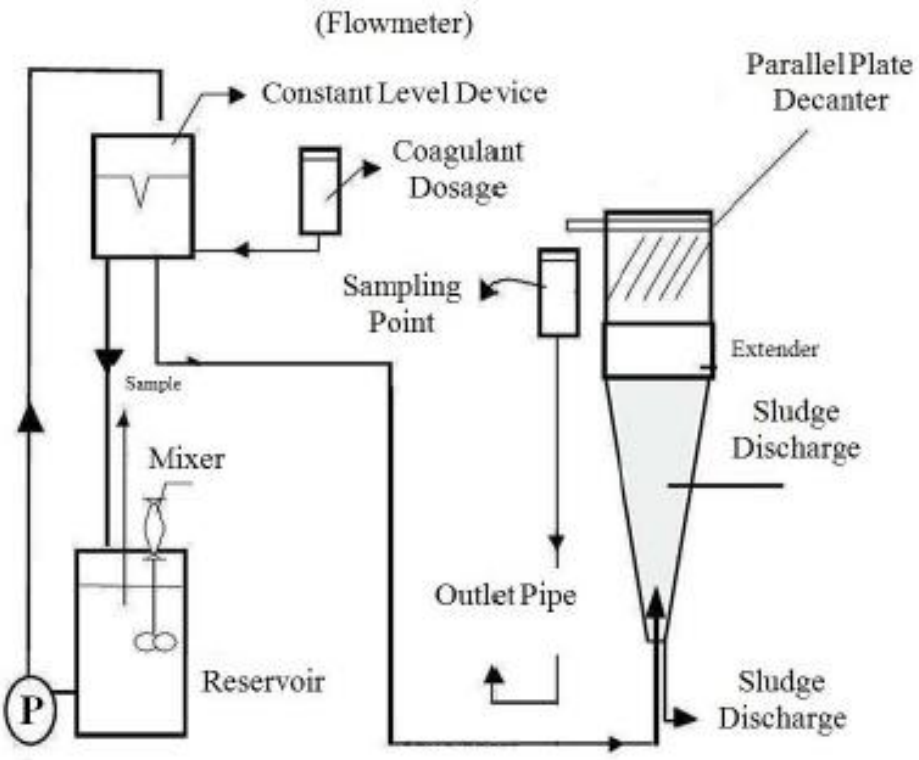
tratamento de águas naturais de turbidez variável. O menor custo de implantação, quando comparada às unidades de floculação e decantação convencionais, e os bons resultados para turbidez da água bruta de menor magnitude credenciam-na como alternativa para as estações de filtração direta que durante o período chuvoso apresentem efluente de qualidade inferior e/ou menor produção de água por carreira de filtração.

Figura 8 – Estágios de formação da manta de lodo: dispersa e densa, respectivamente.

Fonte: Cavazzana et al. (2008)

Moreira et al. (2013a) utilizaram Floco Decantador de Manta de Lodo (Figura 9) para o adensamento de lodo de lagoas de estabilização e em todos os ensaios observaram queda nos valores de turbidez, cor, DQO, fósforo total e nitrogênio total do efluente, indicando retenção no aparato. A eficiência de remoção de fósforo total foi maior quando o PAC foi usado como coagulante e a máxima eficiência chegou a 98%. A eficiência de remoção de nitrogênio total variou entre 60 e 90%. As maiores eficiências ocorreram com taxa de aplicação de 120 m^3/m^2/dia e PAC como coagulante.

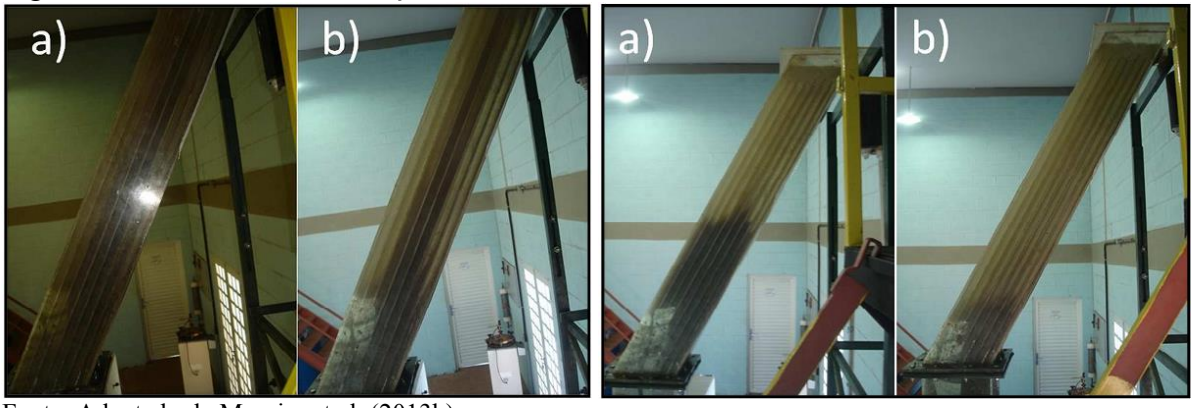
Figura 9 – Fluxograma esquemático da instalação experimental.



Fonte: Moreira et al. (2013a)

Moreira et al. (2013b) ressaltam que os resultados positivos do uso do Floco Decantador de Manta de Lodo (Figura 10) na remoção de turbidez, cor, DQO, fósforo total e nitrogênio total do lodo de lagoas de estabilização sugerem a necessidade de mais estudos sobre para a possibilidade de remoção de outros compostos, como por exemplo os hormônios estrogênicos, que foram identificados em sistemas de tratamento de esgotos e corpos d'águas em todo o mundo.

Figura 10 – Processo de formação de manta de lodo no Floco Decantador de Manta de Lodo.



Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013b).

3.7 Drenagem / Desaguamento

O desaguamento (ou desidratação) realizado com o lodo digerido tem impacto importante nos custos de transporte e destino final do lodo (GONÇALVES et al., 2001). De acordo com os autores, algumas das principais razões para se realizar o desaguamento são:

- redução do custo de transporte para o local de disposição final;

- melhoria nas condições de manejo do lodo, uma vez que o lodo desaguado é mais facilmente processado e transportado;

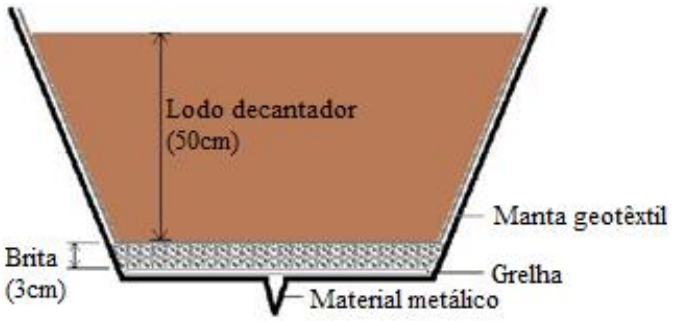
- aumento do poder calorífico do lodo, através da redução da umidade com vistas à preparação para incineração;

- redução do volume para o reuso na agricultura;

A definição do tipo de sistema a ser utilizado depende de inúmeros fatores como área necessária para implantação, custo da área, condições climáticas, custo dos equipamentos, operação, preparo de recursos humanos para operação, necessidade de condicionamento, entre outros (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008).

Uma das opções são os leitos de drenagem, que podem apresentar variadas formas e dimensões de acordo com a necessidade e disponibilidade de área para o processo. Na Figura 11 é mostrado o esquema do leito de drenagem utilizado por Reis (2011).

Figura 11 - Esquema do protótipo do leito de drenagem



Fonte: Reis (2011).

3.8 Secagem

O processo de secagem consiste na transferência simultânea de energia e massa. O ar, ao mesmo tempo em que fornece energia ao produto, absorve água do mesmo, na forma de

vapor. A energia despendida para evaporação da água é acompanhada pelo resfriamento do ar. Contudo, o ar absorve massa na forma de vapor, compensando o dispêndio energético na forma de calor, caracterizando o processo isoentálpico (MILMAN, 2002 apud FERREIRA, 2006).

Quando o material úmido é sujeito a este decurso térmico, dois processos ocorrem simultaneamente:

- Transferência de energia, normalmente de calor, do ambiente circundante para o sólido úmido. Este processo ocorre devido aos processos de condução, convecção ou radiação, e em alguns casos à combinação dos três, em que a remoção dessa água na forma de vapor da superfície do material depende da sua envoltória, nomeadamente a umidade e velocidade do ar em contato com a área da superfície;

- Transferência de umidade do centro para a superfície do sólido e, seguidamente, a sua evaporação devido ao processo anteriormente referido. Esta transferência é condicionada pela própria natureza física do sólido associado à temperatura e ao seu grau de umidade (SANTOS, 2011).

Os sistemas de secagem podem ser classificados em: natural, utilizando-se das energias solar e eólicas e, artificial, que se caracteriza pela utilização de processos manuais ou mecânicos, tais como convecção forçada (ventilação forçada) e aquecedores térmicos.

3.8.1 Secagem natural de lodo

Os leitos de secagem são uma das técnicas mais antigas utilizadas na separação sólido-líquido do lodo. As principais vantagens e desvantagens dos leitos de secagem são apresentadas na Figura 12.

Ao optar por este sistema deve-se estar ciente de que a secagem dependerá da taxa de evaporação que, por sua vez, depende de vários fatores, tais como clima, natureza do lodo e a carga de lodo aplicada. A cobertura no leito de secagem serve para proteção contra a chuva e geadas. Ao se cobrir o leito abre-se a possibilidade de se usar a energia solar para aquecer o lodo durante a secagem, reduzindo desta maneira a concentração de bactérias patogênicas. Esta “pasteurização solar” se torna particularmente importante se o lodo seco é utilizado na agricultura (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Figura 12 – Quadro com as principais vantagens e desvantagens dos leitos de secagem

Vantagens	Desvantagens
Baixo valor de investimento Simplicidade operacional Baixo nível de atenção exigido Necessidade de operador com baixo nível de qualificação Baixo ou inexistente consumo de energia elétrica Baixo ou inexistente consumo de produto químico Baixa sensibilidade a variações nas características do lodo Torta com alto teor de sólidos	Elevada área requerida Necessidade de estabilização prévia do lodo Influência significativa do clima no desempenho operacional do processo Lenta remoção da torta seca Necessidade de elevada mão de obra para retirada da torta seca Elevado risco de liberação de odores desagradáveis e de proliferação de moscas Risco de contaminação de lençol freático, caso o fundo dos leitos e o sistema de drenagem não sejam bem executados

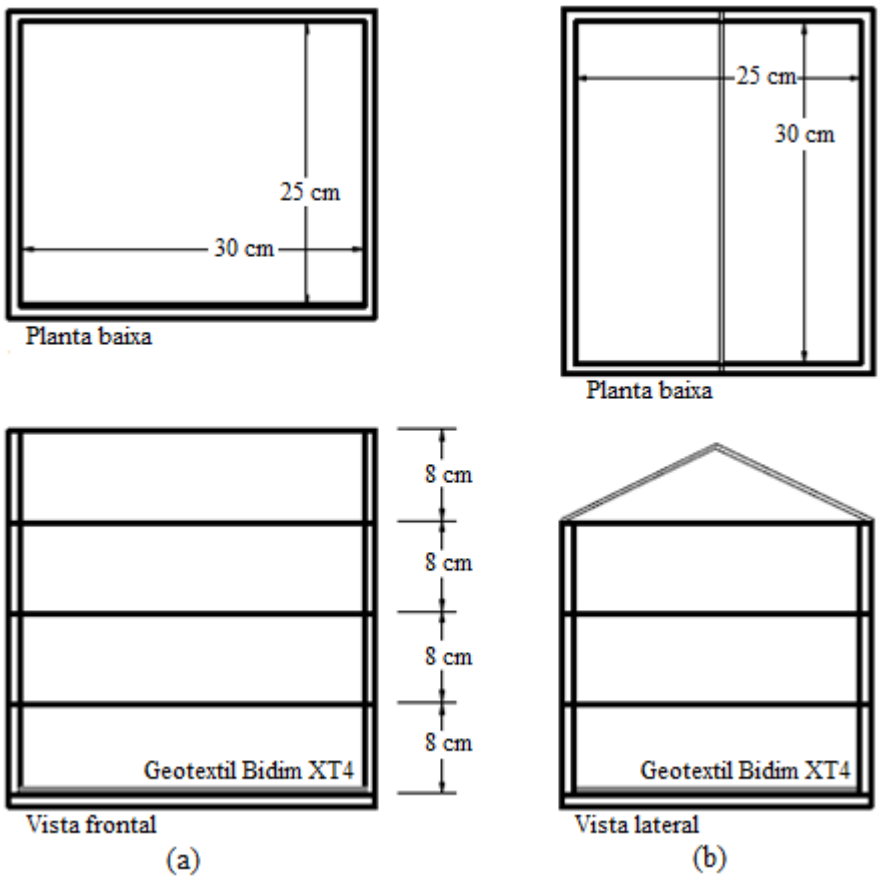
Fonte: Gonçalves et al. (2001).

Melo (2006) propõe uma modelagem matemática para o processo de secagem natural de lodo, associando a perda de água do lodo com a radiação solar. O autor estudou o comportamento da evaporação do lodo em leitos de secagem natural por meio de três experimentos. Inicialmente o lodo passava por um processo de percolação, tendo sua umidade reduzida de cerca de 95 para 80%, assumindo uma consistência pastosa, e pelo processo de evaporação, tinha a umidade reduzida para 74%, sendo esta a umidade inicial do material de estudo utilizado nos dois primeiros experimentos.

No primeiro experimento, simularam-se 5 carregamentos diferentes de lodo (21, 27, 41, 55 e 68 kg SST/m²) em caixas de madeira descobertas; expostas às condições atmosféricas. O segundo foi realizado paralelamente ao primeiro, com as mesmas cargas, em caixas de madeira, porém providas de uma cobertura, constituída por armação metálica e revestida por uma camada plástica, permitindo assim a passagem da radiação solar e a convecção livre do ar. O terceiro foi realizado para analisar a influência de precipitações sucessivas sobre dois carregamentos de lodo (20 e 40 kg SST/m²) com diferentes umidades iniciais (45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% e 75%).

Em ambos os experimentos as caixas, de 0,075 m² (25 cm x 30 cm), possuíam um sistema drenante: furos de 6 mm de diâmetro e uma camada de geotêxtil Bidim-XT4, como camada filtrante, permitindo a passagem da água resultante das precipitações, substituindo as camadas de brita e areia, utilizadas em leitos de secagem convencionais. As paredes laterais, do tipo encaixe, eram formadas por segmentos de 8 cm de altura, sendo removidas quando da diminuição da altura do lodo, diminuindo assim o efeito do sombreamento na massa de lodo. A Figura 13 mostra os modelos dos leitos utilizados na pesquisa.

Figura 13 - Modelo dos leitos utilizados na pesquisa: (a) descobertos e (b) cobertos

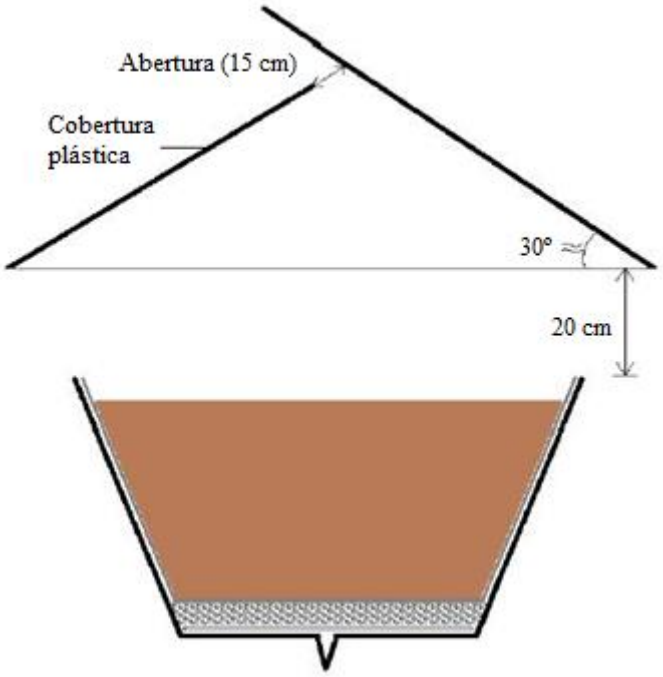


Fonte: Melo (2006).

O autor observou que entre leitos descobertos e cobertos, deve-se usar os leitos cobertos, pois apesar de manterem o mesmo perfil da secagem dos leitos descobertos, diminuem o efeito das precipitações, podendo ainda absorver umidade do ar. De modo que o ideal seria uma coberta móvel, capaz de isolar o lodo e a atmosfera no momento da chuva. E para os leitos cobertos quanto maior a carga maior a evaporação, para cargas com mesma umidade inicial de lodo sob as mesmas condições atmosféricas.

Reis (2011), em seu estudo, utilizou a estufa agrícola em um protótipo em escala reduzida e condições metodológicas diferentes. O autor concluiu que o processo de evaporação da água presente no lodo é acelerado com a utilização da estufa agrícola e a ocorrência de precipitação não interfere na remoção de água no lodo. A configuração testada que apresentou os melhores resultados foi com a altura da cobertura em relação ao protótipo de 0,20 m, chegando até a um lodo final 56% mais seco que um lodo secado sem cobertura. Na Figura 14, o modelo de leito de secagem usado no estudo.

Figura 14 – Esquema representativo do protótipo do leito de secagem com cobertura plástica.



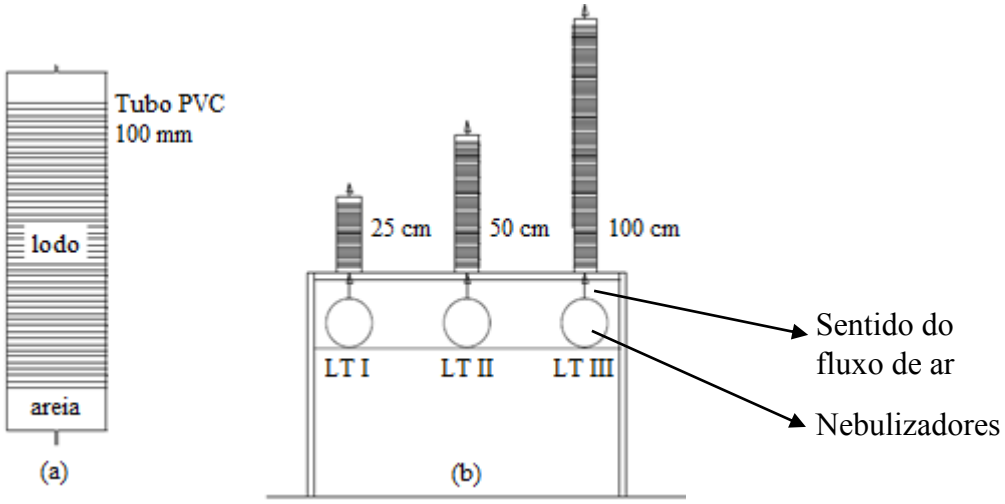
Fonte: Reis (2011).

Devido a elevada necessidade de área requerida, os leitos de secagem são indicados para ETEs que tratem de população equivalente a 20000 habitantes (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

3.8.2 Secagem artificial de lodo

Melo (2006) estudou secagem artificial através da passagem de ar sobre diferentes cargas de lodo. Primeiramente o lodo tinha a umidade reduzida de cerca de 95 para 80% por meio de um processo de percolação e por evaporação a umidade era reduzida para 70%, sendo esta a umidade inicial utilizada nos experimentos. Foram dois experimentos que visaram estudar a secagem de lodo com auxílio de uma fonte externa de energia, a passagem de ar pela camada de lodo. Para isso foram realizados na primeira experiência três carregamentos distintos de lodo, com alturas iniciais de 0,25 m, 0,50 m e 1 m, em tubos de PVC, branco, com diâmetro de 100 mm, protegidos das intempéries, nos quais se injetavam ares comprimidos de forma ascendente (Figura 15).

Figura 15 - Leitos de secagem forçada: (a) modelo dos leitos, (b) disposição dos leitos.



Fonte: Adaptado de Melo (2006).

Na segunda experiência se estudou o efeito da injeção de ar de forma ascendente, em dois tubos com mesmo carregamento, 0,50 m de lodo com umidade 70%, construídos de PVC, branco, diâmetro de 100 mm, sendo que em um desses tubos o ar afluente é aquecido por uma lâmpada incandescente, localizada na parte inferior do tubo, controlando assim a temperatura do ar.

Com o estudo detectou-se que a secagem artificial pode ser utilizada quando não houver disponibilidade de terreno, podendo a mesma produzir lodo com umidade inferior a 5%, dependendo da umidade relativa do ar no momento da secagem. Quanto mais elevada à temperatura do ar, e mais seco for o ar, maior será a evaporação. A secagem será otimizada quando o ar efluente for saturado.

Outra alternativa para o lodo líquido proveniente das etapas de separação é a desidratação em centrífuga (condicionamento mecanizado), onde o material atinge a concentração de até 25% de sólidos. Esse material é posteriormente encaminhado para secador térmico e submetido a temperaturas de 350°C, num período de cerca de 30 minutos, convertendo-se em material granular esterilizado (pellets), ou lodo Classe A, estando apto ao uso agrícola ou como combustível (COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS – COPASA MG, 2011).

Os equipamentos para secagem térmica podem ser diretos ou indiretos. Entre os principais tipos estão o secador rotativo, de soleiras múltiplas, de leito fluidizado, por transporte pneumático e transportadores de esteira. Cada tipo com vantagens e desvantagens em relação aos demais (DAVID, 2002).

Entre as alternativas para secagem de lodo encontra-se também a secagem por radiação infravermelha, baseada na radiação de ondas de infravermelho que interage com a estrutura interna do lodo, aumentando assim a sua temperatura e favorecendo a evaporação do teor de umidade. Além disso, a energia do infravermelho é transferida do elemento aquecido para a amostra do produto sem circulação de ar. Assim, a temperatura radiante das camadas da amostra é mais elevada do que o ar que a rodeia. Como resultado, a secagem da amostra é feita tanto no interior quanto no seu exterior por meios de fenômenos térmicos da radiação e da convecção, levando a uma alta taxa de calor comparado a secagem tradicional (FEITOSA, 2009). Com a secagem térmica, pode-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95% (DAVID, 2002).

Entre as vantagens da secagem por radiação infravermelha encontra-se a redução do tempo de secagem e consequentemente a redução do consumo de energia, além da garantia de degradação mínima da qualidade do produto. Pode-se também incluir a simplicidade e a versatilidade do equipamento requerido, a fácil incorporação do aquecimento a outras técnicas de aquecimento, e também a facilidade no direcionamento da fonte de calor e transferência do aquecimento do ar, a obtenção de altas taxas de transferência de calor com aquecedores compactos e alta qualidade dos produtos finais (RATTI e MUJUMDAR, 1995 apud SANTOS, 2009). É considerado, um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica presente no lodo, aspectos de importância fundamental quando o lodo/biossólido seco vai ser utilizado na agricultura (SOUZA, 2012).

A tecnologia de secagem via radiação infravermelha tem sido amplamente utilizada em vários processos industriais, envolvendo materiais têxteis, eletrônicos, tintas automotivas e papéis (NAVARRI; ANDRIEU, 1993), mas sua aplicação em produtos da agroindústria ainda está na sua fase inicial.

A radiação, proveniente de lâmpadas de infravermelho, fornece calor ao lodo, havendo assim, um aumento de sua temperatura, redistribuída para toda a sua extensão pelo processo de condução entre as partículas. Que por sua vez, faz com que a água superficial do lodo evapore. Na Figura 16 está esquematizado o processo descrito acima.

Enquanto na superfície há essa troca, dentro do lodo há uma transferência da umidade do centro para a superfície, condicionada pela própria natureza física do sólido (devido ao aumento de temperatura). A Figura 17 esquematiza o processo mencionado.

Os mecanismos mais importantes envolvidos são:

- Difusão líquida: ocorre devido à existência do gradiente de concentração;

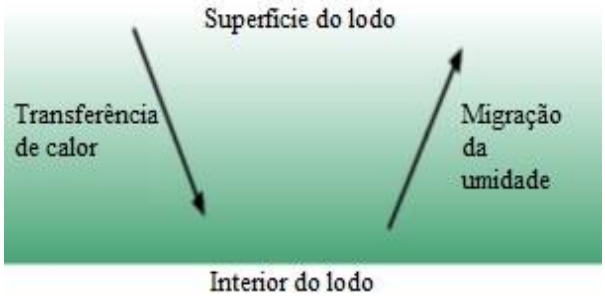
- Difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;

- Escoamento de líquido e de vapor: ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura.

Figura 16 - Mecanismo de secagem

Fonte: Leite (2014)

Figura 17 - Migração da água no interior do lodo



Fonte: Leite (2014)

Todas estas considerações, tais como, conteúdo inicial de umidade do material, conteúdo final de umidade a que o lodo pode chegar (umidade de equilíbrio), como a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte da água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem, servem para fundamentar o fenômeno de secagem (BROD, 2003).

3.9 Riscos ambientais do lodo de esgoto

Alguns componentes das águas residuárias, ao passar pelo sistema de tratamento, concentram-se em proporções variáveis no lodo, e pelo seu risco sanitário e ambiental, são indesejáveis, podendo ser genericamente agrupados em metais pesados, micropoluentes orgânicos e microrganismos patogênicos (VON SPERLING, 2001).

Do ponto de vista ambiental, o metal pesado pode ser entendido como aquele metal que, em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferece risco à saúde humana e ao ambiente, prejudicando a atividade dos organismos vivos. Nos esgotos, a presença de metais pesados está associada, principalmente, aos despejos de indústrias lançados nas redes coletoras de esgotos urbanos (VON SPERLING et.al., 2001).

A concentração de metais pesados no lodo de esgoto é um dos fatores que vai determinar a viabilidade de sua aplicação na agricultura e por quanto tempo o mesmo poderá ser aplicado até que a concentração dos mesmos no solo atinja um potencial elevado de risco para o ambiente e para a saúde do homem (MELO et al., 2010). Marques et al. (2001) estimam que menos de 1% do total de metais pesados originários de biossólidos são absorvidos pelas plantas. Além disso o lodo de esgoto doméstico tende a apresentar concentrações mais baixas de metais pesados em relação aos esgotos industriais.

Segundo Santos (1999), os metais pesados podem estar dispostos no solo em diferentes formas. Sua distribuição é influenciada pelas seguintes propriedades do solo: pH, potencial redox, textura, composição mineral, características do perfil, componentes orgânicos do solo e na solução, presença de outros metais pesados, temperatura do solo, conteúdo de água e outros fatores que afetam a atividade microbiana. Estes fatores que afetam a distribuição dos metais pesados no sistema solo controlam a sua disponibilidade, mobilidade do meio e disponibilidade às plantas.

Com relação aos microrganismos, os processos de tratamento de esgoto concentram no lodo maior carga que a inicialmente contida no afluente (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). O lodo de esgoto em seu estado natural (lodo bruto) é rico em organismos patogênicos, facilmente putrescível e rapidamente desenvolve odores. Os processos de estabilização foram desenvolvidos com o objetivo de estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, reduzindo o risco de putrefação, e diminuir a concentração de patógenos. A digestão anaeróbia é o principal processo de estabilização de lodos utilizado no Brasil. O tratamento alcalino e a secagem térmica também são utilizados (GONÇALVES et al., 2001).

Os microrganismos patógenos que podem ser encontrados no lodo são representados nos cinco grupos: (a) helmintos, (b) protozoários, (c) fungos, (d) vírus e (e) bactérias (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). A Figura 18 mostra alguns dos principais parasitos encontrados no lodo, e os sintomas que podem causar no homem.

Figura 18 - Alguns microrganismos encontrados no lodo e doenças causadas no homem

PARASITO	PRINCIPAIS SINTOMAS
Ascaris lumbricoides	Distúrbios digestivos, vômitos e dor abdominal
Ancylostoma duodenale	Anemia, emagrecimento
Taenia solium	Distúrbios digestivos e nervosos, irritação, dor abdominal e emagrecimento
Taenia saginata	Distúrbios digestivos, insônia, anorexia, dor abdominal e emagrecimento
Entamoeba histolytica	Enterite aguda
Giardia lamblia	Diarréia, perda de peso

Fonte: Adaptado de Thomaz-Socool et al. (2000).

Em se tratando de organismos patogênicos, os helmintos despertam um grande interesse, isto porque o ambiente encontrado**,** nos processos de tratamento de esgotos**,** é propício ao embrionamento de seus ovos. No lodo**,** a sobrevivência, em temperaturas de 20º a 30ºC, pode ser de meses. Os ovos de helmintos têm se mostrado mais resistentes aos diferentes tipos de tratamentos de esgotos empregados, tais como a desinfecção com cloro, irradiação ultra-violeta (UV), ozônio, dentre outros. Alguns gêneros, como *Ascaris, Toxocara e Tricuris*, são extremamente resistentes à ampla variedade de condições físicas e químicas, sendo capazes de permanecer viáveis, em condições de sombra e umidade, por dois até sete anos**,** no solo (BETTIOL; CAMARGO, 2006; WHO, 2008; CORRÊA et al., 2007; SOCCOL et al, 2010).

Dentre as bactérias entéricas patogênicas encontradas no esgoto, a *Salmonela spp* e a *Shigella spp* representam o maior risco de infecção para humanos, já que são mais encontradas em esgotos domésticos (ANDREOLI; FERREIRA; CHERNICHARO, 2003).

Com relação às bactérias presentes no lodo de esgotos, quando estes são dispostos no solo, elas têm o seu tempo de sobrevivência reduzido pela competição e predação dos microrganismos do próprio solo, principalmente de protozoários de vida livre, considerados importantes predadores de coliformes. Tal afirmação foi comprovada por estudos de Andraus et al. (2001), nos quais bactérias entéricas aplicadas em solo estéril sob controle sobreviveram mais tempo do que aquelas semeadas em solo não estéril. Segundo o autor, cistos de protozoários, no solo e nas plantas, são rapidamente mortos pelos fatores ambientais, portanto considera como mínima a ameaça à saúde pública e de animais, contrariando recomendações de outros autores com relação aos riscos potenciais da aplicação de lodo ao solo.

De acordo com Teixeira Pinto (2001) o objetivo de se introduzir um processo de higienização de lodos é de se garantir um baixo nível de patogenicidade no lodo que, ao ser disposto no solo, não venha a causar riscos à saúde da população, aos trabalhadores que vão manuseá-lo e impactos negativos ao meio ambiente. Portanto, a necessidade de se implantar um sistema de higienização complementar de lodos dependerá da alternativa de disposição final que será utilizada. Os mais importantes processos são: compostagem, digestão aeróbia auto térmica, calagem ou estabilização alcalina, pasteurização e secagem térmica.

A incidência de raios solares contribui para diminuir o tempo de sobrevivência dos parasitos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Com a diminuição da umidade do lodo, diminui também a possibilidade de vida de alguns microrganismos de veiculação hídrica, que têm na água seu meio de locomoção e reprodução.

O processo de caleação consiste em misturar cal virgem (CaO) em proporções que variam em função do peso seco do lodo, de modo a promover o aumento do pH numa reação exotérmica que inativa até 90% dos organismos patogênicos e acelera o processo de evaporação, podendo atingir temperaturas de até 80ºC (VON SPERLING, 2001).

Outra alternativa para a melhoria da qualidade do material é a vermicompostagem, que é o processo de transformação de matéria orgânica recente em matéria orgânica estabilizada, através da ação das minhocas junto com a microflora que vive em seu trato digestivo (EDWARDS, 1995). O resultado do processo é um produto de alta qualidade que pode ser utilizado como regulador da matéria orgânica do solo (LANDGRAF, 1999). Esta tecnologia abrange ambas as metas sociais e ambientais de desenvolvimento sustentável e é amplamente utilizada em países como a Índia, Austrália, Nova Zelândia, Cuba e Itália (SNEL, 1999).

Em resumo, os estudos demonstram grande variabilidade de resultados sobre a presença, ausência ou tempo de sobrevivência de diversos micro-organismos presentes no lodo de esgoto, tendo em vista que um grande número de fatores ambientais exerce influência nos experimentos, variando consideravelmente nas diferentes composições do solo. Por essa razão, o conhecimento dos agentes patogênicos, da sua viabilidade e de sua sobrevivência na matriz solo-lodo é importante e deve ser perseguido. Ademais, a caracterização microbiológica e parasitológica do lodo pode nortear as medidas para condicionamento, considerando as alternativas de disposição possíveis a cada situação (BATISTA, 2015).

3.10 Disposição final do lodo

Dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB (IBGE, 2008), mostram que 99,96% dos municípios brasileiros têm serviços de manejo de Resíduos Sólidos, mas 50,75% deles dispõem seus resíduos em vazadouros; 22,54% em aterros controlados; 27,68% em aterros sanitários. Esses mesmos dados apontam que 3,79% dos municípios têm unidade de compostagem de resíduos orgânicos; 11,56% têm unidade de triagem de resíduos recicláveis; e 0,61% têm unidade de tratamento por incineração. A prática desse descarte inadequado provoca sérias e danosas consequências à saúde pública e ao meio ambiente.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2015) o quadro institucional atual também é negativo apesar de encontrar-se em fase de alteração. A maioria das Prefeituras Municipais ainda não dispõe de recursos técnicos e financeiros para solucionar os problemas ligados à gestão de resíduos sólidos. Ignoram-se, muitas vezes, possibilidades de estabelecer parcerias com segmentos que deveriam ser envolvidos na gestão e na busca de alternativas

para a implementação de soluções. Raramente utiliza-se das possibilidades e vantagens da cooperação com outros entes federados por meio do estabelecimento de consórcios públicos nos moldes previstos pela Lei de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e Lei de Consórcios Públicos (Lei nº 11.107/2005) e de seus respectivos decretos de regulamentação, Decreto nº 7217/2010 e Decreto nº 6.017/2007). Ainda é frequente observar-se a execução de ações em resíduos sólidos sem prévio e adequado planejamento técnico-econômico, sendo esse quadro agravado pela falta de regulação e controle social no setor.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, criada pela Lei nº 12.305, de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 2010, criou como um dos seus principais instrumentos o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. O Decreto nº 7.404/2010 instituiu e delegou ao Comitê Interministerial, composto por 12 Ministérios e coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, a responsabilidade de coordenar a elaboração e a implementação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

A Lei sancionada incorpora conceitos modernos de gestão de resíduos sólidos e se dispõe a trazer novas ferramentas à legislação ambiental brasileira. Entre os aspectos estão: Responsabilidade compartilhada; Logística Reversa; Sistema de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos - SINIR; Acordo Setorial; Coleta Seletiva; Ciclo de Vida do Produto; Atuação de associações ou cooperativas de catadores de materiais recicláveis; Além dos Planos de Resíduos Sólidos nos quais estão o Plano Nacional de Resíduos Sólidos a ser elaborado com ampla participação social, contendo metas e estratégias nacionais sobre o tema e também os planos estaduais, microrregionais, de regiões metropolitanas, planos intermunicipais, municipais de gestão integrada de resíduos sólidos e os planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

De acordo com a lei, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade (art. 9): Não geração, Redução, Reutilização, Reciclagem, Tratamento, Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, que deve ser entendida como a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Os principais objetivos dessa lei são:

• Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental estimulando padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços com desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas.

• Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

• Gestão integrada dos resíduos sólidos que busca compartilhar a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos, envolvendo todos da cadeia de comercialização, como fabricantes, distribuidores, consumidores e órgãos públicos.

• Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

• Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.

Considerando que um dos objetivos principais dessa Lei é o reaproveitamento dos resíduos sólidos, um plano microrregional que integre as ações de municípios limítrofes pode diminuir custos para o reaproveitamento adequado do lodo de esgoto. Principalmente porque o art. 36, alínea V, deixa claro que o titular dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos será responsável por "implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido" (BRASIL, 2010).

No item "Agricultura Sustentável" da Agenda 21, programa de ação resultante da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro em 1992, a utilização do lodo de esgotos na recuperação de solos empobrecidos já era incentivada, mediante a garantia da inexistência de impactos ambientais negativos.

A reciclagem agrícola, que é a disposição do lodo em solos agrícolas em associação ao plantio de culturas, e o uso do lodo na recuperação de áreas degradadas, por meio da disposição de altas doses do lodo em locais drasticamente alterados, como áreas de mineração, onde o solo não oferece condições ao desenvolvimento e fixação da vegetação em função da falta de matéria orgânica e de nutrientes no solo, são destinações benéficas para o lodo, neste caso, considerado biossólido (LARA et al., 2001).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução 375/2006 (BRASIL, 2006), define critérios, procedimentos e dá providências para o uso agrícola de lodo de efluente gerado em estações de tratamento de efluentes sanitários, bem como seus produtos derivados. A Resolução estabelece requisitos mínimos de qualidade do lodo ou produto derivado destinados à agricultura por meio de parâmetros e limites máximos de concentração de substâncias inorgânicas (metais pesados), indicadores

microbiológicos e patógenos, além de substâncias orgânicas, tais como benzenos clorados, ésteres de ftalatos, fenóis clorados e não clorados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

Essa resolução ainda preconiza que a estocagem do lodo numa propriedade deve ser feita em local com declividade máxima de até 5%, com distância mínima de segurança de rios, poços, lagos, minas e afins que varia de 15 a 100m e por período máximo de 15 dias. Também proíbe que a estocagem seja feita diretamente sobre o solo. O manuseio e carregamento de caminhões na área de estocagem poderão ser feitos com pás carregadeiras de rodas ou retroescavadeiras com caçambas frontais (BRASIL, 2006).

A reciclagem agrícola é a forma de disposição final do lodo de esgoto que pode ser considerada mais adequada em termos técnicos, econômicos e ambientais, desde que convenientemente aplicada (ANDREOLI, 1999; TSUTIYA, 1999), uma vez que apresenta o menor custo para a reciclagem de matéria orgânica e nutrientes (MATTHEWS, 1998; BOEIRA, 2006), e tem se constituído em uma das formas mais utilizadas em diversos países desenvolvidos (Bélgica, 29%; Dinamarca, 54%; França, 58%; Alemanha, 27%; Itália, 33%; Espanha, 50%; Reino Unido, 44%) como condicionador e fertilizante do solo, sendo que nos Estados Unidos o uso do lodo como fertilizante data de 1927 (NEIVA, 1999).

Nesses países onde o lodo de esgoto é usado como fertilizante alternativo há muito tempo, tem sido realizadas muitas pesquisas sobre os efeitos desse resíduo no solo. Entretanto os resultados, que foram obtidos em solos de clima temperado, dificilmente podem ser extrapolados para solos ácidos e de clima tropical (SILVA et al., 2001).

A reciclagem agrícola é uma alternativa particularmente promissora para países como o Brasil, onde se faz necessária a reposição do estoque de matéria orgânica dos solos devido ao intenso intemperismo das nossas condições climáticas (SANEPAR, 1999).

Para Tsutiya (1999), antes da disposição do lodo em áreas agrícolas deve-se também considerar os seguintes aspectos: características das áreas, condições do solo, taxa de aplicação e cultura agrícola a ser explorada.

O lodo de esgoto contém considerável percentual de matéria orgânica e elementos essenciais às plantas, podendo substituir, ainda que parcialmente, os fertilizantes minerais, desempenhando importante papel na produção agrícola e na manutenção da fertilidade do solo (NOGUEIRA et al., 2008).

A aplicação de lodo de esgoto no solo pode resultar em aumento dos teores de P, tanto associado às partículas do solo ou às partículas do próprio lodo, como demonstrado em trabalhos realizados em diferentes tipos de solo (BETTIOL; GHINI, 2011). Costa et al. (2014) salientam ainda que o lodo de esgoto, além de aumentar os teores de P disponível no solo, não

promove maior arraste desse nutriente para as porções inferiores das parcelas. A adubação mineral resulta em maiores quantidades de P na parte inferior da área agrícola pelo arraste ocasionado pela erosão.

Diversos estudos demonstram que a utilização do lodo de esgoto é uma alternativa viável para a produção de mudas, tanto nativas (KRATZ, 2011) quanto para espécies exóticas, como as do gênero *Eucalyptus* (TRIGUEIRO; GUERRINI 2003; PERONI 2012). Caldeira et al. (2013) encontraram, na proporção de 20% de lodo de esgoto associado a 80% de vermiculita, o melhor substrato testado para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis.*

Na utilização de lodo de ETE na cultura do mamoeiro, no norte do estado do Espírito Santo, Costa et al. (2001) verificou que o lodo apresenta capacidade de suporte para a cultura, mantendo por um período mais prolongado os nutrientes minerais disponíveis para a planta.

O processo de planejamento da reciclagem agrícola do lodo é apresentado na Figura 19.

Em solos degradados, em que se verifica a perda do horizonte orgânico, a principal fonte de carbono para utilização microbiana é a biomassa das plantas. Enquanto não se verifica a acumulação de matéria orgânica do solo, os níveis da atividade microbiana e o crescimento da vegetação permanecem em níveis baixos. A recuperação de áreas degradadas com a utilização de calagem e fertilização mineral pode renovar a vegetação, contudo as condições físicas e biológicas precárias podem resultar na deterioração da cobertura vegetal antes que se verifique a efetiva recuperação do solo (STROO; JENCKS, 1985).

A matéria orgânica presente no lodo de esgoto melhora o estado de agregação das partículas do solo, diminui sua densidade e aumenta a aeração (MELO; MARQUES, 2000). Outros atributos físicos influenciados positivamente pelo lodo são a taxa de infiltração da água no solo, o volume de poros e a capacidade de retenção de água, que é afetada pelo número e distribuição dos poros e pela superfície específica (MELO; MARQUES, 2000; JORGE et al., 1991).

Além do reaproveitamento agrícola por meio de fertilizante orgânico e compostagem e da recuperação de solos degradados. Outras formas de aproveitamento como o Reaproveitamento Industrial na fabricação de tijolos e cerâmicas, produção de agregado leve para construção civil e produção de cimento, também estão sendo estudadas.

Figura 19 - Esquema resumido do plano de reciclagem de lodo

	Fluxo do Operação	Estudo e Gestão	Análise e Controle
1. Estudo da Produção do Lodo	Contato com o Órgão Ambiental para definição de parâmetros ambientais Produção de lodo calado	Regime de funcionamento e vazão de entrada; sistema de estabilização e higienização; tipo de tratamento; equipamentos; área para gerenciamento do lodo; avaliação da quantidade produzida; cálculo da área necessária para distribuição; treinamento dos técnicos do sistema de tratamento.	Necessidade de Estruturação das ETEs: processo de secagem; eficiência da ETE (produção real e potencial); sistema de estabilização e higienização; área para gerenciamento do lodo; treinamento dos técnicos de ETE.
2. Avaliação da Qualidade do Lodo	Estocagem e Maturação de lodo (1,5 a 2 meses)	Valor agronômico; metais pesados; patógenos; estabilização.	Análise do lodo; Registro dos dados.
3.Estudo da Área de Distribuição do Lodo	Definição das zonas de valorização do lodo	Localização geográfica; estrutura viária; características climáticas; hidrologia; características dos solos predominantes; contexto agrícola.	Definição das regiões mais aptas.
4. Organização da Distribuição	Regularização junto ao Órgão Ambiental; Contato com agricultores; Contato com outros usuários; Definição de estratégias de transporte.	Divulgação; cadastro dos produtores interessados; outros usuários potenciais; períodos de aplicação e estocagem e culturas de utilização; levantamento de preços de transporte; treinamento dos técnicos; obtenção de licença ambiental.	Formação e apoio aos agricultores e técnicos; Controle das Operações de Transporte e Distribuição.
5. Operação de Distribuição	Carregamento, espalhamento e incorporação; Plantio; Colheita.	Coleta de amostra de lodo; avaliação do potencial da propriedade; recomendação de adubação e complementação mineral; carregamento, distribuição e incorporação; monitoramento ambiental; relatório de operação e registro de dados.	Análise do solo antes do espalhamento; Recomendação de adubação; Controle das aplicações de lodo; Controle dos solos após a colheita.

Fonte: (SANEPAR, 1999).

A incorporação do lodo de esgotos na fabricação de produtos cerâmicos, como telhas, tubos, tijolos e lajotas, tem-se mostrado uma alternativa viável de destinação adequada. O lodo é adicionado ao processo durante a etapa de preparação da massa cerâmica e auxilia na correção de umidade. Isso pode ser feito manualmente, com pás carregadeiras, ou em olarias mais tecnificadas, utilizando-se equipamentos apropriados (ANDREOLI, 2006).

Pesquisas demonstram que é possível utilizar o lodo de esgoto como substituto a agregados leves na fabricação de cimentos e concretos, bem como peças feitas desses materiais. Os agregados leves seriam as areias, pequenas pedras, etc.

Adicionar cinzas do lodo ao processo produtor de cimento reduz o custo de produção e, como o cimento é o componente mais caro do concreto, também reduz os custos deste item indispensável na construção civil. É possível substituir 35% do consumo de cimento Portland por lodo calcinado entre temperaturas de 700ºC a 800ºC (MORALES, 1994 apud PEREIRA, 2012).

No Brasil, a técnica de adicionar lodo de esgoto na fabricação de cimento Portland ainda não é muito utilizada. Nos EUA, porém, a operação é realizada com frequência por diversas empresas de saneamento. Não apenas nos EUA, mas também em outros países o uso do lodo de esgoto na fabricação de cimento Portland é bem comum. Em Cingapura, cinzas do lodo de esgoto adicionadas à massa asfáltica foram utilizadas com sucesso na construção de estradas (AZIZ; KOE, 1990 apud ANDREOLI, 2006).

Desta maneira, com leis, empenho em pesquisas e consciência ambiental, social e econômica, novas tecnologias de disposição final de lodo vão sendo desenvolvidas e as formas inadequadas caindo em desuso a cada dia, podendo se tornar proibidas em diversos países, assim como o descarte livre em aterros sanitários se tornou proibido no Brasil e o descarte oceânico proibido nos EUA e na Europa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

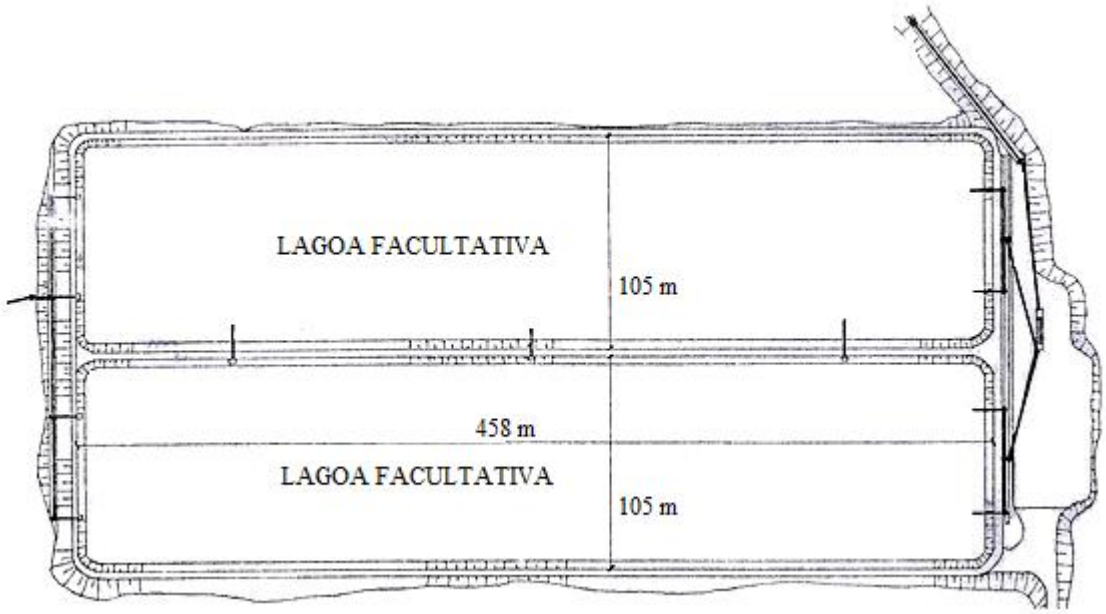
4.1 Área de coleta do lodo

O lodo utilizado na pesquisa foi coletado na ETE do município de Ilha Solteira - SP, situado no extremo noroeste do Estado de São Paulo, na divisa com o Estado de Mato Grosso do Sul. A população residente em Ilha Solteira é de 25064 habitantes (IBGE, 2010).

A ETE está localizada nas coordenadas 20º25'18,00" S e 51º21'46,52" W e foi projetada para atender uma vazão de 147,50 $L.s^{-1}$, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 18,5 dias (Figura 20). O sistema de tratamento é composto por duas lagoas facultativas em operação desde 1994. As lagoas são idênticas, apresentando 458 m de comprimento, 105 m de largura e 1,50 m de profundidade. Este sistema garante o tratamento de 100% do esgoto da área urbana do município.

As águas residuárias chegam à ETE por gravidade ou bombeamento (advindo de quatro estações elevatórias) e passam por um gradeamento inicial para separação de material grosseiro. Após o gradeamento o fluxo do afluente passa por duas caixas de areia através de aberturas providas de ranhuras para a colocação de *stop logs*. Ao sair da caixa de areia os afluentes entram no canal de medição passando pela *Calha Parshall* e seguem para uma caixa partidora, de onde saem duas tubulações de interligação com as lagoas, as quais tem por finalidade direcionar o fluxo para uma lagoa ou para ambas (MAZZI; SAGAWA, 1993). Após o período de permanência nas lagoas o efluente tratado é lançado no Rio Paraná. A Figura 21 apresenta uma imagem aérea das lagoas de estabilização da ETE de Ilha Solteira - SP.

Figura 20 – Projeto das Lagoas de Estabilização da ETE Ilha Solteira, São Paulo, Brasil



Fonte: Adaptado de Mazzi e Sagawa (1993).

Figura 21 – Imagem aérea da ETE de Ilha Solteira - SP.

Fonte: Google Earth (2013).

4.2 Armazenamento do lodo

As coletas de lodo foram realizadas por um caminhão limpa fossa contratado. O volume de 4000 L de lodo era armazenado em dois reservatórios localizados nos fundos do Laboratório de Saneamento no Campus central da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS UNESP (Figura 22). Eram duas caixas d'água Fortlev de 2000 L cada, de acordo com a NBR 14799. Cada caixa d'água com uma bomba de sucção submersa da marca FERRARI e modelo XKS-401 PW-220V. Além do misturador de rotação de 1750 rpm e POT: 1/3 HP, com pá de 15 cm de largura. Assim que descarregado nos reservatórios, o lodo permanecia homogeneizado pelo agitador e era prontamente utilizado nas etapas subsequentes do experimento.

Figura 22 – Reservatórios de armazenamento de lodo bruto

Fonte: Própria autora.

4.3 Ensaio preliminar ‘Jarteste’

Inicialmente coletava-se uma amostra do lodo bruto para análise em reatores estáticos ‘Jarteste’ (Figura 23) de acordo com Di Bernardo et. al. (2002).

O lodo bruto homogeneizado era colocado em cada um dos seis jarros e em cada jarro adicionava-se uma diferente quantidade de coagulante hidroxi-cloreto de alumínio (PAC), coagulante de melhor resultado no experimento de Moreira et al. (2013a).

Aplicava-se na análise uma mistura rápida a 300 rpm por 3 minutos, mistura lenta a 30 rpm por 20 minutos e tempo de espera para decantar a amostra de 20 minutos, de maneira a reproduzir a situação do lodo quando da passagem pelo sistema de separação de sólidos, a partir do ponto de adição do coagulante neste sistema (no caso a saída da caixa de nível constante), assim como indicado por Di Bernardo et. al. (2002).

Após o tempo de decantação coletava-se em cada um dos jarros uma amostra do sobrenadante e estas passavam por análise em turbidímetro, para que se pudesse observar qual concentração de coagulante resultou em sobrenadante de menor turbidez. Desta forma, definiu-se que era necessário a adição de 350 mg de PAC em cada litro de lodo visando melhor coagulação. Assim, definida a melhor dosagem do coagulante a ser aplicada no sistema, iniciava-se a sua operação.

Figura 23 – Ensaio em reatores estáticos ‘Jarteste’

Fonte: Própria autora.

4.4 Instalação experimental

Para o experimento foi construído um sistema cuja configuração uniu um Decantador de Coluna, já estudado por Matsumoto et al (2005) e Maigual-Enríquez (2011), com um Floco-Decantador de Manta de Lodo, anteriormente utilizado com sucesso por Cavazzana e Matsumoto (2004) e por Cavazzana et al. (2008), além de Moreira et al. (2013a) e Moreira et al. (2013b).

O esquema representativo desse sistema encontra-se na Figura 24 e abaixo são descritas suas particularidades.

Figura 24 – Esquema da instalação experimental

Fonte: Adaptado de Leite (2014).

O Decantador de Coluna, construído em PVC, tem 400 mm de diâmetro e 2,50 m de comprimento.

A bomba dosadora de coagulante utilizada para aplicação do PAC diretamente na instalação era do modelo VIBROPAC LMI MILTON ROY, Acton, MA 01720 U.S.A. e ficava localizada na saída da Caixa de Nível Constante.

O Floco-Decantador de Manta de Lodo constitui-se de um Floculador de Manta de Lodo (Volume do tronco de pirâmide = 27 L; Área da base do tronco de pirâmide: 5x5 cm

(0,025 m²); Área do topo do tronco de pirâmide: 18x18 cm (0,0324 m²); Volume do prolongamento de 0,47 m = 15 L) e um Decantador de Alta Taxa de Placas Paralelas (Comprimento das seis placas = 1,10 m; Espessura das placas = 2,7 mm; Espaçamento entre placas = 26 mm; Ângulo de inclinação das placas= 60°; Largura das placas = 0,18 m; Volume da unidade = 32 L; Área em planta da unidade = 0,0324 m²).

A Figura 25 mostra a instalação experimental localizada na parte interna do laboratório.

Figura 25 - Decantador de Coluna seguido de Floco-Decantador de Manta de Lodo

Fonte: Própria autora.

4.5 Funcionamento do sistema Decantador de Coluna – Floco-Decantador de Manta de Lodo

O fluxograma do sistema, apresentado na Figura 26, simplifica as etapas do adensamento do lodo bruto.

Figura 26 - Fluxograma do sistema

Fonte: Própria autora.

A bomba de sucção submersa, instalada no reservatório, recalca aproximadamente 2000 L de lodo bruto para o Decantador de Coluna (DC). O lodo entrava por uma tubulação localizada na base do DC, de 1" de diâmetro e 0,30 m de comprimento, para evitar o carregamento de sólidos do fundo. A saída ocorria por uma tubulação de 1" localizada na parte superior do DC. A vazão estimada da coluna foi de 0,08 a 0,1 L/s.

Por essa tubulação o lodo era encaminhado para uma caixa de nível constante, com vertedor triangular para o controle da vazão. Por meio de uma bomba dosadora, localizada na saída da caixa de nível constante, era realizada a adição do coagulante ao lodo. A mistura rápida promovia o contato do coagulante com o lodo e a floculação para que ocorresse a separação dos componentes sólidos e líquidos.

Após a adição do coagulante o lodo seguia para o Floco-Decantador de Manta de Lodo (FDML), entrando pela parte inferior (tronco de pirâmide) e a saída do sobrenadante tratado se dava pela parte superior do FDML (decantador de alta taxa de placas paralelas).

Amostras do lodo bruto e do sobrenadante tratado eram coletadas para caracterização (Tabela 1, página 55).

A adição do coagulante no sistema por meio da bomba dosadora era realizada continuamente. A dosagem ideal de coagulante obtida no ensaio 'Jarteste', dada em mg/L, foi convertida para o sistema contínuo, levando em consideração a vazão de lodo e a vazão da bomba dosadora. Desta forma o sistema trabalhou durante todo o tempo com a concentração de coagulante ideal.

A taxa de aplicação do módulo de decantação utilizada foi de 120 m³/m².dia, por ser a taxa com melhores resultados de adensamento e remoção de nutrientes entre as estudadas por Moreira et al. (2013a). Para esta taxa, sabendo-se que a área do FDML é de 0,0324 m², a vazão de lodo na instalação foi de 0,045 L/s, valor que foi conferido com frequência durante a operação do sistema.

A função entre taxa e vazão para a instalação é dada pela Equação 4.

$$Taxa\ \left(\frac{m^3}{m^2.dia}\right) = \frac{Vazão\ \left(\frac{m^3}{dia}\right)}{Área\ do\ floco\ decantador\ (m^2)} \quad (4)$$

A partir da concentração ideal indicada pelo resultado do 'Jarteste' realizou-se o cálculo da quantidade de coagulante a ser injetada no sistema pela bomba dosadora, que foi ajustada a 0,51 mL/s, conforme Equações 5 e 6.

$$QT \times CT = QL \times CL + QB \times CB \quad (5)$$

$$QT = QL + QB \quad (6)$$

Nas quais:

QT = Vazão total (L/s)

CT = Concentração total (concentração ideal dada pelo 'Jarteste') (mg/L)

QL = Vazão lodo (L/s)

CL = Concentração lodo (mg/L)

QB = Vazão bomba dosadora (L/s)

CB = Concentração bomba dosadora (mg/L)

A concentração base do coagulante PAC comercial utilizado era de 1330 mg/mL (1330 g/L). O coagulante foi diluído para se obter a concentração apropriada na bomba dosadora e consequentemente a concentração ideal indicada previamente pelo 'Jarteste'.

Durante a realização do processo, quando observava-se que a parte mais densa do lodo havia preenchido toda a pirâmide e todo o prolongador do FDML e que a manta de lodo tendia a subir no decantador de alta taxa (Figura 27), era efetuada uma descarga de lodo, pela

parte inferior do tronco de pirâmide, de volume equivalente ao prolongador (15 L) (Figura 25 – Ponto B). Após a descarga do lodo adensado do FDML realizava-se também uma descarga do lodo adensado do DC, por meio de uma tubulação de 1” na base do DC (Figura 25 – Ponto A). No total eram dadas quatro descargas no FDML e quatro no DC. Nas Figuras 28 e 29 o sistema em funcionamento.

Figura 27 – Processo de decantação

Fonte: Própria autora.

Figura 28 – Sobrenadante levado para a rede de esgoto

Fonte: Própria autora.

Figura 29 – Sistema DC-FDML em funcionamento

Fonte: Própria autora.

4.6 Drenagem

O material coletado em cada uma das quatro descargas dadas no FDML, foi desaguado num mesmo leito drenante (LD-FDML). Enquanto que das quatro descargas do DC, o material das duas primeiras foi para um leito drenante (LD1-DC) e o das duas últimas foi para um segundo leito drenante (LD2-DC).

Os leitos de drenagem, em escala de laboratório, utilizados na pesquisa, foram baseados nas configurações de leitos utilizados por Reis (2011) e adaptados com outros materiais para este trabalho. Desta forma, constituindo-se de bandeja plástica (70 cm x 40 cm x 15 cm) com capacidade volumétrica de 36 L, de fundo perfurado (40 furos de 1 cm de diâmetro) e forrada com manta sintética não texturizada (4 mm de espessura), sobreposta a uma segunda bandeja com as mesmas dimensões e fundo intacto, utilizada para a contenção do líquido drenado.

As Figuras 30 e 31 apresentam detalhes da montagem do leito de drenagem. Nas figuras 32 e 33, o leito de drenagem vazio e em uso, respectivamente.

Figura 30 – Bandeja de fundo perfurado

Fonte: Própria autora.

Figura 31 – Bandeja de fundo perfurado revestida com manta sintética

Fonte: Própria autora.

Figura 32 – Leito de drenagem constituído de bandeja de fundo perfurado revestida com manta sintética sobre bandeja sem furos.

Fonte: Própria autora.

Figura 33 – Leito de drenagem em uso, mostrando o acúmulo de líquido drenado.

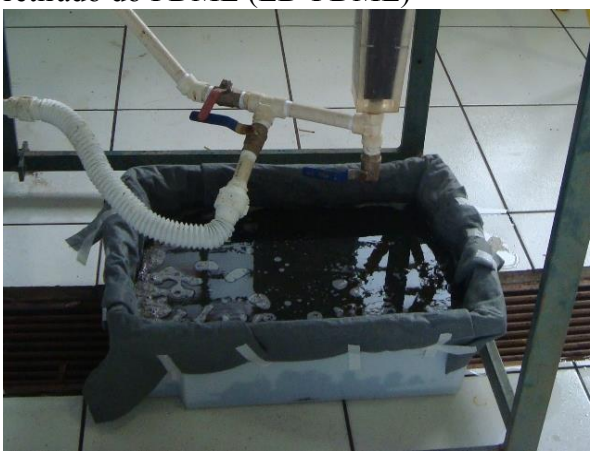
Fonte: Própria autora.

Nas figuras 34 e 35 os leitos de drenagem com material coletado no DC e no FDML, respectivamente.

Figura 34 – Leito de drenagem com lodo retirado do DC (LD1-DC)

Fonte: Própria autora.

Figura 35 – Leito de drenagem com lodo retirado do FDML (LD-FDML)



Fonte: Própria autora.

4.7 Secagem

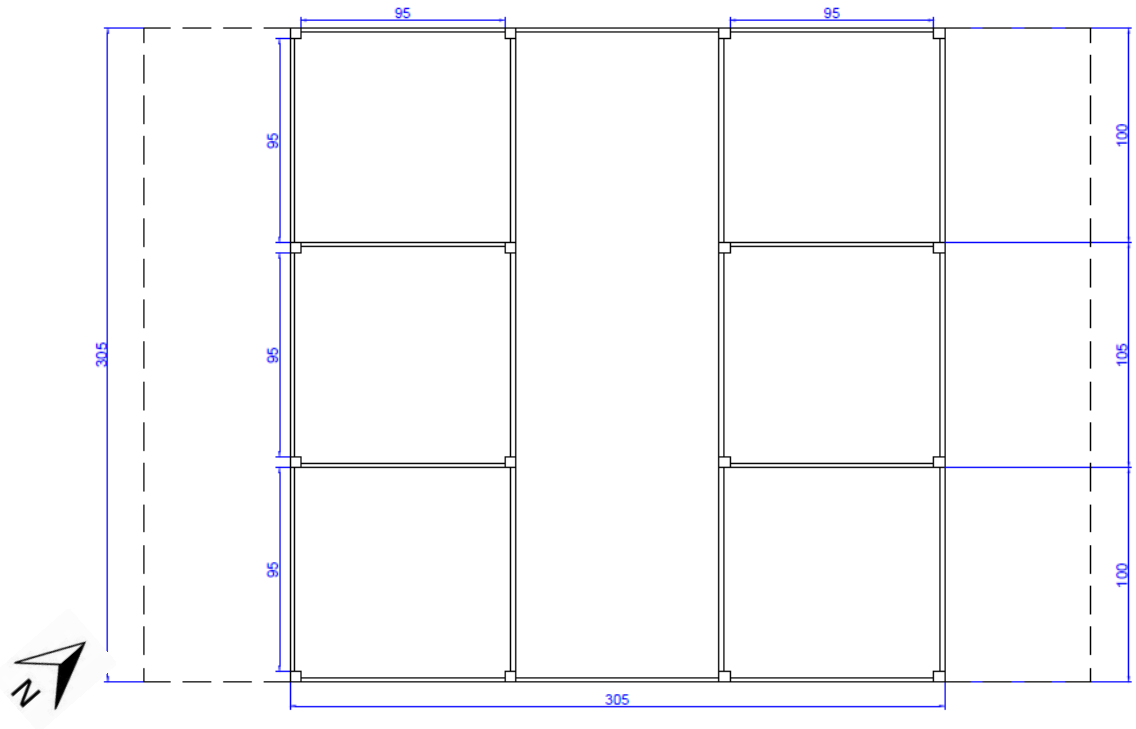
Após a drenagem foram adotados dois diferentes processos de secagem de lodo: secagem natural em estufa agrícola e secagem térmica com lâmpadas de infravermelho.

4.7.1 Secagem em estufa agrícola

O leito de secagem natural constituía-se por uma estufa agrícola de plástico transparente e um leito de drenagem como o da Figura 32, ambos inspirados nas configurações de leitos utilizadas por Reis (2011) e adaptados para o presente experimento.

A planta baixa da estrutura da estufa agrícola encontra-se na Figura 36. A estrutura da estufa agrícola foi construída com uma base de 3x3 metros e maior altura de 2,78 metros. O material utilizado foi metalon com 1,5 mm de espessura e dimensões variadas como mostra a Figura 37. A cobertura foi de plástico transparente com 150 micras de espessura. Na cobertura da estufa uma abertura de 20 cm permitia maior ventilação.

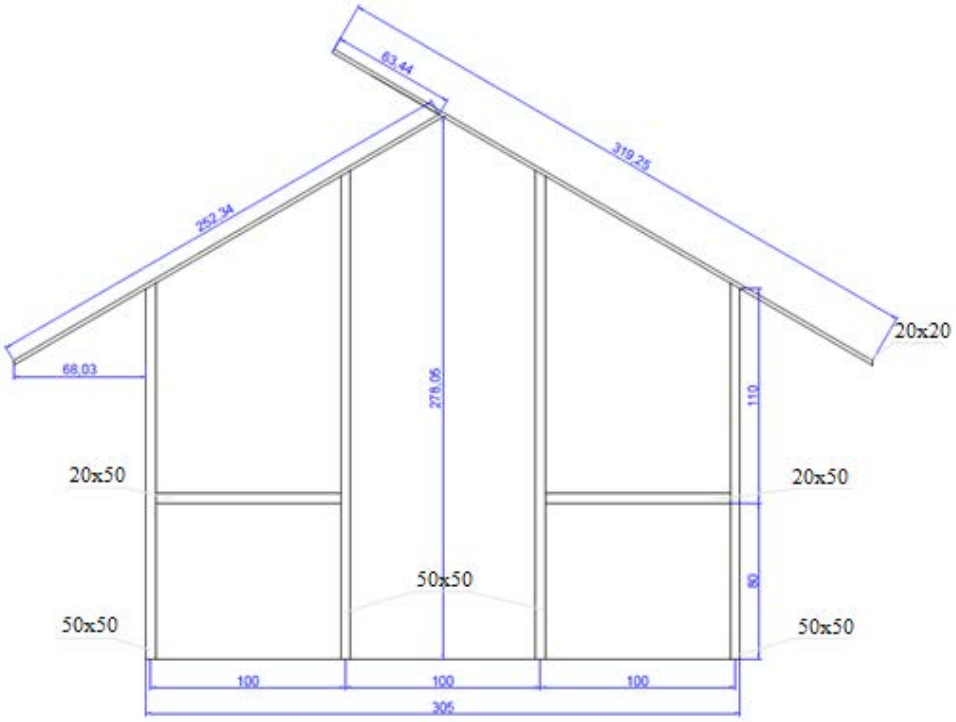
Figura 36 - Planta baixa da estrutura da estufa agrícola com dimensões em cm e direção do norte magnético no qual ela foi construída



Fonte: Própria autora.

Na Figura 37, a vista frontal da estrutura da estufa utilizada para esta pesquisa.

Figura 37 - Vista frontal da estrutura da estufa com dimensões em cm e dimensões do metalon em mm



Fonte: Própria autora.

A Figura 38 mostra a estufa agrícola construída nos fundos do Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira para a secagem do lodo.

Figura 38 - Estufa agrícola construída para secagem do lodo

Fonte: Própria autora.

O leito drenante com material coletado era disposto dentro da estufa, sobre vigas de madeira, constituindo juntos o leito de secagem. O material coletado, tanto no DC como no FDML, permaneceu na estufa por 10 dias. Os valores de umidade foram analisados diariamente. Para essa determinação coletava-se uma amostra do lodo de aproximadamente 20 g. Esta amostra era pesada e colocada em uma estufa a 110°C por 24 horas e após esfriar em dessecador era pesada novamente. O teor da umidade com base úmida dado em porcentagem é dado pela divisão da massa de água pela massa da amostra úmida multiplicado por cem. No décimo dia de secagem natural realizava-se a caracterização do material (Tabela 1). Os métodos de análises encontram-se destacados na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros de caracterização do lodo.

Análises	Lodo bruto	Sobrenadante	Lodo seco (estufa agrícola)	
			DC	FDML
pH	X	X	X	X
Turbidez	X	X		
Temperatura	X	X		
Sólidos totais	X	X	X	X
Sólidos totais fixos	X	X	X	X
Sólidos totais voláteis	X	X	X	X
Sólidos suspensos totais	X	X		
Sólidos suspensos fixos	X	X		
Sólidos suspensos voláteis	X	X		
Sólidos dissolvidos totais	X	X		
Sólidos dissolvidos fixos	X	X		
Sólidos dissolvidos voláteis	X	X		
Nitrogênio	X	X	X	X
Fósforo	X	X	X	X
Alumínio			X	X
DQO	X	X		
DBO	X	X		
Coliformes	X	X	X	X
Ovos de helmintos, cistos e oocistos protozoários.	X	X		

Fonte: Própria autora.

Tabela 2 – Parâmetros do lodo de lagoa de estabilização analisados, métodos e equipamentos utilizados.

Parâmetros	Métodos e equipamentos
pH	Método eletrométrico de acordo com APHA (2005) 4500-H+ pH Value Standard Methods, utilizando pHmetro.
Turbidez	Uso do turbidímetro "Thermo Scientific Orion AQUAfast II AQ2010" que segue os padrões estabelecidos pela norma ISO 7027 (1990) em relação à Unidade de turbidez e critérios para a medição turbidimétrica.
Temperatura	Termômetro de mercúrio.
Sólidos totais	Standard Test Methods – 2540B, APHA (2005). Amostra é homogeneizada e evaporada até peso constate em temperatura de 103ºC~105°C.
Sólidos totais fixos e voláteis	Standard Test Methods – 2540E, APHA (2005). Amostra resultante de sólidos totais é evaporada a 550°C, sólidos resultantes são considerados fixos e os evaporados voláteis.
Sólidos suspensos totais	Standard Test Methods – 2540D, APHA (2005). Amostra é homogeneizada, passa por membrana filtrante e é levada à estufa com temperatura de 103ºC~105°C.
Sólidos suspensos fixos e voláteis	Standard Test Methods – 2540E, APHA (2005). Amostra resultante de sólidos suspensos totais é evaporada a 550°C, sólidos resultantes são considerados fixos e os evaporados voláteis.
Sólidos dissolvidos	Os sólidos dissolvidos são a diferença entre os sólidos totais e os sólidos suspensos.
Nitrogênio total	Método 10072 – Método digestão no reator a 103~106ºC do Persulfato 350 N, Total TNT - Leitura realizada no espectrofotômetro Hach DR/5000.
Fósforo total	Método 8190 – Método digestão ácida do Persulfato Phosver 3 no reator a 150ºC. Leitura realizada no espectrofotômetro Hach DR/5000.
Alumínio	Método 8012 – Leitura realizada no espectrofotômetro Hach DR/5000.
Demanda química de oxigênio (DQO)	Método 8000 – Digestão no reator a 150ºC – Determinação colorimétrica 430 COD HR (200 – 15 000 mg/L DQO) - Leitura realizada no espectrofotômetro Hach DR/5000.
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	Método Winkler.
Coliformes termotolerantes	Método 3M Petrifilm para contagem de coliformes com diferenciação de *E. coli.*
Ovos de helmintos, cistos e oocistos de protozoários	Técnica de Willis-Mollay, 1921 Modificada (Flutuação em solução de sal).

Fonte: Própria autora.

Dados climáticos diários como temperatura média, umidade relativa do ar média, insolação, velocidade do vento, radiação global e evapotranspiração por tanque classe A e por Penman Monteith foram retirados do site www.agr.feis.unesp.br/clima.php, do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

O método Penman-Monteith, método padrão internacional, de acordo com o Boletim Irrigation and Drainage 56 da FAO, para calcular a ETo pode ser expresso como na Equação 7:

$$\mathrm{EToPM} = \frac{0.408\Delta\left(Rn - G\right) + \gamma \dfrac{900}{T_a + 273} U_2 \left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0.34U_2\right)} \tag{7}$$

Na qual:

EToPM = evapotranspiração de referência ($mm \cdot d^{-1}$)

Rn = radiação líquida ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)

Γ = constante psicométrica ($kPa \cdot C^{-1}$)

$_s$ = pressão de vapor de saturação (kPa)

$_{um}$ = pressão de vapor (kPa)

t $_{uma}$ = média da temperatura do ar diariamente (C)

L_2 = velocidade do vento média diária a 2 m ($m \cdot s^{-1}$).

Foi avaliada a relação entre as variáveis climáticas e de secagem, visando buscar a intensidade da influência de uma em outra, para isso aplicou-se o coeficiente de correlação de Pearson, que mede a força ou grau de relacionamento entre duas variáveis. O coeficiente de Pearson é utilizado para dados que estão linearmente relacionados para variáveis escalares. A fórmula da correlação é expressa na Equação 8 e os intervalos que a classificam na Tabela 3.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\sum (x_i - \bar{x})^2\right)\left(\sum (y_i - \bar{y})^2\right)}} \tag{8}$$

Tabela 3 – Classificação da correlação baseada no Coeficiente de Correlação de Pearson

r	Classificação da correlação
- 1,00	Correlação negativa perfeita
-1,00 ; - 0,90	Correlação negativa muito alta
- 0,90 ; - 0,70	Correlação negativa alta
- 0,70 ; - 0,40	Correlação negativa moderada
- 0,40 ; - 0,20	Correlação negativa baixa
- 0,20 ; 0,00	Correlação negativa muito baixa
0,00	Correlação nula
0,00 ; 0,20	Correlação positiva muito baixa
0,20 ; 0,40	Correlação positiva baixa
0,40 ; 0,70	Correlação positiva moderada
0,70 ; 0,90	Correlação positiva alta
0,90 ; 1,00	Correlação positiva muito alta
1,00	Correlação positiva perfeita

Fonte: Adaptado de Pearson, Fisher e Inman (1994).

Todo o procedimento descrito foi realizado em 16 ocasiões. Utilizou-se a expressão dos dados em função contínua do tempo, para acomodar as possíveis variações, servindo assim, cada tempo uma repetição amostral. Desta forma foram 16 repetições.

Somente as pesquisas de presença de protozoários e de helmintos e a contagem de coliformes termotolerantes que não foram vistas nas 16 repetições. A pesquisa de presença de protozoários e de helmintos foi realizada em amostras do lodo bruto e do sobrenadante da oitava repetição. Já as análises para contagem de coliformes termotolerantes com diferenciação de *E. coli* em amostras do lodo bruto e do sobrenadante e posteriormente em amostras dos lodos secos em estufa agrícola, foram realizadas nas repetições 11, 12 e 16. Para tal utilizou-se método com "3M Petrifilm para contagem de coliformes *E. coli*" (Figura 39), onde o gás produzido pelos coliformes fica retido pelo filme plástico e o corante indicador na placa dá coloração as colônias, facilitando a identificação e contagem. *E. coli* produz Beta-Glicuronidase que reage com o corante indicador da placa, formando um precipitado azul ao redor da colônia.

Figura 39 – 3M Petrifilm para contagem de coliformes *E. coli*. a) placa sem amostra; b) aplicação da amostra e c) colônia de *E. coli* formada após incubação.

a) 3M Petrifilm b) Inoculação com amostra c) Colônia azul (*E. coli*)

Fonte: 3M (2014)

Nas repetições 11 e 12 foram realizadas seis diluições para o lodo bruto (1:100; 1:1000; 1:10000; 1:100000; 1:1000000; 1:10000000) buscando uma boa visualização das colônias. Para o sobrenadante utilizou-se quatro diluições (1:10; 1:100; 1:1000; 1:10000) com a mesma finalidade. Na repetição 16 foram quatro diluições diferentes para o lodo bruto (1:10; 1:20; 1:50; 1:100) e três para o sobrenadante (1:1-puro; 1:2; 1:10).

Para as análises do lodo seco do DC e do FDML, nas repetições 11, 12 e 16, apanhou-se 100 mg de material, que foi diluído em 10 ml de água.

Das diluições preparadas retirava-se 1 ml que era inoculado no 3M Petrifilm e este permanecia incubado a 45°C por 24 horas (Figura 40).

Figura 40 - 3M Petrifilm inoculados e incubados a 45°C.

Fonte: Própria autora.

4.7.2 Secagem por radiação infravermelha

Para a realização da pesquisa foi construído um secador térmico (Figuras 41 e 44), de estrutura simples e em escala de laboratório, em forma de caixa de 93 cm de comprimento por 32 cm de largura e 64 cm de altura, com placas de aço de 1,2 mm de espessura nas laterais. Foram utilizadas cantoneiras e prateleiras de uma estante de escritório, para a sustentação da caixa; o isolamento térmico foi feito com plaquetas refratárias (Figura 43) coladas às prateleiras com massa plástica, além da manta térmica de alumínio.

Quatro lâmpadas de infravermelho (Figura 42), de 220V e 250W cada (marca Ourolux), foram encaixadas na parte superior, a 30 cm de onde foram colocadas as amostras. Uma das laterais foi fechada com as placas de aço e a outra com uma grelha de ferro, para permitir a saída de calor e evitar temperaturas acima das desejadas. Para que as amostras pudessem ser manuseadas com facilidade, a frente contava com uma abertura de 25 cm.

Figura 41 – Secador térmico antes da colocação da placa frontal, para visualização das 4 lâmpadas ligadas

Fonte: Própria autora.

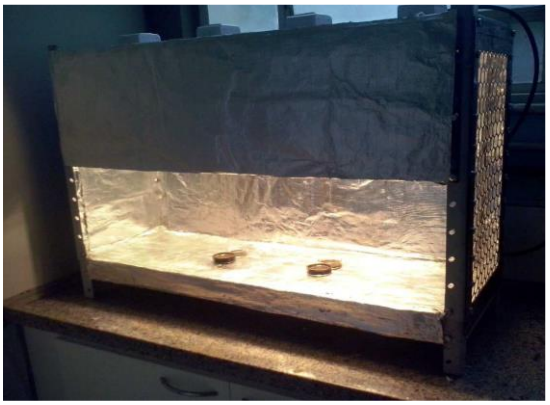
Figura 42 – Lâmpada Infravermelha

Fonte: Própria autora.

Figura 43 – Plaqueta refratária utilizada

Fonte: Própria autora.

Figura 44 – Secador térmico



Fonte: Própria autora.

Amostras de lodo adensado do DC e do FDML foram coletadas durante o funcionamento do sistema em 7 das 16 repetições (6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12).

Para realizar a secagem, foram utilizadas placas de Petri de 50 mm x 15 mm. As placas foram pesadas em balança eletrônica e o lodo foi colocado nas placas de acordo com a data e a origem (DC ou FDML) e de modo a ficar com espessura de aproximadamente 1 cm. Posteriormente repetiu-se a pesagem e foi iniciada a secagem.

Foram feitas variações tanto na intensidade de radiação com 2, 3 e 4 lâmpadas, como também nos períodos de exposição, verificando-se a massa da placa com amostra a cada 0,5 h de secagem.

A disposição das placas no secador era modificada a cada 0,5 h de secagem, para que todas pudessem receber a mesma intensidade, mantendo sempre a amostra exposta diretamente à radiação. Após a realização das medições as amostras foram levadas para estufa convencional, a cerca de 100ºC por no mínimo 3 horas, retiradas da estufa, resfriadas em dessecador e pesadas.

Outro experimento de secagem com lâmpadas de infravermelho foi realizado com o objetivo de avaliar se um período de drenagem, antes da amostra ser levada ao secador, melhoraria os resultados de secagem e também para avaliar se o posicionamento das lâmpadas, em relação as amostras, gerava diferenças na umidade final. Desta vez utilizaram-se apenas amostras de lodo adensado do DC, de uma 17ª repetição, realizada exclusivamente para essas verificações.

O lodo coletado no DC passou pelas mesmas etapas do experimento realizado nas 16 repetições, incluindo a etapa da estufa agrícola, contudo sendo retirado da estufa no terceiro dia de secagem.

A figura 45 mostra o lodo adensado no momento de sua coleta no DC e após três dias de secagem em estufa agrícola.

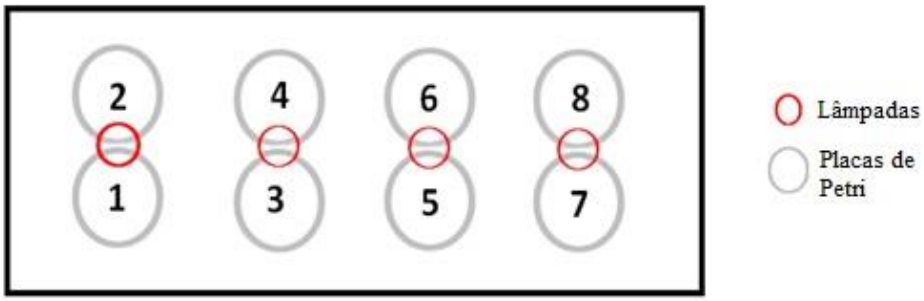
Figura 45 - Lodo adensado por DC e após três dias de secagem em estufa agrícola

Fonte: Própria autora.

Posteriormente o lodo foi levado ao secador com lâmpadas de infravermelho.

No secador foram marcados previamente os posicionamentos das lâmpadas e das placas de Petri, com placas abaixo do foco das lâmpadas, como é esquematizado na Figura 46.

Figura 46 - Posicionamento das lâmpadas e placas de Petri (numeração de 1 a 8)



Fonte: Adaptado de Leite (2014).

Realizou-se o experimento com mesma espessura de camada de lodo de 1 cm e a verificação do teor de sólidos do lodo foi feita em períodos de exposição variáveis (0,5; 1,0; 2,0 e 4,0h), com 1 lâmpada ligada no secador, em duas combinações diferentes (primeira lâmpada ligada e terceira lâmpada ligada) (Figura 47).

Figura 47 - Combinações de secagem. a) primeira lâmpada ligada b) terceira lâmpada ligada

a) b)

Fonte: Adaptado de Leite (2014).

Foram realizadas 3 repetições para cada combinação de tempo de exposição, totalizando assim, 24 ensaios. O teor de umidade em cada combinação foi mensurado através das pesagens do lodo antes e após a exposição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sistema Decantador de Coluna – Floco-Decantador de Manta de Lodo

Na avaliação das características do lodo bruto afluente do DC e do sobrenadante efluente do FDML, expressas nas Tabelas 4, 5 e 6, observa-se que quase todos os parâmetros analisados apresentaram diferença significativa. As exceções foram a temperatura, os STV e os SDT. Os demais parâmetros resultaram em altas remoções, comprovando a efetividade do sistema de separação e ocasionando no material uma diferença visual bastante acentuada (Figura 48).

Figura 48 - Diferença visual de amostra do lodo bruto e do sobrenadante

Fonte: Própria autora.

Tabela 4 - Características do lodo bruto afluente do DC.

Parâmetros		Repetições															
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Turbidez	ntu	24900	2640	20100	43700	8100	136900	6000	8700	56100	35600	8400	4200	300	200	700	1400
pH		.	.	7,22	7,12	7,15	7,04	7,7	6,96	7,08	6,87	6,63	6,88	7,34	7,25	6,79	6,81
Temperatura	ºC	.	.	24	24	26	24	.	22	20	22	24	24	24	28	30	27
DBO	mg/L	.	.	.	.	.	1298	905	.	.	.	767	413	138	157	236	197
DQO	mg/L	.	.	.	.	.	9600	6800	10300	16400	21400	10100	8500	1800	800	3700	1500
Nitrogênio	mg/L	1300	800	1000	400	600	100	400	300	300	600	260	600	100	100	.	.
Fósforo	mg/L	1290	570	1340	830	710	490	360	500	560	640	360	290	530	550	.	.
ST	mg/L	27958	2916	17584	9156	11300	24418	18233	11145	15133	18000	13298	3075	26769	15862	8340	18769
STF	mg/L	26974	2232	15768	6290	5274	11310	7335	8550	12413	14823	10085	2573	766	598	652	2102
STV	mg/L	984	684	1816	2866	6026	13108	10898	2595	2720	3178	3213	503	26003	15264	7688	16667
SST	mg/L	20700	1600	20400	12800	9800	11800	10800	10600	10000	6900	7100	4500	380	242	2220	1760
SSF	mg/L	16700	0	7900	7200	4600	8400	7300	6500	5800	4500	3600	1400	210	114	980	860
SSV	mg/L	4000	1600	12500	5600	5200	3400	3500	4100	4200	2400	3500	3100	170	128	1240	900
SDT	mg/L	7258	1316	.	.	1500	12618	7433	545	5133	11100	6198	.	26389	15620	6120	17009
SDF	mg/L	10274	2232	7868	.	674	2910	35	2050	6613	10323	6485	1173	556	484	-328	1242
SDV	mg/L	.	.	.	.	826	9708	7398	.	.	778	.	.	25833	15136	6448	15767

Fonte: Própria autora.

Tabela 5 - Características do sobrenadante efluente do FDML.

Parâmetros		Repetições															
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Turbidez	ntu	98	61	214	39	79	38	73	61	47	54	18	50	39	27	39	81
pH		.	.	6,92	6,59	6,5	6,78	6,73	6,67	6,66	6,34	6,21	6,75	6,77	6,4	6,58	6,6
Temperatura	ºC	.	.	26	25	26	26	.	22	20	23	24	24	24	28	29	28
DBO	mg/L	.	.	.	.	.	177	78	.	.	.	12	30	12	29	0	0
DQO	mg/L	.	.	.	.	.	177	260	190	180	603	88	179	162	97	145	241
Nitrogênio	mg/L	71	77	68	70	73	50	56	68	72	76	49	63	94	88	.	.
Fósforo	mg/L	12,6	5,7	20	6,4	7,7	3,4	7,5	10,6	10,7	14,2	2,4	6,3	7,9	6	.	.
ST	mg/L	.	1080	4382	1544	1052	1605	665	665	3330	648	765	845	11522	16050	14858	6892
STF	mg/L	.	978	842	668	534	563	565	573	668	583	743	763	567	745	295	434
STV	mg/L	.	102	3540	876	518	1043	100	93	2663	65	23	83	10955	15305	14563	6458
SST	mg/L	.	58	2000	56	52	44	93	70	26	45	14	40	78	78	40	138
SSF	mg/L	.	8	200	10	35	15	0	26	13	3	9	24	30	2	4	18
SSV	mg/L	.	50	1800	46	17	29	93	44	13	42	5	16	48	76	36	120
SDT	mg/L	.	1022	2382	1488	1000	1561	572	595	3304	603	751	805	11444	15972	14818	6754
SDF	mg/L	.	970	642	658	499	548	565	547	655	580	734	739	537	743	291	416
SDV	mg/L	.	52	1740	830	501	1014	7	49	2650	23	18	67	10907	15229	14527	6338

Fonte: Própria autora.

Como visto, o tratamento do lodo bruto através do sistema DC-FDML gerou grande diferença na distribuição de valores de turbidez entre as amostras de entrada e de saída. O sistema promoveu redução significativa da turbidez. O material de entrada, escuro e denso, devido a presença de maior quantidade de partículas, resultou na saída de um sobrenadante líquido bastante clarificado e no lodo adensado, em separado. A máxima remoção da turbidez alcançou 99,97%, enquanto a menor remoção foi de 86,50%.

Observou-se no experimento uma mudança na faixa de pH. Inicialmente o pH encontrava-se na média em 7,06 e após a passagem pelo sistema em torno de 6,61. Esta redução mostrou-se significativa e pode ser explicada pela adição do coagulante (PAC) ao sistema.

A temperatura do material permaneceu a mesma ou teve pequeno aumento, entre um e dois graus. Na média a temperatura foi de 24,54ºC no lodo bruto e 25ºC no sobrenadante. Este aumento não se mostrou estatisticamente significativo e provavelmente ocorreu devido a interferência das altas temperaturas do ambiente.

Observa-se que os intervalos de ocorrência dos valores de DBO de entrada e de saída do dispositivo apresentaram elevada diferença. A remoção média da DBO alcançada pelo dispositivo foi de 91,77%, chegando a 100% de remoção em duas das repetições e a 81,53% no caso da menor remoção. Esses valores indicam a remoção da matéria orgânica e a grande melhoria na condição do efluente para ser lançado em corpos d`água com menor impacto ambiental, uma vez que reduz a quantidade de oxigênio dissolvido necessária aos microorganismos na estabilização da matéria orgânica em decomposição lançada.

Assim como a remoção da DBO, esperava-se também a remoção da DQO pelo sistema. A maior redução da DQO observada foi de 99,13% e a menor de 83,93%. Desta forma o dispositivo mostrou capacidade de reduzir uma DQO muito grande para uma DQO fraca, indicando a menor necessidade de consumo de oxigênio existente no corpo d`água onde poderá ser lançado o sobrenadante.

Pode-se observar êxito na remoção de nitrogênio pelo dispositivo. A maior remoção de nitrogênio do lodo alcançou 94,54% e a média de remoção observada ficou em 85,79%.

Da mesma maneira, observa-se o sucesso para a remoção de fósforo do lodo. A máxima remoção alcançada foi de 99,33% e mínima de 97,78%.

Os resultados de remoção de nitrogênio e fósforo são bastante relevantes e demonstram a alta capacidade do dispositivo na recuperação desses elementos. Este dispositivo, se implantado no tratamento de lodos da ETE do município de Ilha Solteira, ou em outros municípios com características semelhantes, traria vantagens que vão desde a

retirada desses elementos do sistema de tratamento de esgotos, do qual podem ser encaminhados aos corpos d´água pelo arraste de lodo, que aflora nas lagoas conforme seu funcionamento durante os anos, até a utilização destes como nutrientes em culturas agrícolas quando possível.

É importante ressaltar que a redução das cargas de nitrogênio e principalmente de fósforo lançadas nos corpos d´água reduzem a intensidade do fenômeno de eutrofização, uma vez que estes são os dois elementos mais importantes para sua ocorrência.

De maneira geral a captura de sólidos pelo dispositivo foi bastante significativa, gerando grande diferença na composição destes no lodo de entrada e de saída.

A captura de ST ficou entre 56,96% e 96,40%. Da mesma forma a captura de STF se mostrou bastante significativa. Valores mais altos de STV, e consequentemente de SDV, foram encontrados nos lodos brutos e nos sobrenadantes das repetições 13, 14, 15 e 16, que também apresentaram valores menores de turbidez, DBO e DQO, indicando que os lodos destas repetições, apesar de retirados do mesmo ponto de coleta que os demais, apresentavam algumas características diferentes. Estas diferenças podem indicar que a turbulência ocasionada por coletas no mesmo ponto causaram a mistura do lodo em estágio mais avançado com o lodo mais recente, o que numa situação real de implantação do dispositivo em uma ETE provavelmente também ocorrerá.

O grupo dos sólidos suspensos foi o que obteve maior eficiência de captura pelo dispositivo. Entre eles, os que mais tiveram sucesso foram os SSF, seguido pelos SST, que alcançaram 99,80% de remoção, e pelos SSV.

A captura de SDT, apesar de não ter gerado diferença estatística, resultou em eficiência de 53,77%. Para os SDF a eficiência também foi relevante.

Tabela 6 - Características do lodo bruto afluente do DC e do sobrenadante efluente do FDML.

Parâmetro		1 Lodo Bruto	2 Sobrenadante	Eficiência média de remoção (%)
Turbidez	ntu	22371,00 A	64,00 B	99,71
pH		7,06 A	6,61 B	6,37
Temperatura	ºC	24,54 A	25,00 A	-1,87
DBO	mg/L	513,90 A	42,30 B	91,77
DQO	mg/L	8264,00 A	211,00 B	97,45
Nitrogênio	mg/L	490,00 A	69,64 B	85,79
Fósforo	mg/L	644,29 A	8,67 B	98,65
ST	mg/L	15122,00 A	4394,00 B	70,94
STF	mg/L	7984,00 A	635,00 B	92,05
STV	mg/L	7138,00 A	3759,00 A	47,34
SST	mg/L	8225,00 A	189,00 B	97,70
SSF	mg/L	4754,00 A	26,00 B	99,45
SSV	mg/L	3471,10 A	162,30 B	95,32
SDT	mg/L	9095,00 A	4205,00 A	53,77
SDF	mg/L	3506,10 A	608,30 B	82,65
SDV	mg/L	10237,00 A	3597,00 B	64,86

Médias seguidas pela mesma letra dentro da linha não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Própria autora.

Assim como era esperado, o uso do sistema DC-FDML promoveu a separação de partículas sólidas e líquidas. Conseguiu-se obter um líquido sobrenadante clarificado e uma camada de lodo adensado, sendo desta maneira alcançado o objetivo de gerar um material com baixas concentrações de sólidos em suspensão e um lodo com menor volume, para facilitar o seu posterior tratamento e disposição final.

Desta forma, mais uma vantagem da instalação do dispositivo no tratamento de lodo nas ETEs seria o ganho de volume nas lagoas, gerado pela retirada do lodo nelas acumulado. Esta retirada traria melhoria na eficiência do tratamento das águas residuárias, uma vez que o grande volume de lodo acumulado nas lagoas compromete a eficiência do sistema pela diminuição do tempo de detenção das mesmas.

O DC demonstrou ser um dispositivo eficiente na captura de sólidos, assim como foi para Matsumoto et al (2005), que o utilizaram com adição de coagulante no pré-tratamento de reator anaeróbio para efluentes de curtume, com sistema operando a uma vazão de 125 L/h.

Para Maigual-Enríquez (2011), em estudo de Sistemas de Recirculação para Aquicultura, os valores de remoção dos ST, STV e SST observados no DC foram de 44,44%, 45,65% e 71,71% respectivamente, e a eficiência para a remoção da DBO e DQO foi de 48,01%. Desta forma podemos observar que o uso do DC seguido pelo FDML, aplicado no presente trabalho, conseguiu elevar a remoção desses parâmetros mesmo com lodo de lagoa de estabilização, um material de maior densidade.

Moreira et al. (2013a) utilizando o FDML para o adensamento de lodo de lagoas de estabilização, também observaram queda nos valores de turbidez, cor, DQO, fósforo total e nitrogênio total do efluente. A máxima eficiência de remoção de nitrogênio chegou a 90% e a de fósforo a 98%, ambas ocorrendo com taxa de aplicação de 120 m^3/m^2/dia e PAC como coagulante. A partir destes valores podemos observar que com o uso de DC seguido por FDML os valores de remoção alcançados podem ser maiores, como no caso foram de 94,54% para o nitrogênio e 99,33% para o fósforo, tornando-os muito interessantes como ferramenta para o aproveitamento agrícola do lodo.

5.2 Secagem em estufa agrícola

Nas figuras 49 e 50 pode-se observar o interior da estufa agrícola durante a secagem de lodos do DC e FDML.

Figura 49 - Lodo adensado disposto no leito de secagem.

Fonte: Própria autora.

Figura 50 - Leitos com lodo adensado ao longo da secagem natural

Fonte: Própria autora.

Foi verificado estatisticamente que até o sexto dia de secagem natural os lodos oriundos do DC e do FDML se comportaram de maneira semelhante. A partir do sétimo dia de secagem ocorreram diferenças, com o lodo do FDML apresentando menores teores de umidade (Tabelas 7 e 8). O gráfico da Figura 51 representa a secagem média de lodo nas 16 repetições realizadas. No Anexo 1 são demonstrados os dados climáticos obtidos diariamente durante o período de cada repetição.

Tabela 7 - Umidade média do lodo, previamente adensado por DC e por FDML, durante o período de 10 dias de secagem em estufa agrícola.

	Dias de secagem											
Decantador	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**Médias**
1 DC	96,31 A	90,81 A	85,69 A	79,19 A	70,94 A	64,19 A	60,00 A	55,94 A	48,69 A	41,63 A	35,25 A	66,23 A
2 FDML	98,63 A	93,56 A	88,44 A	80,25 A	67,81 A	57,75 A	47,88 A	34,44 B	26,69 B	17,87 B	14,53 B	57,50 B
Médias	97,47	92,19	87,06	79,72	69,38	60,97	53,94	45,19	37,69	30,13	25,23	61,88

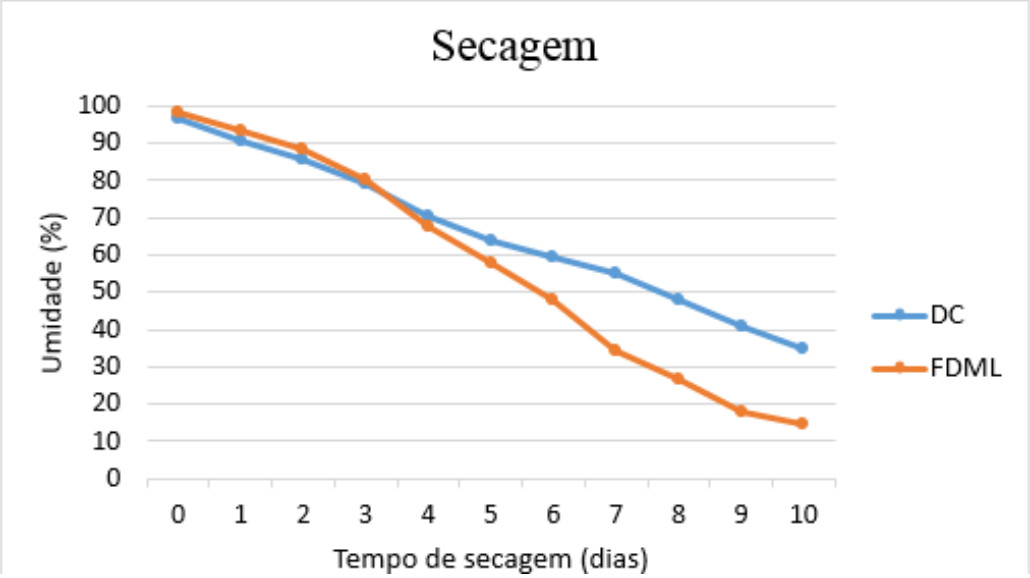
Médias seguidas pela mesma letra dentro da coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: Própria autora.

Tabela 8 - Desdobramento da relação entre a umidade do lodo adensado e os decantadores utilizados no adensamento (DC e FDML) e os dias de secagem em estufa agrícola.

FV	**DF**	**U_LODO**
Tratamento	21	221599,98 **
Decantador	1	7407,72 **
Dias secagem	10	205915,37 **
Deca * dias sec	10	9843,97 *
Erro	328	157345,79
Total	349	378945,77
CV		35,39
Desvio padrão		21,90
Média		61,89

** significativo a 1 % e * significativo a 5 % de probabilidade.
Fonte: Própria autora.

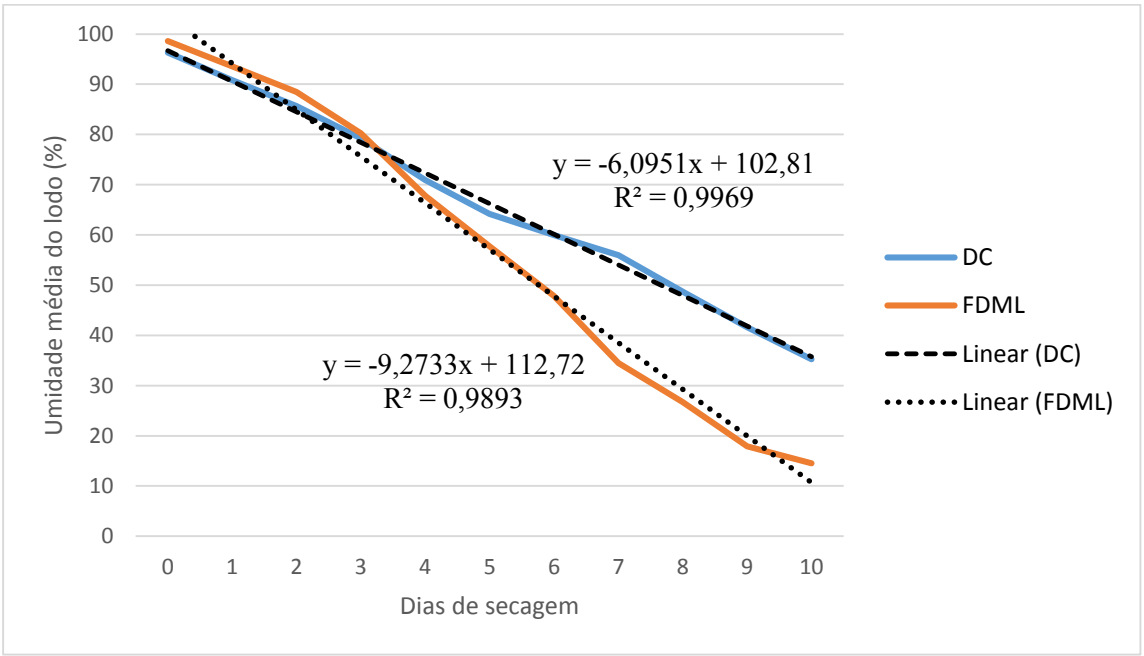
Figura 51 - Gráfico do teor de umidade médio do lodo de lagoa de estabilização adensado durante o tempo de secagem em estufa agrícola.



Fonte: Própria autora.

A partir das médias das umidades observadas pode-se traçar uma linha de tendência para facilitar o entendimento da secagem realizada na estufa agrícola. Na Figura 52 são expressas as linhas de tendência de secagem dos lodos do DC e do FDML.

Figura 52 – Gráfico com linhas de tendência de secagem dos lodos oriundos do DC e do FDML



Fonte: Própria autora.

Na avaliação da relação entre as variáveis climáticas e de secagem, por meio do coeficiente de correlação de Pearson (Tabela 9), que mede a força ou grau de relacionamento entre duas variáveis, os resultados mostraram correlações positivas entre a umidade relativa do ar e a umidade do lodo e entre a chuva e a umidade do lodo. As correlações positivas indicam que quanto maior o valor e o coeficiente de umidade relativa do ar ou o de chuva, maior é a sua relação com o aumento da umidade do lodo. Assim como se esperava que para a temperatura, radiação global, ETO-PNM, velocidade do vento e insolação, as correlações fossem negativas, indicando que altos valores e coeficientes destas variáveis, se relacionam a diminuição da umidade do lodo.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Pearson

	Temperatura	Umidade Relativa do Ar	Radiação Global	ETO PN-M	Velocidade do Vento	Chuva	Insolação
Umidade do Lodo DC	-0,42	0,52	-0,51	-0,57	-0,27	0,12	-0,19
Umidade do Lodo FDML	-0,31	0,41	-0,31	-0,37	-0,16	0,16	-0,13
ETO PN-M	0,72	-0,81	0,92	1	0,71	-0,03	0,61

Fonte: Adaptado de Pearson, Fisher e Inman (1994).

É interessante observar que houve diferenças nos coeficientes das amostras do DC e do FDML em algumas das variáveis. Enquanto para a umidade relativa do ar e para chuva, os valores do DC e do FDML ficaram próximos, resultando em correlações positivas moderadas e correlações positivas muito baixas, respectivamente. E para a insolação as correlações com a umidade do lodo foram negativas e muito baixas nos dois casos. Para Temperatura, Radiação global, ETO e Velocidade do vento, as amostras do DC apresentaram correlações negativas moderada, moderada, moderada e baixa, enquanto para as amostras do FDML os resultados foram correlações negativas baixa, baixa, baixa e muito baixa, respectivamente, indicando que essa diferença possivelmente foi causada pela diferença na textura das amostras do DC e do FDML, uma vez que as condições climáticas as quais as amostras foram expostas eram as mesmas dentro de cada repetição.

Desta forma, entre as variáveis climáticas observadas, as que apresentam maiores correlações com a queda na umidade do lodo são a ETO PN-M, umidade relativa do ar, radiação global e temperatura. A temperatura média ao longo dos dez dias de secagem

permaneceu em 23,36 °C. As médias das máximas e mínimas obtidas foram 30,67 e 17,18 °C, respectivamente.

As variáveis climáticas que menos se correlacionaram com a redução da umidade do lodo foram a insolação e a chuva. Cabe observar que no período em que o experimento foi realizado ocorreram poucas chuvas. Sendo que em 7, das 16 repetições, não ocorreu chuva em nenhum dos dez dias. As maiores ocorrências se deram nas repetições 15 e 16, cada um com 54,6 mm divididos em dois dias e na 1 com 44,6 mm divididos em quatro dias. Desta forma, esta correlação positiva muito baixa verificada pode ser devido a esta mínima presença de dias chuvosos. Contudo observa-se também que mesmo nas repetições 15 e 16 não houve interferência da chuva na velocidade da secagem e a repetição 1 quando comparada as demais mostra-se com secagem bastante lenta, só que neste caso a temperatura baixa é o fator que mais destoa das outras repetições. Desta forma, verificamos que os poucos dias com chuva não causaram alterações significativas na velocidade da secagem, provavelmente em função da cobertura que protegia os leitos da chuva. Isso ressalta a importância do uso de leitos de secagem com cobertura, como também verificado por Melo (2006) e Reis (2011).

Ao analisar as bandejas com lodo adensado do DC, observou-se que a drenagem da água através dos furos da bandeja ocorria nos três primeiros dias de exposição, enquanto as bandejas com o lodo adensado do FDML drenavam apenas no primeiro dia. Nos dois casos, no período de drenagem, a água era perdida também por evaporação e, com o cessar natural da drenagem, a água era perdida somente por evaporação. Observa-se que o fato da água ser perdida por dois meios nos primeiros dias não indica que a taxa de redução da umidade relativa do lodo seja maior neste período, pelo contrário, nota-se um aumento da redução de umidade com o cessar da drenagem. A curva sofre uma inclinação maior quando a umidade relativa chega em torno de 70% para amostras de lodo do DC e 80% para amostras de lodo do FDML, sendo que o aumento da inclinação da curva do gráfico é bem maior para a bandeja com lodo do FDML. A base dessas diferenças encontra-se nas diferentes classes em que a água presente no lodo pode ser dividida, como descrito por Van Haandel e Lettinga (1994).

Os valores médios de redução de umidade encontrados neste experimento mostraram-se relevantes, assim como os resultados obtidos por Melo (2006) em Campina Grande, onde a umidade do lodo chegou a 5% num período de 15 dias de secagem natural.

O uso da estufa agrícola permitiu que as amostras de lodo secassem sob condições climáticas naturais, com a vantagem de não se utilizar nenhuma outra fonte de energia além da energia solar e dos ventos. Este fato merece destaque uma vez que o uso da estufa agrícola não agride o meio ambiente e as fontes de energia usadas são inesgotáveis e limpas.

A seguir é apresentado na Figura 53 a aparência típica da bandeja com o lodo retirado do DC ao longo dos dias de secagem e na Figura 54 as imagens mostram a aparência do lodo retirado do FDML. Ficam nítidas algumas diferenças nas características dos dois materiais, como a textura e a espessura, consequências dos diferentes teores e tamanhos de sólidos contidos em cada material. Nota-se também que ao longo dos dias de secagem algumas rachaduras começam a ocorrer nos materiais. No lodo adensado no DC estas rachaduras ocorrem normalmente por volta do quinto dia de secagem. No lodo adensado pelo FDML as rachaduras ocorrem geralmente desde o terceiro dia de secagem.

Pode ser observada ainda uma tonalidade esverdeada na superfície dos lodos em secagem, geralmente após o terceiro dia de secagem. Isso ressalta a presença de uma cobertura de algas e a produção primária existente no material. Em função disso ocorreram aumentos em alguns parâmetros como DQO, DBO e SV, e consequentemente uma redução na eficiência pode ser notada.

Figura 53 - Evolução da secagem do lodo retirado do DC, com 1, 2, 5 e 10 dias de secagem respectivamente.

Fonte: Própria autora.

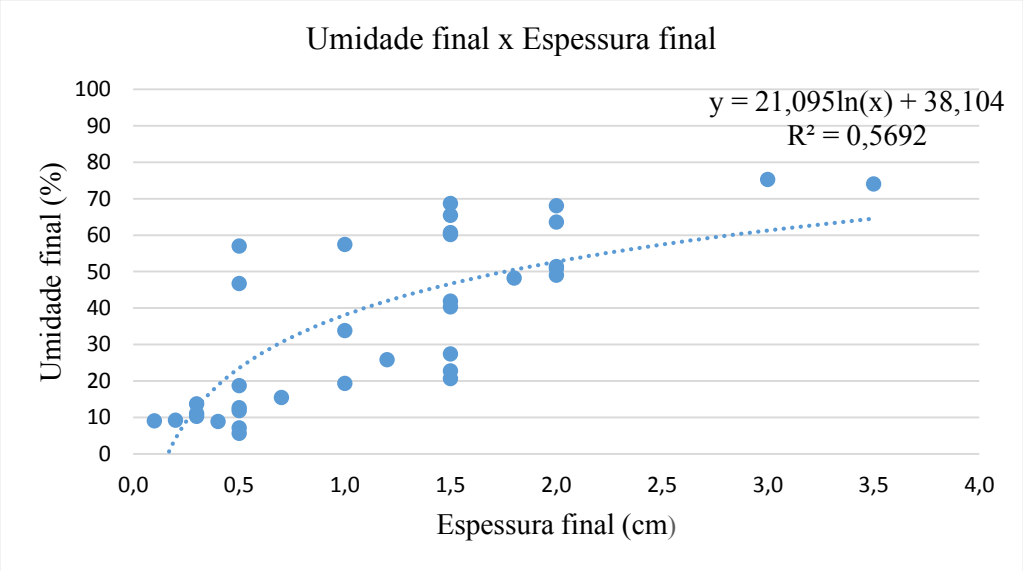
Figura 54 - Evolução da secagem do lodo retirado do FDML, com 3, 5 e 7 dias de secagem respectivamente.

Fonte: Própria autora.

O lodo coletado era descarregado no leito até completar cerca de 12 cm de espessura e no final dos 10 dias de secagem chegou-se a uma espessura média de 1,5 cm no lodo retirado do DC e de 0,5 cm no lodo retirado do FDML.

Se fizermos uma análise relacionando a espessura final da camada de lodo desaguado com a umidade final, aos 10 dias de exposição, podemos observar que na maioria das vezes quanto maior a espessura da camada maior será o valor de umidade. O gráfico da Figura 55 mostra essa relação.

Figura 55 - Gráfico da relação entre a umidade final e a espessura da camada de lodo final, após 10 dias de secagem em estufa agrícola.



Fonte: Própria autora.

Nota-se que para uma mesma espessura de camada encontrou-se diferentes teores de umidade final, isso se justifica pois o material de entrada não é idêntico nas diferentes repetições, trazendo diferentes composições de sólidos desde o momento em que fora retirado da lagoa de estabilização, além das diferentes condições climáticas a que foram expostas.

Se compararmos as três bandejas oriundas de cada repetição (duas do DC e uma do FDML), que ficaram sob as mesmas condições climáticas, apenas em dois casos a menor espessura resultou em um valor de umidade maior, porém isso ocorreu quando os valores de umidade se encontravam muito baixos, entre 13,71 e 5,65%. Desta forma, provavelmente houve absorção da umidade do ar, assim como também observou Melo (2006).

O aspecto do material após 10 dias de secagem pode ser visto na Figura 56.

Figura 56 – Amostras de lodo após 10 dias de secagem em estufa agrícola

Fonte: Própria autora.

Os teores de nutrientes e sólidos das amostras dos lodos secos encontram-se na Tabela 10. Nota-se a superioridade da eficiência do FDML em relação ao DC na remoção de nitrogênio, fósforo, ST e STF.

Tabela 10 - Teores de nutrientes e sólidos dos lodos secos oriundos de material adensado do DC e do FDML.

Tratamento		**Lodo seco**		**Superioridade da eficiência de remoção do FDML em relação ao DC (%)**
		DC	**FDML**	
Nitrogênio	g/kg	32,06 B	37,35 A	17
Fósforo	mg/L	497,30 B	2937,50 A	491
Alumínio	mmol/L	1,50 A	0,92 A	-39
ST	%	73,14 A	88,08 A	20
STF	%	55,22 B	74,32 A	35
STV	%	17,91 A	13,75 A	-23

Médias seguidas pela mesma letra dentro da linha não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Própria autora.

Os maiores teores de nitrogênio e fósforo foram encontrados em amostras do FDML, foram 42,5 g/kg e 5440 mg/dm³, respectivamente.

O maior teor de ST foi de 93,32%, verificado também em amostra do FDML. Para os STF o mais alto teor foi de 85,52% no FDML. Enquanto para os STV o máximo teor encontrado no FDML chegou a 24,29%, sendo inferior ao encontrado no DC, cujo máximo valor foi de 33,71%.

Os teores de alumínio variaram de 0 a 3 mmol/L nas amostras do DC e de 0 a 4 mmol/L nas amostras do FDML, com médias de 1,50 e 0,92 mmol/L respectivamente, contrariando o esperado, uma vez que a adição de PAC no FDML deveria resultar em teores maiores do elemento neste dispositivo, indicando assim que há a possibilidade de o DC ter removido grande parte dos elementos oriundos da água de abastecimento.

A quantidade final de alumínio presente no lodo seco deve ser verificada com atenção antes da aplicação agrícola deste lodo, já que esta característica pode torná-lo impróprio para a aplicação como fertilizante no solo. Este cuidado especial também inclui o estudo da área onde o lodo seco será aplicado, uma vez que os solos apresentam diferentes pH, como exemplos os solos orgânicos e os solos de cerrado, e assim reagem diferentemente à inserção do alumínio.

É importante ressaltar que para a recomendação de doses de lodo seco a ser aplicadas ao solo, é necessária a realização de uma análise de solo, de maneira a saber quais nutrientes estão em déficit e em quais quantidades. O uso do lodo seco deve seguir critérios agronômicos de forma a não ocasionar desbalanço nutricional e queda de produtividade das culturas.

Na investigação de Costa et al. (2001), sobre a dose de 54 g de N fornecida via esterco, que é a fonte de matéria orgânica tradicionalmente utilizada no cultivo comercial do mamoeiro, não diferiu da produção do tratamento que recebeu a mesma dose de N fornecida via lodo. Entretanto, quando se comparou a dose de N (54 gramas.planta-^{1}) fornecida, respectivamente, via esterco e lodo, verificou-se diferença com o tratamento 8, em que os nutrientes foram fornecidos exclusivamente via adubação química. A condução do mamoeiro somente com adubação química, sem lodo, não apresentou diferença do tratamento-testemunha (conduzido sem adição de matéria orgânica e de adubo). Esses resultados destacam a importância da matéria orgânica na produtividade das culturas, fato este atribuído à maior capacidade de retenção de umidade e nutrientes que a matéria orgânica proporciona. A curva de produção do mamoeiro, em função das doses crescentes de matéria orgânica, destaca o aumento da produção com o aumento da dose de lodo (doses de 0 a 200 kg de lodo por cova).

Na pesquisa de presença de protozoários o resultado foi negativo tanto no lodo bruto quanto no sobrenadante.

Na pesquisa de presença de helmintos no lodo bruto foram encontrados ovos de *Ancylostomo duodenale* e larvas de *Strongyloides stercoralis*, enquanto que no sobrenadante encontrou-se somente larvas de *Strongyloides stercoralis*.

A preservação das amostras e a rapidez entre as coletas e as análises são fundamentais nas pesquisas de bioindicadores, uma vez que os resultados só são válidos para amostras recentes. São muitos os fatores que geram problemas associados com a análise de lodo, principalmente de lodos secos, por isso uma avaliação mais detalhada deste aspecto se faz necessária.

Os resultados para coliformes e *E. coli* encontram-se nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Contagem de coliformes termotolerantes

Repetição	**Coliformes Termotolerantes**			
	100 ml lodo bruto	100 ml sobrenadante	100 mg lodo seco DC	100 mg lodo seco FDML
11	4,6 E+5	7 E+3	4 E+2	0
12	3,2 E+5	3,1 E+4	3,6 E+2	0
16	8,7 E+5	-	1,15 E+3	0

Fonte: Própria autora.

Tabela 12 - Contagem de *E. coli*

Repetição	***E. coli***			
	100 ml lodo bruto	100 ml sobrenadante	100 mg lodo seco DC	100 mg lodo seco FDML
11	5,0 E+4	0	6,0 E+1	0
12	0	3,0 E+3	2,0 E+1	0
16	3,2 E+5	1,17 E+5	1,2 E+2	0

Fonte: Própria autora.

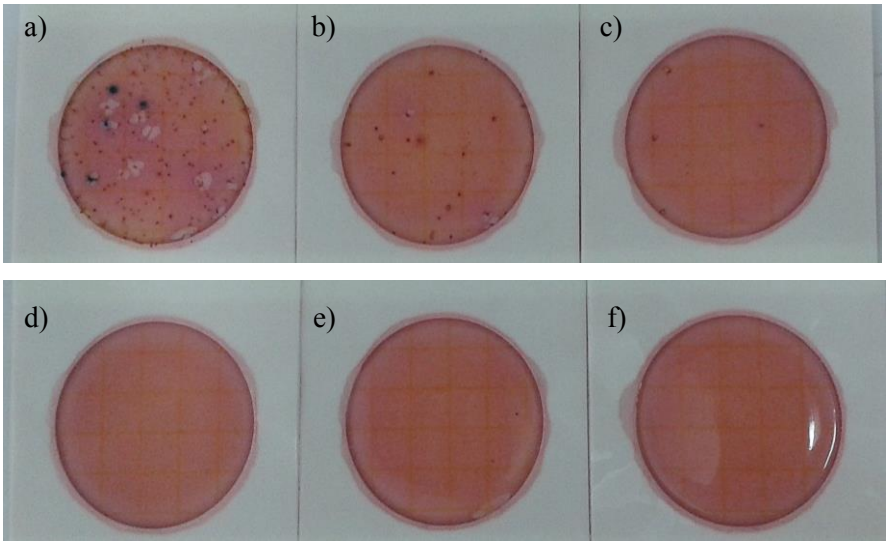
As leituras mais nítidas de coliformes e *E.coli* do lodo bruto foram possíveis na diluição de 1:100. Nas seis diluições para o lodo bruto das repetições 11 e 12, não foi encontrada *E.coli* em cinco (1:1000; 1:10000; 1:100000; 1:1000000; 1:10000000), expressas nas Figuras 57 e 60. Nas quatro diluições usadas para o lodo bruto da repetição 16, não foi possível a leitura de duas (1:10 e 1:20) devido à alta concentração de coliformes no Petrifilm, conforme Figura 63.

A melhor visualização da quantidade de colônias nos sobrenadantes das repetições 11 e 12 se deu na diluição 1:10 (Figuras 58 e 61). E em nenhuma das diluições do sobrenadante da repetição 11 (1:10; 1:100; 1:1000; 1:10000) foi encontrada *E.coli*. A inoculação realizada com o sobrenadante da repetição 16 puro e em 1:2 não pode ser lida devido à grande

quantidade de colônias (Figura 64). O mesmo ocorreu com a leitura de coliformes termotolerantes na diluição 1:10.

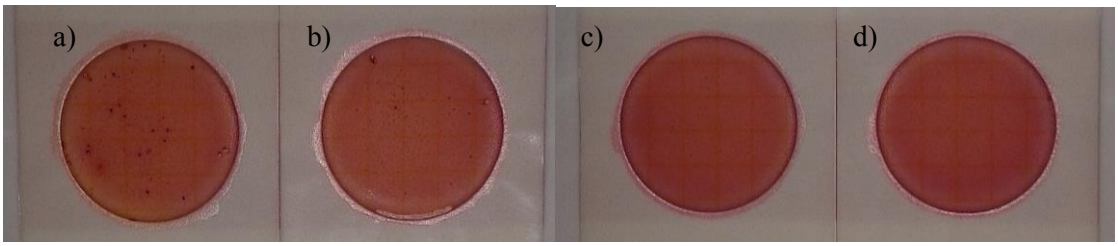
Em nenhuma das análises realizadas no lodo seco do FDML encontrou-se *E. coli* e outros coliformes termotolerantes (Figuras 59, 62 e 65).

Figura 57 – Análise de coliformes no lodo bruto da repetição 11



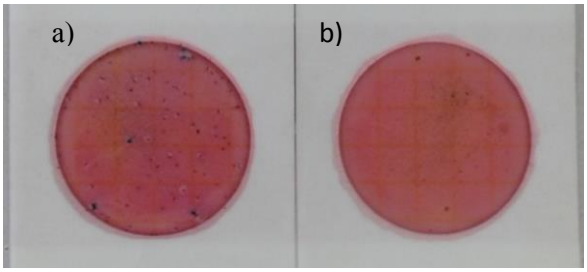
Fonte: Própria autora.

Figura 58 – Análise de coliformes no sobrenadante da repetição 11



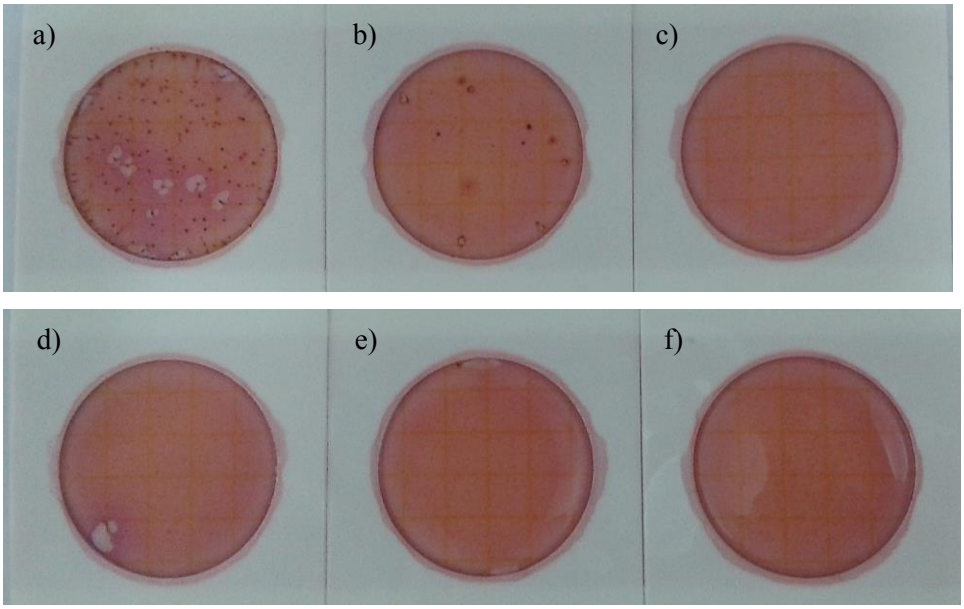
Fonte: Própria autora.

Figura 59 – Análise de coliformes no lodo seco do DC e FDML da repetição 11



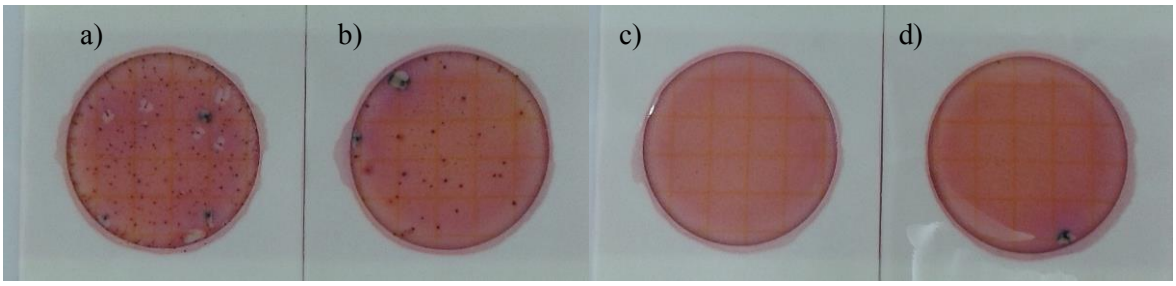
Fonte: Própria autora.

Figura 60 – Análise de coliformes no lodo bruto da repetição 12



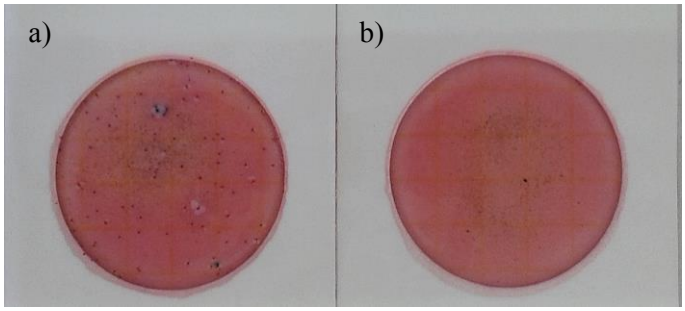
Fonte: Própria autora.

Figura 61 – Análise de coliformes no sobrenadante da repetição 12



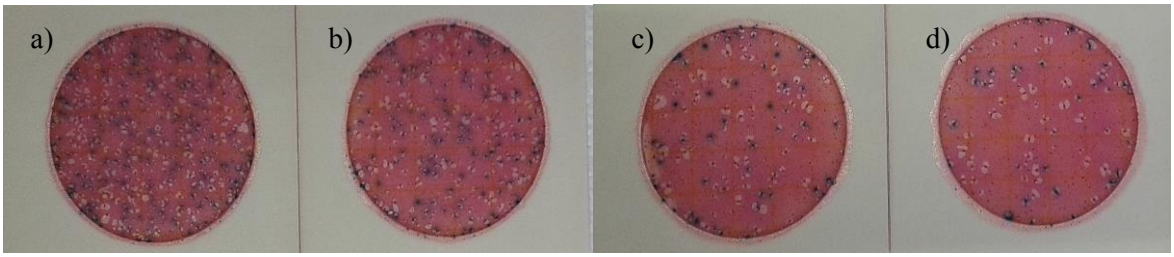
Fonte: Própria autora.

Figura 62 – Análise de coliformes no lodo seco do DC e FDML da repetição 12



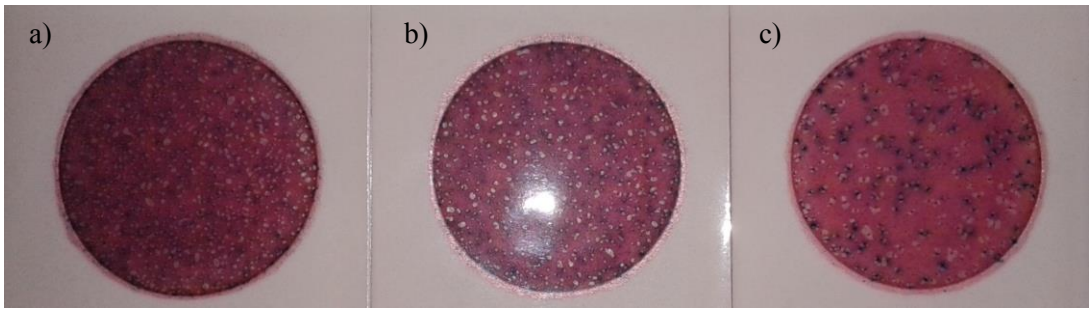
Fonte: Própria autora.

Figura 63 – Análise de coliformes no lodo bruto da repetição 16



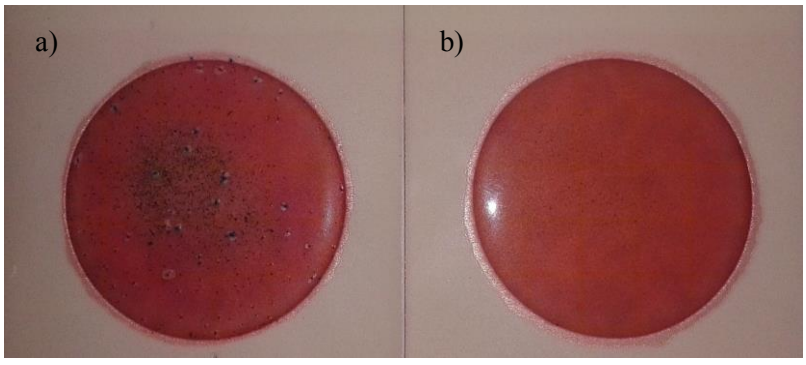
Fonte: Própria autora.

Figura 64 – Análise de coliformes no sobrenadante da repetição 16



Fonte: Própria autora.

Figura 65 – Análise de coliformes no lodo seco do DC e FDML da repetição 16



Fonte: Própria autora.

A colimetria não pode ser colocada como parâmetro único de definição da qualidade sanitária de lodo. A presença de ovos de helmintos, protozoários como *Giardia*, bactérias entéricas como a *Salmonela spp* e a *Shigella spp*, fungos e vírus, também deve ser avaliada uma vez que alguns apresentam maior tempo de sobrevivência. Desta forma, não encontrar coliformes viáveis não significa que o lodo apresente total qualidade sanitária, pois este pode estar abrigando organismos de vida mais resistentes. A sugestão é sempre o uso de formas de higienização do material, como o caleamento.

5.3 Secagem por radiação infravermelha

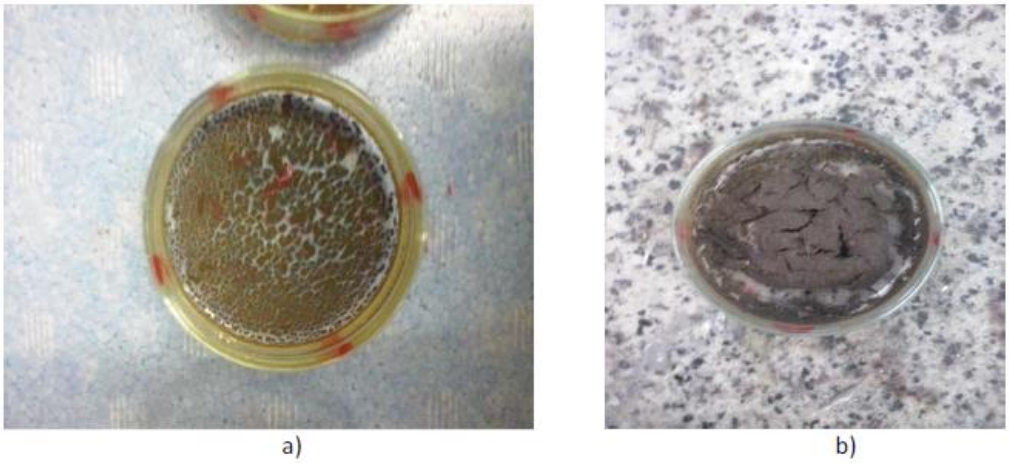
As temperaturas médias foram medidas por meio de um termômetro tipo agulha, sempre em um mesmo ponto de medição, próximo ao centro do secador. Com duas lâmpadas as temperaturas não passaram de 60ºC dentro do secador; com três lâmpadas a temperatura chegou a 75ºC, e com quatro lâmpadas, a 85ºC.

O aparato montado mostrou ser de fácil manuseio. As placas de Petri não saíam da estufa com altas temperaturas, podendo ser manuseadas poucos minutos após o fim da secagem.

Os resultados mostraram que, como esperado, a maior eficiência do secador ocorreu com o acionamento das 4 lâmpadas (aproximadamente 85˚C), estabilizando a massa das amostras após pelo menos 3 horas de secagem. Após 3,5 horas de secagem não houve mudanças nas massas das amostras (Figura 66) e após serem levadas à estufa a 100 ˚C por cerca de 3 horas, a variação da massa não passou de 0,005 gramas.

Para 03 lâmpadas (75˚C) acesas a estabilização ocorreu após 4 horas de secagem, enquanto com 02 lâmpadas (60 ˚C) demorou cerca de 5,5 horas. O procedimento na estufa foi repetido e a variação da massa também ficou entre 0 e 0,005 gramas para os dois casos.

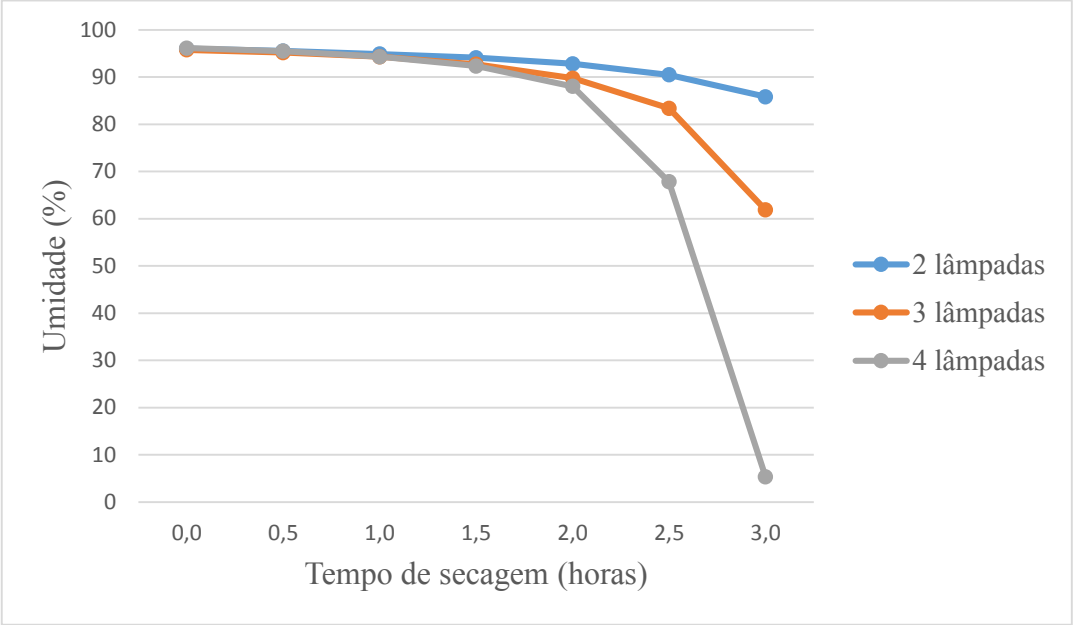
Figura 66 – Amostras após secagem: a) FDML e b) DC, respectivamente.



Fonte: Própria autora.

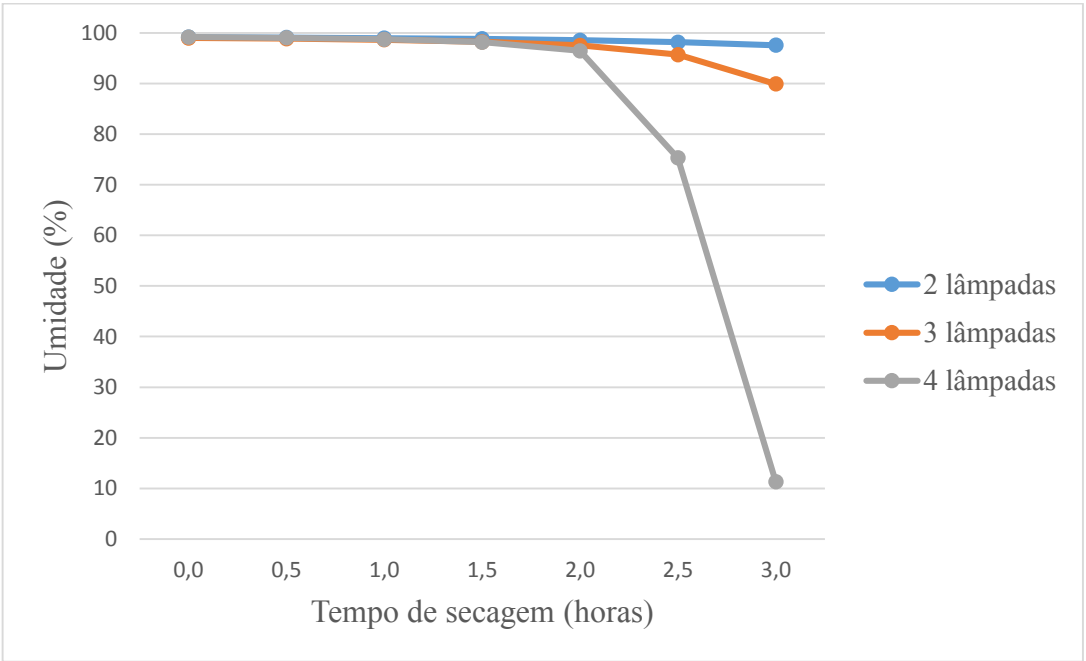
Os resultados da secagem por radiação infravermelha do lodo coletado nas repetições 6 a 12 foram convertidos em gráficos nas Figuras 67 e 68, demonstrando o desempenho do secador em diferentes níveis e tempo de radiação.

Figura 67 - Curva da variação média da umidade do lodo do DC no processo de secagem térmica por radiação infravermelha



Fonte: Própria autora.

Figura 68 - Curva da variação média da umidade do lodo do FDML no processo de secagem térmica por radiação infravermelha



Fonte: Própria autora.

Apesar da considerável redução da quantidade de água nas amostras expostas à radiação infravermelha, os valores quando colocados em porcentagem de umidade não demonstram quedas acentuadas, uma vez que a umidade inicial fora muito elevada e mesmo com a grande queda na quantidade de água a queda na porcentagem geral de água das amostras foi singela até pelo menos a segunda hora de exposição, onde os valores de porcentagem de umidade permaneceram na maioria das vezes acima dos 90%.

Após a segunda hora de exposição houve uma redução mais acentuada na umidade das amostras, principalmente se tratando das amostras expostas a quatros lâmpadas acesas. Na terceira hora, enquanto as amostras com duas lâmpadas acesas mantiveram-se com porcentagens maiores que 80% de umidade, as amostras expostas a três lâmpadas variaram de mais de 90% até cerca de 35%, além das que foram expostas a quatro lâmpadas, que alcançaram umidades entre 60% e zero. Seria interessante avaliar se nas duas horas iniciais existe diferença significativa de secagem com duas, três ou quatro lâmpadas acesas, desta forma poderemos saber se justifica acender quatro lâmpadas somente após a segunda hora de secagem, para uma redução no gasto de energia.

Os resultados demonstram que a secagem com lâmpadas de infravermelho de lodo adensado promove a estabilização da umidade após 3,5 horas (4 lâmpadas), 4 horas (3 lâmpadas) e 5,5 horas (2 lâmpadas), utilizando-se 1 cm de espessura de lodo, isto é, supondo que o processo fosse realizado 10 vezes – para se igualar à espessura de 10 cm empregada na secagem natural com estufa agrícola – seriam necessárias, respectivamente, 35, 40 e 55 horas, tempo bastante inferior ao demandado pela estufa agrícola. Feitosa (2009) também observou essa menor demanda de tempo em tratamentos com infravermelho, devido a maior taxa de calor comparada a secagem tradicional.

Os valores de secagem obtidos foram bastante relevantes, principalmente levando em consideração locais que não dispõem de área para secagem natural do lodo. Estes valores foram superiores aos encontrados por David (2002), que ficaram com teor de sólidos entre 90 a 95%, e semelhantes aos de Melo (2006), cuja secagem de lodo com injeção de ar de forma ascendente alcançou umidades menores que 5%.

A desvantagem deste método de secagem encontra-se no gasto energético que demanda recursos financeiros, desta forma para uma economia na demanda de energia elétrica, foi decidida a aplicação de uma nova etapa ao processo, na qual o lodo, após o adensamento, passava por drenagem, sendo disposto em leitos na estufa agrícola, por três dias, e somente após esta drenagem era levado ao secador térmico com lâmpadas. Para essa

avaliação foi conduzido um novo experimento, aproveitando-se também para avaliar se o posicionamento das lâmpadas acionadas gerava diferenças no resultado de secagem.

Os resultados dessa nova avaliação encontram-se detalhados a seguir.

Na Tabela 13, a perda de umidade do lodo das placas de Petri colocadas nas oito diferentes posições (vide Figura 46), com somente a terceira lâmpada do secador acesa. Na Tabela 14 a média da perda de umidade entre as posições (1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8).

Tabela 13 – Perda de umidade do lodo das placas de Petri colocadas nas oito diferentes posições, com somente a terceira lâmpada do secador acesa.

Tempo (h)	Série	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	Série 1	0,8570	0,8779	1,1940	1,3512	4,4513	3,8476	1,9446	2,6921
	Série 2	0,7227	0,8666	1,1051	1,3151	4,1609	4,6839	2,3506	2,2989
	Série 3	0,7288	0,5968	0,9949	1,1198	3,7088	3,7567	1,7143	2,0195
1,0	Série 1	1,5763	1,7627	2,6740	3,0087	8,4176	8,4584	4,8175	4,9072
	Série 2	1,7739	1,7955	3,3051	3,8565	11,1846	10,3042	5,7565	5,9145
	Série 3	1,3448	1,6312	2,7403	2,6161	8,2580	8,4382	4,3520	4,5228
2,0	Série 1	3,0219	3,6679	4,8913	6,5720	15,6641	21,8537	9,5129	11,8751
	Série 2	3,1370	4,0235	4,9065	5,8573	16,5560	20,8203	9,0115	12,1966
	Série 3	3,2942	3,4724	4,9838	5,5794	15,8725	19,7991	9,9352	10,0565
4,0	Série 1	8,1945	9,5576	12,0852	12,9432	39,0496	38,2949	20,4855	22,6752
	Série 2	8,6377	9,3739	11,8650	13,4196	38,3115	38,4647	20,0089	22,5614
	Série 3	6,5124	7,2427	11,6316	12,1913	35,1077	40,9933	20,4807	22,5945

Fonte: Própria autora.

Tabela 14 – Média da perda de umidade do lodo das placas de Petri (1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8), com somente a terceira lâmpada do secador acesa.

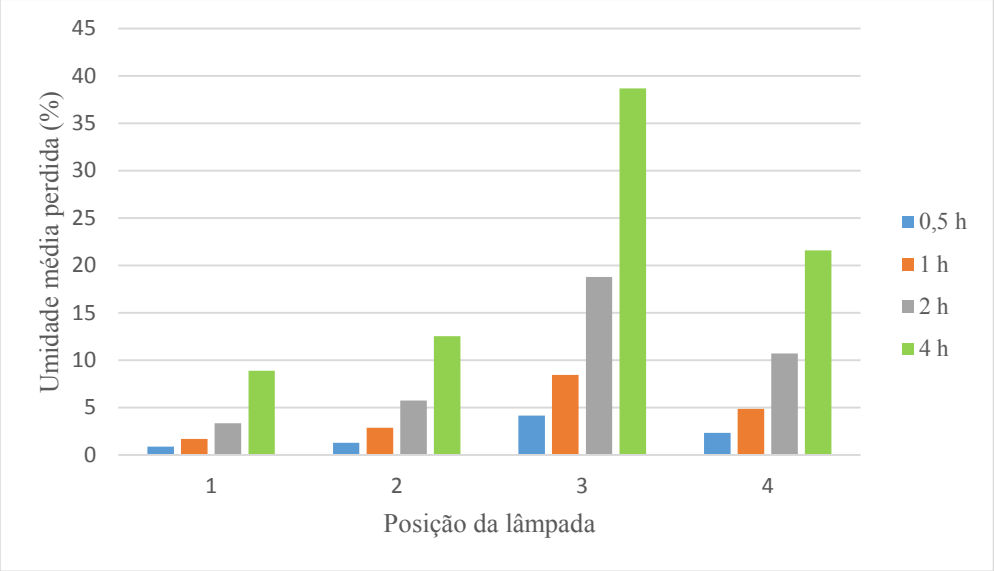
Série	Tempo (h)	1 e 2	3 e 4	5 e 6	7 e 8	Média
1	0,5	0,8675	1,2726	4,1494	2,3184	2,1520
	1,0	1,6695	2,8413	8,4380	4,8623	4,4528
	2,0	3,3449	5,7317	18,7589	10,6940	9,6324
	4,0	8,8760	12,5142	38,6722	21,5803	20,4107
2	0,5	0,7947	1,2101	4,4224	2,3248	2,1880
	1,0	1,7847	3,5808	10,7444	5,8355	5,4864
	2,0	3,5802	5,3819	18,6882	10,6040	9,5636
	4,0	9,0058	12,6423	38,3881	21,2852	20,3304
3	0,5	0,6628	1,0574	3,7327	1,8669	1,8300
	1,0	1,4880	2,6782	8,3481	4,4374	4,2379
	2,0	3,3833	5,2816	17,8358	9,9958	9,1241
	4,0	6,8776	11,9115	38,0505	21,5376	19,5943

Fonte: Própria autora.

É possível observar que a maior perda de umidade ocorre na série 1 enquanto a série 3 apresenta a menor. Com o intuito de compreender o fator de posicionamento da placa de Petri

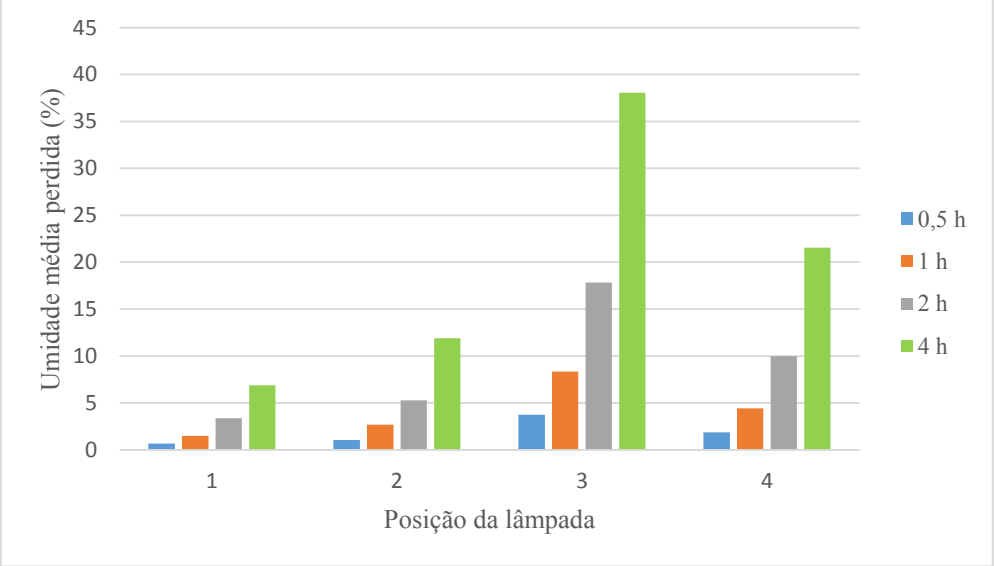
em relação à lâmpada acesa e a possível diferença na secagem do lodo devido ao posicionamento, ambas as séries são ilustradas a seguir nas Figuras 69 e 70.

Figura 69 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Terceira lâmpada do secador acesa (série 1)



Fonte: Própria autora.

Figura 70 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Terceira lâmpada do secador acesa (série 3)



Fonte: Própria autora.

Como era de se esperar a maior perda de umidade ocorreu nas placas localizadas abaixo da lâmpada acessa (terceira lâmpada) no período de 4 horas, obtendo no melhor caso (série 1) uma redução média de 38,67% em relação a umidade inicial. A menor redução

ocorre na lâmpada mais distante ao foco ligado (primeira lâmpada) no período de 0,5 hora, obtendo uma redução média de aproximadamente 0,66%.

Observa-se por meio dos gráficos das Figuras 69 e 70, que há diferença na secagem dos lodos das placas localizadas nas posições logo ao lado da posição onde se encontra a lâmpada acesa (no caso, com a 3 acesa, as posições 2 e 4). Como a distância dessas placas em relação à lâmpada acesa é a mesma, a diferença provavelmente ocorre devido a lateral direita do secador ser vazada, indicando que a maior secagem do lodo na posição 4 ocorreu devido o maior escoamento do ar neste sentido.

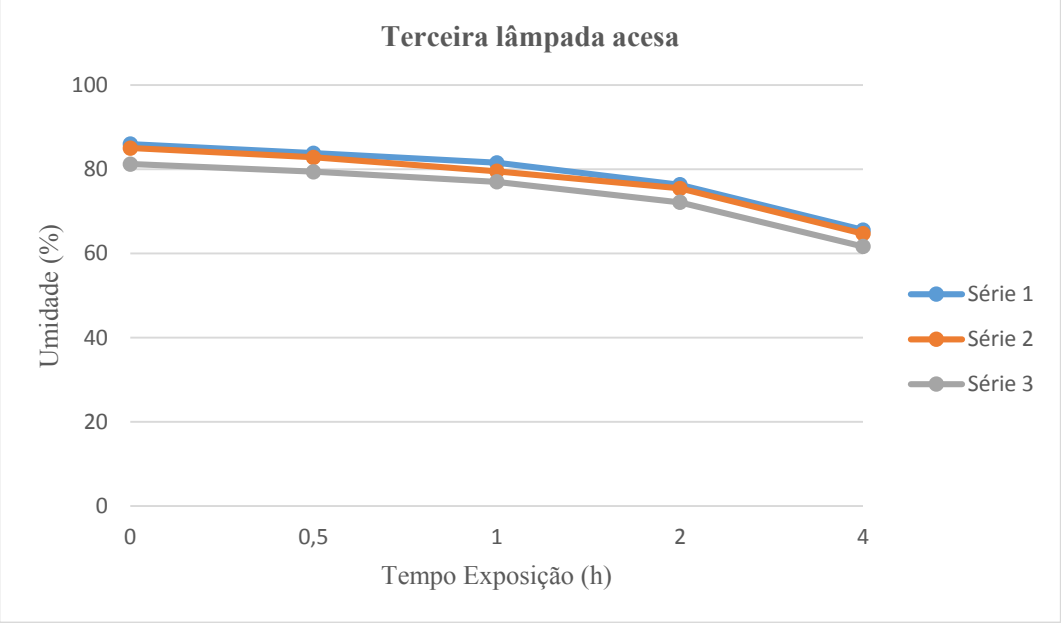
Para ilustrar o processo de secagem foi construída a curva de secagem das três séries, onde a umidade inicial utilizada corresponde a umidade inicial da amostra de lodo. Os dados utilizados são mostrados na tabela abaixo, eles correspondem à umidade inicial menos a umidade perdida durante o processo (Tabela 15). As curvas são mostradas na Figura 71.

Tabela 15 - Dados das curvas de secagem com a terceira lâmpada do secador acesa

Tempo Exposição(h)	**Umidade média (%)**		
	Série 1	**Série 2**	**Série 3**
0	85,9954	85,0397	81,2736
0,5	83,8434	82,8517	79,4437
1	81,5426	79,5533	77,0357
2	76,3630	75,4761	72,1495
4	65,5847	64,7093	61,6793

Fonte: Própria autora.

Figura 71 - Curvas de secagem com a terceira lâmpada do secador acesa



Fonte: Própria autora.

Na Tabela 16, a perda de umidade do lodo das placas de Petri colocadas nas oito diferentes posições (vide Figura 46), com somente a primeira lâmpada do secador acesa. Na Tabela 17 a média da perda de umidade entre as posições (1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8).

Tabela 16 – Perda de umidade do lodo das placas de Petri colocadas nas oito diferentes posições, com somente a primeira lâmpada do secador acesa.

Tempo (h)	Série	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	Série 1	5,0898	5,8580	2,9475	2,7570	1,3603	1,0707	0,8858	0,8645
	Série 2	4,5207	5,1971	2,3819	2,2198	0,9321	1,1087	0,6134	0,6159
	Série 3	5,7499	5,8954	2,5689	2,6400	1,4633	1,3509	0,9459	0,7847
1,0	Série 1	10,2381	11,6556	5,3387	5,6921	3,2294	3,1742	2,4238	2,2576
	Série 2	11,1896	11,3201	6,3544	5,0526	2,0199	2,6769	2,0655	1,5595
	Série 3	10,8333	11,9443	6,9532	5,2267	2,2363	2,2561	1,5797	1,4538
2,0	Série 1	19,3484	21,4606	11,9150	11,3551	4,8866	5,6568	4,0352	3,7398
	Série 2	19,2358	22,5694	9,8972	9,9941	3,8851	4,1722	2,4323	2,7028
	Série 3	19,4645	22,3671	13,1706	10,5152	4,5810	5,4565	4,0832	4,0445
4,0	Série 1	38,9628	48,7709	24,7001	21,6087	9,8686	9,8535	7,1558	7,5241
	Série 2	35,8679	41,6973	20,8209	22,5975	7,6980	8,5932	5,4645	5,0649
	Série 3	46,5482	41,4664	24,0582	23,2198	10,1270	8,7847	6,5536	6,0548

Fonte: Própria autora.

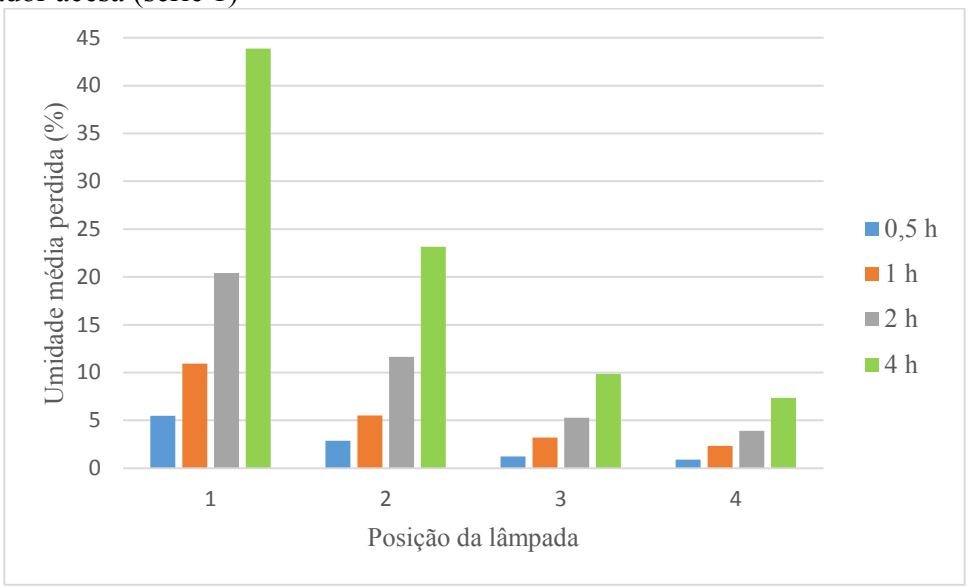
Tabela 17 – Média da perda de umidade do lodo das placas de Petri (1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8), com somente a primeira lâmpada do secador acesa.

Série	Tempo (h)	1	2	3	4	Média
1	0,5	5,4739	2,8522	1,2155	0,8751	2,6042
	1,0	10,9469	5,5154	3,2018	2,3407	5,5012
	2,0	20,4045	11,6351	5,2717	3,8875	10,2997
	4,0	43,8669	23,1544	9,8610	7,3399	21,0556
2	0,5	4,8589	2,3008	1,0204	0,6146	2,1987
	1,0	11,2549	5,7035	2,3484	1,8125	5,2798
	2,0	20,9026	9,9457	4,0287	2,5676	9,3611
	4,0	38,7826	21,7092	8,1456	5,2647	18,4755
3	0,5	5,8227	2,6044	1,4071	0,8653	2,6749
	1,0	11,3888	6,0900	2,2462	1,5167	5,3104
	2,0	20,9158	11,8429	5,0188	4,0638	10,4603
	4,0	44,0073	23,6390	9,4558	6,3042	20,8516

Fonte: Própria autora.

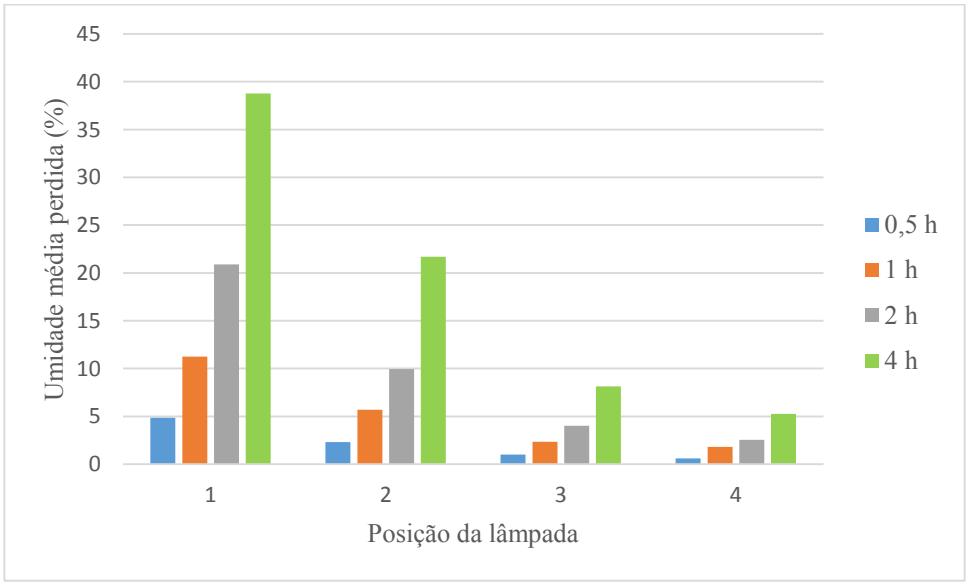
É possível observar que a maior perda de umidade ocorre na série 1 enquanto a série 2 apresenta a menor. Com o intuito de compreender o fator de posicionamento da placa de Petri em relação à lâmpada acesa e a possível diferença na secagem do lodo devido ao posicionamento, ambas as séries são ilustradas a seguir nas Figuras 72 e 73.

Figura 72 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Primeira lâmpada do secador acesa (série 1)



Fonte: Própria autora.

Figura 73 – Perda de umidade do lodo em relação à posição da lâmpada - Primeira lâmpada do secador acesa (série 2)



Fonte: Própria autora.

Neste caso, como também era esperado, a maior secagem ocorre nas placas abaixo da lâmpada acessa (primeira lâmpada) no período de 4 horas, obtendo no melhor caso (série 1) uma redução média de 43,87% em relação a umidade inicial. Novamente a menor redução ocorre na lâmpada mais distante ao foco ligado (quarta lâmpada) no período de 0,5 hora, obtendo uma redução média de aproximadamente 0,61%.

Por meio dos gráficos das Figuras 72 e 73, mais uma vez observa-se diferença de secagem dos lodos em placas localizadas à direita (lateral vazada). Com a lâmpada acesa na posição 1, o lodo da posição 3 obteve maior secagem que o lodo da posição 1 quando com a lâmpada da posição 3 acesa (Figuras 69 e 70). Demonstrando que a secagem de lodo em placas equidistantes da fonte de calor é aumentada quando a placa está localizada entre a fonte e a direção de escoamento do ar.

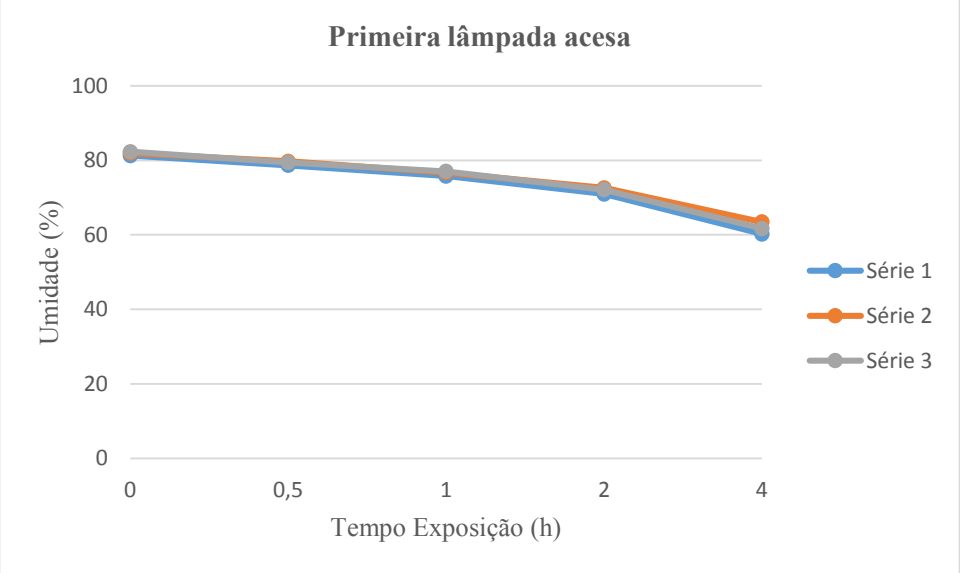
As curvas de secagem das três séries ilustram o processo ocorrido e são mostradas na Figura 74. A umidade inicial utilizada corresponde a umidade inicial da amostra de lodo. Os dados utilizados são mostrados na Tabela 18, eles correspondem à umidade inicial menos a umidade perdida durante o processo.

Tabela 18 - Dados das curvas de secagem com a primeira lâmpada do secador acesa

Tempo Exposição(h)	**Umidade média (%)**		
	Série 1	**Série 2**	**Série 3**
0	81,2719	81,9498	82,3076
0,5	78,6678	79,7511	79,4437
1	75,7708	76,6699	77,0357
2	70,9723	72,5886	72,1495
4	60,2164	63,4742	61,6793

Fonte: Própria autora.

Figura 74 - Curvas de secagem com a primeira lâmpada do secador acesa



Fonte: Própria autora.

Em comparação com as amostras não drenadas, os resultados de secagem, para amostras drenadas, apresentaram-se melhores desde o início, uma vez que a umidade de entrada das amostras no secador ficou entre 81 e 86%. E enquanto com duas horas de uso de 2, 3 e 4 lâmpadas os resultados obtidos eram na maioria das vezes maiores que 90% de umidade, neste experimento com apenas 1 lâmpada alcançou-se de 71 a no máximo 76% de umidade com as mesmas duas horas. Desta forma o emprego da drenagem mostrou-se eficaz e indicou que resultados muito superiores poderão ser encontrados se as amostras drenadas forem expostas a 2, 3 e 4 lâmpadas.

A drenagem favorece a redução do tempo de uso das lâmpadas e a redução do número de lâmpadas, mostrando-se uma etapa fundamental quando se busca economia de recursos financeiros e sustentabilidade ambiental.

Com o maior tempo de exposição empregado neste experimento, quatro horas com uma lâmpada acesa, as amostras alcançaram umidades entre 60 e 66%, porcentagem alcançada em média após o quarto dia de secagem em estufa agrícola.

As grandes vantagens da secagem artificial são o menor tempo demandado, a menor influência de fatores ambientais e a reduzida área necessária, sendo opção relevante em locais sem área disponível e/ou frios, contudo a desvantagem principal é o gasto energético de fontes não renováveis que impacta no meio ambiente e encarece o processo.

Para municípios localizados em regiões de climas quentes e com disponibilidade de área, conforme a necessidade para o volume de lodo gerado, a estufa agrícola atende muito bem a proposta de secagem e garante a realização do processo sem impacto ambiental negativo. Desta forma, para localidades que comportam este sistema de secagem natural, como é o caso de Ilha Solteira, este é o método mais interessante, tanto pela vantagem ambiental, como pela financeira.

6 CONCLUSÕES

• O sistema de separação DC-FDML promove efetivamente alta remoção de turbidez, DBO, DQO, nitrogênio, fósforo, ST e SST de lodo de lagoa de estabilização. Valores como 99,71% de remoção da turbidez, 91,77% de remoção da DBO e 97,45% de remoção da DQO, comprovam que o sistema DC-FDML é viável para o tratamento de lodos.

• Para a remoção de nutrientes alcançou-se 85,79% para o nitrogênio e 98,65% para o fósforo, sendo 97,78% a mínima remoção de fósforo obtida, o que demonstra a alta capacidade de uso do sistema DC-FDML para o aproveitamento desses nutrientes e para a diminuição na quantidade de nitrogênio e fósforo lançados nos corpos d'água, uma vez que esses nutrientes são os grandes promotores da eutrofização.

• A captura de 70,94% de ST e de 97,70% de SST, além da captura de 47,34% e 53,77%, respectivamente dos STV e SDT, comprovam que o sistema DC-FDML atua com sucesso na captura de sólidos de lodo de lagoas de estabilização, promove grande diminuição do volume do lodo e melhora o efluente, mostrando-se ótima opção no tratamento de lodos acumulados em lagoas de estabilização dos municípios.

• A estufa agrícola utilizada mostrou-se efetiva na secagem de lodo de lagoa de estabilização adensado, reduziu a umidade do material para, em média, 35,25% (lodo oriundo do DC) e 14,53% (lodo do FDML), e desta maneira diminuiu drasticamente seu volume, melhorando as condições de manuseio e disposição final apenas com fontes limpas de energia.

• Para municípios localizados em regiões de climas quentes e com disponibilidade de área, a estufa agrícola atende muito bem a proposta de secagem e garante a realização do processo sem impacto ambiental negativo.

• Alcançou-se com a secagem em estufa agrícola lodos com altos teores de ST, que ficaram entre 73,14 e 88,08 %.

• A estufa agrícola também obteve êxito na concentração de nutrientes como nitrogênio e fósforo no lodo, apresentando de 32,06 a 37,35 g/kg de nitrogênio e 497,30 a 2937,50 mg/L de fósforo, o que gerou aumento do potencial nutricional deste material, tornando-o ótima opção como fertilizante agrícola e de solos degradados aptos.

• O uso do sistema DC-FDML, como um todo, permite alta remoção de nutrientes e sólidos, contudo há uma superioridade do FDML em relação ao DC nesta eficiência de remoção para nitrogênio, fósforo e ST, que pode ser vista na diferença dos teores destes nos

lodos secos provenientes de cada dispositivo, sendo no lodo seco do FDML maiores 17%, 491% e 20%, respectivamente.

• No sistema natural de secagem de lodo as condições climáticas e a espessura da camada de lodo influenciam o tempo de secagem, devido a isso a aplicação deste método deve ser realizada em regiões que apresentem características favoráveis como baixa umidade relativa do ar, alta radiação e altas temperaturas, que geram uma alta evapotranspiração, além de área disponível de acordo com a quantidade de lodo a ser seco.

• Foi verificada a eficiência do secador térmico com lâmpadas de infravermelho e também a rapidez da secagem por radiação infravermelha em comparação a secagem natural por estufa agrícola.

• O uso do secador térmico com lâmpadas de infravermelho aparece como uma ótima alternativa em locais sem disponibilidade de área, principalmente quando precedido pela drenagem do lodo por pelo menos três dias.

• Na secagem artificial de lodo de lagoa de estabilização por meio de secador térmico com lâmpadas de infravermelho, o posicionamento das lâmpadas, em relação as amostras, influencia o resultado de secagem de modo relativo.

• A secagem artificial é a opção mais relevante para locais sem muita área disponível e/ou frios, contudo a desvantagem principal é o gasto energético de fontes não renováveis que impacta no meio ambiente e encarece o processo.

• A aplicação de três dias de drenagem antes da exposição do lodo à radiação infravermelha, resulta em menor demanda de tempo de exposição a lâmpadas, menor quantidade de lâmpadas e consequentemente gera economia de energia para o processo de secagem.

Recomendações para trabalhos futuros

• Analisar a secagem de lodo por convecção forçada e secagem térmica por lâmpadas de infravermelho em conjunto.

• Analisar o comportamento de secagem de amostras, após drenadas por três dias, em secador com 2, 3 e 4 lâmpadas de infravermelho acesas.

• Analisar o teor de metais nos lodos secos e a possibilidade de aplicação destes lodos como fonte de nitrogênio e fósforo em solos agrícolas ou na recuperação de áreas degradadas.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**: órgão oficial de informação técnica da ABES, Rio de Janeiro, v. 13, n.1, p. 54-62, 2008.

AISSE, M. M. **Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2000. 192p.

ANDRAUS, S.; MEDEIROS, M. L. B.; BORGES, J. C.; SILVA, S. M. C. P.; TOLEDO, E. B. Aspectos sanitários; agentes patogênicos: bactérias entéricas.In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I. DE.; FERNANDES, F. (Org.) **Reciclagem de biossólidos**: transformando problemas em soluções. 2. ed. Curitiba: SANEPAR, FINEP, 2001. p. 141-142.

ANDREOLI, C. V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** Curitiba: ABES, 2006. 398 p.

ANDREOLI, C. V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema**. 1999. 278 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERNICHARO, C.A. Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás. In: CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Vitória: ABES, 2003. Cap. 5, p.130-133.

ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

ARAÚJO, G. M. **Avaliação da utilização de filtros anaeróbios simplificados na remoção de algas de efluentes de lagoas de estabilização.** 2004. Dissertação Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

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. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.) **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. (Livros científicos)

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. **Applied and Environmental Soil Science**, New York, v.2011, p.1-11, 2011.

BOEIRA, R. C. **Lodo de esgoto como fertilizante em culturas anuais**: acidez do solo. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional. **Agenda 21 brasileira**: resultado da consulta nacional. Brasília, DF, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução n° 375, D.O.U. de 29/08/2006.** Brasília, DF, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010.** Brasília, DF, 2010.

BROD, F. P. R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. Campinas: [s. n.], 2003.

CALDEIRA, M. V. et al. Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, 155-163, 2013.

CAMPOS, J. R. et al. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CARVALHO, J. F. C.; ARAÚJO, G. M.; GOMES, L. A. Utilização de ensaios de floculação como pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização visando a remoção de algas. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8., 2006, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2006. v. I.

CASSINI, S. T. (Coord.) **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CAVAZZANA, T. L.; MATSUMOTO, T. Floco decantador de manta de lodo no tratamento de água de abastecimento. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2004, San Juan. **Anales**… San Juan: [s. n.], 2004. p. 1-9.

CAVAZZANA, T. L; MATSUMOTO, T.; LIBANIO, M. Avaliação da floco-decantação de manta de lodo associada à decantação de alta taxa no tratamento de águas de consumo humano. **Eng. Sanit. Ambient,** Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 126-133, 2008.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS – COPASA MG. **Secador térmico de lodos da ETE de Montes Claros**. Montes Claros, 2011. Disponível em: <http\\www.copasa.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=2042&sis=129>. Acesso em: 25 out. 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ - SANEPAR. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba, 1999. 98p. (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB)

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

COSTA, A. N. et al. Estudo de caso: utilização de lodo de estações de tratamento de esgoto (ETEs) na cultura do mamoeiro no norte do estado do Espírito Santo. In: ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 282 p. Cap. 8., p. 189-212.

COSTA, A. N. da. et al. **Utilização agrícola do lodo de ETE anaeróbia como fonte de matéria orgânica e nutrientes no mamoeiro: saneamento ambiental**: desafio para o século 21. Rio de Janeiro: ABES, 2001. p. 1-13.

COSTA, V. L. et al. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 287-293, 2004.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto:** determinação da umidade de equilíbrio. São Paulo, 2002.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; FILHO, P. L. C. **Ensaios de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Rima, 2002.

EDWARDS, C.A. Historical overview of vermicomposting. **BioCycle**, v. 36, p. 56-58, 1995.

FEITOSA, I. C. **Produção de enzimas lipolíticas utilizando bactéria isolada de solo com histórico de contato com petróleo em fermentação submersa**. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, Aracaju, 2009.

FERREIRA, A. L. **Desempenho de secadores contínuos operando em sistema intermitente.** 2006. 72 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2006.

GONÇALVES, R. F. (Coord.) **Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas**. Vitória: UFES, 1999. 79 p. (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB)

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto In: ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Curitiba: UFMG, 2001. 484 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2010**. Brasília, DF, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB**. Brasília, DF, 2010.

JORDÃO, E. O; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 2. ed. São Paulo: Cetesb, 1982.

JORGE, J. A.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Condições físicas de um latossolo vermelho-escuro 4 anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p. 237-240, 1991.

KRATZ, D. **Substratos renováveis na produção de mudas de Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage e Mimosa scabrella Benth**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LANDGRAF, M. D.; ALVES, M. R.; SILVA, S. C. & REZENDE, M. O. O. Characterization of humic acids from vermicompost of cattle manure composting by 3 and 6 months. **Química Nova**, 22:483-486, 1999.

LARA, A. I.; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Curitiba: UFMG, 2001. 484 p.

LEITE, L. de S. **Análise da secagem de lodo proveniente de ETE**: por convecção forçada e secagem térmica por lâmpadas de infravermelho. 2014. Relatório (Iniciação Científica) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. 2010. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAIGUAL-ENRÍQUEZ, Y. A. **Utilização de reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos no tratamento de águas residuarias da produção intensiva de tilapia com recirculação da água tratada**. 2011. 173 f. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

MARA, D. D. **Sewage treatment in Hot Climates**. Chichester: John Wiley e Sons, 1976.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J.; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso de biossólidos na agricultura. In: TSUTIYA, M. T.; CAMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001. p.365-404.

MATSUMOTO, T.; SANTANA, S. L.; PERON, O. Decantador de coluna com adição de coagulante utilizado como pré-tratamento de reator anaeróbio para efluentes de curtume. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2005. p. 1-11.

MATTHEWS, P. Sustainability in biosolids management. **Water Science Technology**, Oxford, v.38, p.97-102, 1998.

MELO, A. S. **Contribuição para o dimensionamento de leitos de secagem de lodo.** Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

MELO, W. J. et al. A resolução CONAMA 375 e os metais pesados. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto:** avaliação após a resolução n0 375 do Conama. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 157-170.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas**: impacto ambiental do uso do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.

METCALF; EDDY. Desing of facilities for the treatment and disposal of sludge. In: **Wastewater engineering**, New York: Mc Graw-Hill. 1991. p. 765-926.

MOREIRA, H. T. et al. Application of a sludge blanket settler flocculator in continuous thickening of stabilization pond sludge. In: IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON PONDS TECHNOLOGY, 10., 2013, Cartagena de Índias. **Proceedings…** Cartagena de Índias: [s. n.], 2013a.

MOREIRA, H. T. et al. Evaluation of a sludge blanket settler flocculator in the separation of sludge stabilization pond. In: IWA CONFERENCE ON SMALL WATER & WASTEWATER SYSTEMS AND SLUDGE MANEGEMENT, 11., 2013, Harbin. **Proceedings…** Harbin: [s. n.] 2013b.

NAVARRI, P.; ANDRIEU, J. High-intensity infrared drying study: Part I: case of capillary-porous material. **Chemical Engineering and Processing**: Process Intensification, Amsterdam, v. 32, n. 5, p. 311-318, 1993.

NEIVA, M. R. Reciclagem agrícola de biossólidos da ETE Cetrel: uma experiência ambientalmente correta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 477-479.

NOGUEIRA, T. A. et al. Cádmio, cromo chumbo e zinco em plantas de milhos e em latossolo, após aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 2195-2207, 2008.

PEARSON, K.; FISHER, R.; INMAN, H. F. Karl Pearson and R. A. fisher on statistical tests: A 1935 Exchange from Nature. **The American Statistician**, Alexandria, v. 48, n.1, p. 2-11, 1994.

PEDROZA, M. M. et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.11, n.16, p. 89-188, 2010.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2012.

PERONI, L. **Substratos renováveis na produção de mudas de Eucalyptus grandis**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

PIVELI, R. P. et al. Uma reflexão sobre a qualidade e uso de esgoto tratado por lagoas de estabilização na agricultura: caso de Lins/SP. **Revista DAE**, São Paulo, n. 177, p. 63-70, 2008.

PULKOW, D.; AISSE, M. M. **Estudo da secagem e disposição do lodo anaeróbio obtido em reatores tipo RALF**. Curitiba: PUCPR, 1996. 35p.

REIS, R. F. **Estudo de influência de cobertura plástica na remoção de água de lodos de estação de tratamento de água em leitos de drenagem**. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2011.

SANTOS, A. M. M. **Dimensionamento de um secador de milho com 60 t/dia de capacidade**. Porto: [s. n], 2011.

SANTOS, C. J. R. **Secagem de sementes de girassol via radiação infravermelha e convecção forçada de ar aquecido.** Aracaju: [s. n.], 2009.

SANTOS, P. R. P; OLIVEIRA NETO, F. A; GOMES, Z. L. G. C. **Considerações sobre tecnologias para remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas e suas aplicações em pólos industriais na região metropolitana de Salvador e na antiga fábrica da Cobrac em Santo Amaro - Ba.** 1999. 79 f. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.

SILVA, F. C. et al. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um argissolo vermelho: amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 5, p. 831-840, 2001.

SNEL, M. Community-based vermicomposting in developing countries. **BioCycle**, v. 40, nº4, p. 75-76, 1999.

SOCCOL, V. T. et al. Organismos patogênicos presentes em lodo de esgoto a ser aplicado no solo e a Resolução nº375 do CONAMA. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A. M. M. (Ed). **Uso agrícola de lodo de esgoto**: avaliação após a Resolução nº375 do CONAMA. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 83-112.

SOUZA, W. G. **Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgoto sanitários**. São Paulo: [s. n.], 2012.

STROO, H. F.; JENCKS, E. M. Effect of sewage sludge on microbial activity in an old, abandoned minesoil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 14, n. 3, p. 301-304, 1985.

TEIXEIRA PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Curitiba: UFMG. 484p.

THOMAZ-SOCOOL, V.; PAULINO, R. C.; CASTRO, E. A. Metodologia para análise de parasitológica em lodo de esgoto. In: COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Manual de métodos para análises microbiologias e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. 2. ed. Curitiba: SANEPAR, 2000.

TRIGUEIRO, R. de M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 150-162, 2003.

TSUTIYA, M. T. Tecnologia emergentes para a disposição final de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. p. 762-770.

VAN HAANDEL, A. C.; ALEM SOBRINHO, P. **Biossólidos**: alternativas de uso de resíduos de saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

VAN HAANDEL, A. C; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos:** um manual para região de clima quente. Campina Grande: EPGRAF, 1994.

VON SPERLING, M. et. al. **Lodo de esgoto**: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 484p.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p. 2005.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 211p.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: lagoas de estabilização. 2. ed. ampl. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 196p.

WHO UNICEF. **United Nations Children´s fund joint monitoring programme for water supply and sanitation (JMP).** New York: UNICEF, 2008.

ANEXO A – Dados climáticos de Ilha Solteira referentes aos dias de secagem

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 1.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
21/05/2014	25,9	59,4	15,6	3,9	1,5	0,0	7,8
22/05/2014	25,7	77,5	8,0	2,6	1,6	29,7	1,3
23/05/2014	21,9	95,7	5,9	1,3	0,6	11,4	0,0
24/05/2014	17,6	93,8	6,2	1,3	0,9	3,0	0,0
25/05/2014	21,4	88,2	11,6	2,1	0,8	0,5	4,3
26/05/2014	17,9	84,4	12,3	2,2	1,7	0,0	4,9
27/05/2014	12,9	88,8	4,8	1,0	0,8	0,0	0,0
28/05/2014	16,0	82,9	10,8	1,8	0,6	0,0	3,6
29/05/2014	18,6	76,0	15,8	2,7	1,1	0,0	7,8
30/05/2014	20,6	70,8	15,9	3,1	1,3	0,0	7,9
31/05/2014	22,5	66,6	15,6	3,6	1,6	0,0	9,9
TOTAL	-	-	-	25,6	-	44,6	47,5
MEDIA	20,1	80,4	11,1	2,3	1,1	4,1	4,3
D.P.	4,0	11,5	4,3	1,0	0,4	9,2	3,7
V.MIN.	12,9	59,4	4,8	1,0	0,6	0,0	0,0
V.MAX.	25,9	95,7	15,9	3,9	1,7	29,7	9,9

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 2.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
28/05/2014	16,0	82,9	10,8	1,8	0,6	0,0	3,6
29/05/2014	18,6	76,0	15,8	2,7	1,1	0,0	7,8
30/05/2014	20,6	70,8	15,9	3,1	1,3	0,0	7,9
31/05/2014	22,5	66,6	15,6	3,6	1,6	0,0	9,9
01/06/2014	20,0	91,6	3,7	1,0	0,4	5,6	0,0
02/06/2014	19,1	81,3	15,6	2,4	0,9	0,0	9,9
03/06/2014	18,7	70,5	15,7	2,8	1,2	0,0	10,0
04/06/2014	21,8	67,5	12,9	2,9	1,4	0,0	7,3
05/06/2014	26,0	71,0	14,3	3,2	1,2	0,0	8,6
06/06/2014	26,2	72,4	12,0	2,9	1,3	0,0	6,4
07/06/2014	26,4	65,0	14,7	3,4	1,1	0,0	9,0
TOTAL	-	-	-	29,8	-	5,6	80,4
MEDIA	21,4	74,1	13,4	2,7	1,1	0,5	7,3
D.P.	3,5	8,1	3,6	0,7	0,3	1,7	3,1
V.MIN.	16,0	65,0	3,7	1,0	0,4	0,0	0,0
V.MAX.	26,4	91,6	15,9	3,6	1,6	5,6	10,0

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 3.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
05/06/2014	26,0	71,0	14,3	3,2	1,2	0,0	8,6
06/06/2014	26,2	72,4	12,0	2,9	1,3	0,0	6,4
07/06/2014	26,4	65,0	14,7	3,4	1,1	0,0	9,0
08/06/2014	26,0	64,6	15,1	3,7	1,4	0,0	9,4
09/06/2014	23,6	82,1	12,6	2,2	0,4	0,0	6,9
10/06/2014	23,4	77,5	13,2	3,1	1,5	0,0	7,5
11/06/2014	23,7	69,4	14,7	3,7	2,4	0,0	9,0
12/06/2014	24,3	65,2	14,0	3,6	2,2	0,0	8,3
13/06/2014	23,8	67,1	13,2	2,9	1,2	0,0	7,5
14/06/2014	23,8	70,7	13,2	2,7	0,9	0,0	7,5
15/06/2014	24,0	72,6	14,5	2,8	0,9	0,0	8,8
TOTAL	-	-	-	34,2	-	0,0	88,9
MEDIA	24,7	70,7	13,8	3,1	1,3	0,0	8,1
D.P.	1,2	5,5	1,0	0,5	0,6	0,0	1,0
V.MIN.	23,4	64,6	12,0	2,2	0,4	0,0	6,4
V.MAX.	26,4	82,1	15,1	3,7	2,4	0,0	9,4

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 4.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
17/06/2014	23,3	71,3	13,6	2,5	0,5	0,0	7,9
18/06/2014	23,0	73,1	14,2	2,5	0,5	0,0	8,5
19/06/2014	21,7	77,9	14,1	2,4	0,6	0,0	8,4
20/06/2014	19,9	76,0	14,0	2,5	1,0	0,0	8,3
21/06/2014	20,2	71,5	14,3	2,9	1,5	0,0	8,6
22/06/2014	22,3	62,8	14,2	2,8	1,0	0,0	8,4
23/06/2014	23,1	65,7	11,5	2,7	1,3	0,0	5,8
24/06/2014	23,7	66,0	14,5	3,0	1,2	0,0	8,8
25/06/2014	24,3	66,0	14,0	2,9	0,9	0,0	8,3
26/06/2014	24,3	66,7	12,3	2,3	0,5	0,0	6,6
27/06/2014	25,1	64,2	14,2	3,0	0,9	0,0	8,4
TOTAL	-	-	-	29,5	-	0,0	88,0
MEDIA	22,8	69,2	13,7	2,7	0,9	0,0	8,0
D.P.	1,7	5,0	0,9	0,3	0,3	0,0	0,9
V.MIN.	19,9	62,8	11,5	2,3	0,5	0,0	5,8
V.MAX.	25,1	77,9	14,5	3,0	1,5	0,0	8,8

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 5.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
18/06/2014	23,0	73,1	14,2	2,5	0,5	0,0	8,5
19/06/2014	21,7	77,9	14,1	2,4	0,6	0,0	8,4
20/06/2014	19,9	76,0	14,0	2,5	1,0	0,0	8,3
21/06/2014	20,2	71,5	14,3	2,9	1,5	0,0	8,6
22/06/2014	22,3	62,8	14,2	2,8	1,0	0,0	8,4
23/06/2014	23,1	65,7	11,5	2,7	1,3	0,0	5,8
24/06/2014	23,7	66,0	14,5	3,0	1,2	0,0	8,8
25/06/2014	24,3	66,0	14,0	2,9	0,9	0,0	8,3
26/06/2014	24,3	66,7	12,3	2,3	0,5	0,0	6,6
27/06/2014	25,1	64,2	14,2	3,0	0,9	0,0	8,4
28/06/2014	20,9	84,5	8,2	1,8	1,2	0,0	2,7
TOTAL	-	-	-	28,8	-	0,0	82,8
MEDIA	22,6	70,4	13,2	2,6	1,0	0,0	7,5
D.P.	1,7	6,8	1,9	0,4	0,3	0,0	1,9
V.MIN.	19,9	62,8	8,2	1,8	0,5	0,0	2,7
V.MAX.	25,1	84,5	14,5	3,0	1,5	0,0	8,8

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 6.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
24/06/2014	23,7	66,0	14,5	3,0	1,2	0,0	8,8
25/06/2014	24,3	66,0	14,0	2,9	0,9	0,0	8,3
26/06/2014	24,3	66,7	12,3	2,3	0,5	0,0	6,6
27/06/2014	25,1	64,2	14,2	3,0	0,9	0,0	8,4
28/06/2014	20,9	84,5	8,2	1,8	1,2	0,0	2,7
29/06/2014	16,8	82,4	5,7	1,4	1,1	0,0	0,2
30/06/2014	17,5	72,4	14,9	2,3	0,8	0,0	7,9
01/07/2014	20,8	67,6	14,5	2,5	0,5	0,0	7,4
02/07/2014	23,7	64,8	14,0	2,7	0,7	0,0	6,9
03/07/2014	25,5	59,5	14,3	2,9	0,7	0,0	7,3
04/07/2014	25,1	59,8	14,5	3,0	0,9	0,0	7,4
TOTAL	-	-	-	27,8	-	0,0	71,9
MEDIA	22,5	68,5	12,8	2,5	0,9	0,0	6,5
D.P.	3,1	8,2	3,0	0,5	0,2	0,0	2,7
V.MIN.	16,8	59,5	5,7	1,4	0,5	0,0	0,2
V.MAX.	25,5	84,5	14,9	3,0	1,2	0,0	8,8

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 7.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
26/06/2014	24,3	66,7	12,3	2,3	0,5	0,0	6,6
27/06/2014	25,1	64,2	14,2	3,0	0,9	0,0	8,4
28/06/2014	20,9	84,5	8,2	1,8	1,2	0,0	2,7
29/06/2014	16,8	82,4	5,7	1,4	1,1	0,0	0,2
30/06/2014	17,5	72,4	14,9	2,3	0,8	0,0	7,9
01/07/2014	20,8	67,6	14,5	2,5	0,5	0,0	7,4
02/07/2014	23,7	64,8	14,0	2,7	0,7	0,0	6,9
03/07/2014	25,5	59,5	14,3	2,9	0,7	0,0	7,3
04/07/2014	25,1	59,8	14,5	3,0	0,9	0,0	7,4
05/07/2014	24,6	56,5	14,7	3,6	1,5	0,0	7,6
06/07/2014	24,2	56,0	14,7	3,5	1,3	0,0	7,7
TOTAL	-	-	-	29,0	-	0,0	70,1
MEDIA	22,6	66,8	12,9	2,6	0,9	0,0	6,4
D.P.	3,1	9,6	3,1	0,7	0,3	0,0	2,5
V.MIN.	16,8	56,0	5,7	1,4	0,5	0,0	0,2
V.MAX.	25,5	84,5	14,9	3,6	1,5	0,0	8,4

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 8.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
30/06/2014	17,5	72,4	14,9	2,3	0,8	0,0	7,9
01/07/2014	20,8	67,6	14,5	2,5	0,5	0,0	7,4
02/07/2014	23,7	64,8	14,0	2,7	0,7	0,0	6,9
03/07/2014	25,5	59,5	14,3	2,9	0,7	0,0	7,3
04/07/2014	25,1	59,8	14,5	3,0	0,9	0,0	7,4
05/07/2014	24,6	56,5	14,7	3,6	1,5	0,0	7,6
06/07/2014	24,2	56,0	14,7	3,5	1,3	0,0	7,7
07/07/2014	20,8	75,0	4,9	1,3	0,5	0,0	0,0
08/07/2014	21,3	80,9	7,9	1,9	1,2	0,0	0,7
09/07/2014	21,9	76,7	12,7	2,9	1,2	6,1	5,7
10/07/2014	19,1	91,7	7,6	1,5	0,4	1,5	0,4
TOTAL	-	-	-	28,1	-	7,6	59,0
MEDIA	22,2	69,2	12,2	2,6	0,9	0,7	5,4
D.P.	2,6	11,3	3,6	0,8	0,4	1,8	3,3
V.MIN.	17,5	56,0	4,9	1,3	0,4	0,0	0,0
V.MAX.	25,5	91,7	14,9	3,6	1,5	6,1	7,9

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 9.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
01/07/2014	20,8	67,6	14,5	2,5	0,5	0,0	7,4
02/07/2014	23,7	64,8	14,0	2,7	0,7	0,0	6,9
03/07/2014	25,5	59,5	14,3	2,9	0,7	0,0	7,3
04/07/2014	25,1	59,8	14,5	3,0	0,9	0,0	7,4
05/07/2014	24,6	56,5	14,7	3,6	1,5	0,0	7,6
06/07/2014	24,2	56,0	14,7	3,5	1,3	0,0	7,7
07/07/2014	20,8	75,0	4,9	1,3	0,5	0,0	0,0
08/07/2014	21,3	80,9	7,9	1,9	1,2	0,0	0,7
09/07/2014	21,9	76,7	12,7	2,9	1,2	6,1	5,7
10/07/2014	19,1	91,7	7,6	1,5	0,4	1,5	0,4
11/07/2014	20,0	78,3	15,0	2,8	1,3	0,0	8,0
TOTAL	-	-	-	28,6	-	7,6	59,1
MEDIA	22,5	69,7	12,3	2,6	0,9	0,7	5,4
D.P.	2,2	11,6	3,6	0,7	0,4	1,8	3,3
V.MIN.	19,1	56,0	4,9	1,3	0,4	0,0	0,0
V.MAX.	25,5	91,7	15,0	3,6	1,5	6,1	8,0

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 10.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
03/07/2014	25,5	59,5	14,3	2,9	0,7	0,0	7,3
04/07/2014	25,1	59,8	14,5	3,0	0,9	0,0	7,4
05/07/2014	24,6	56,5	14,7	3,6	1,5	0,0	7,6
06/07/2014	24,2	56,0	14,7	3,5	1,3	0,0	7,7
07/07/2014	20,8	75,0	4,9	1,3	0,5	0,0	0,0
08/07/2014	21,3	80,9	7,9	1,9	1,2	0,0	0,7
09/07/2014	21,9	76,7	12,7	2,9	1,2	6,1	5,7
10/07/2014	19,1	91,7	7,6	1,5	0,4	1,5	0,4
11/07/2014	20,0	78,3	15,0	2,8	1,3	0,0	8,0
12/07/2014	21,0	68,2	15,2	3,4	1,6	0,0	8,2
13/07/2014	22,2	62,6	14,8	3,3	1,4	0,0	7,8
TOTAL	-	-	-	30,1	-	7,6	60,8
MEDIA	22,3	69,6	12,4	2,7	1,1	0,7	5,5
D.P.	2,2	11,7	3,7	0,8	0,4	1,8	3,4
V.MIN.	19,1	56,0	4,9	1,3	0,4	0,0	0,0
V.MAX.	25,5	91,7	15,2	3,6	1,6	6,1	8,2

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 11.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
07/07/2014	20,8	75,0	4,9	1,3	0,5	0,0	0,0
08/07/2014	21,3	80,9	7,9	1,9	1,2	0,0	0,7
09/07/2014	21,9	76,7	12,7	2,9	1,2	6,1	5,7
10/07/2014	19,1	91,7	7,6	1,5	0,4	1,5	0,4
11/07/2014	20,0	78,3	15,0	2,8	1,3	0,0	8,0
12/07/2014	21,0	68,2	15,2	3,4	1,6	0,0	8,2
13/07/2014	22,2	62,6	14,8	3,3	1,4	0,0	7,8
14/07/2014	22,5	60,5	15,3	3,5	1,4	0,0	8,4
15/07/2014	23,4	55,7	15,1	4,1	2,2	0,0	8,2
16/07/2014	24,8	54,1	14,3	3,7	1,5	0,0	7,3
17/07/2014	25,8	55,0	14,4	3,8	1,5	0,0	7,4
TOTAL	-	-	-	32,2	-	7,6	62,1
MEDIA	22,1	69,0	12,5	2,9	1,3	0,7	5,6
D.P.	2,0	12,4	3,8	1,0	0,5	1,8	3,5
V.MIN.	19,1	54,1	4,9	1,3	0,4	0,0	0,0
V.MAX.	25,8	91,7	15,3	4,1	2,2	6,1	8,4

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 12.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
09/07/2014	21,9	76,7	12,7	2,9	1,2	6,1	5,7
10/07/2014	19,1	91,7	7,6	1,5	0,4	1,5	0,4
11/07/2014	20,0	78,3	15,0	2,8	1,3	0,0	8,0
12/07/2014	21,0	68,2	15,2	3,4	1,6	0,0	8,2
13/07/2014	22,2	62,6	14,8	3,3	1,4	0,0	7,8
14/07/2014	22,5	60,5	15,3	3,5	1,4	0,0	8,4
15/07/2014	23,4	55,7	15,1	4,1	2,2	0,0	8,2
16/07/2014	24,8	54,1	14,3	3,7	1,5	0,0	7,3
17/07/2014	25,8	55,0	14,4	3,8	1,5	0,0	7,4
18/07/2014	20,4	81,7	8,1	1,7	0,7	2,5	0,9
19/07/2014	18,7	73,1	15,9	2,5	0,5	0,3	9,0
TOTAL	-	-	-	33,2	-	10,4	71,3
MEDIA	21,8	68,9	13,5	3,0	1,2	0,9	6,5
D.P.	2,3	12,4	2,9	0,8	0,5	1,9	3,0
V.MIN.	18,7	54,1	7,6	1,5	0,4	0,0	0,4
V.MAX.	25,8	91,7	15,9	4,1	2,2	6,1	9,0

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 13.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
08/09/2014	25,8	56,3	19,8	4,6	1,2	0,0	8,4
09/09/2014	27,0	45,3	21,4	6,1	2,3	0,0	9,5
10/09/2014	28,6	43,3	21,5	6,9	2,6	0,0	9,6
11/09/2014	29,1	46,4	19,8	5,1	1,2	0,0	8,4
12/09/2014	28,3	44,3	21,6	5,6	1,4	0,0	9,7
13/09/2014	27,9	36,2	21,6	6,1	1,9	0,0	9,7
14/09/2014	28,6	41,4	21,8	5,7	1,5	0,0	9,9
15/09/2014	25,7	58,2	12,8	3,8	1,5	0,0	3,5
16/09/2014	24,7	67,0	21,4	4,4	1,0	0,0	9,6
17/09/2014	27,7	51,8	21,6	5,0	1,0	0,0	9,8
18/09/2014	29,6	48,7	18,2	5,2	1,3	0,0	7,4
TOTAL	-	-	-	58,5	-	0,0	95,5
MEDIA	27,5	49,0	20,1	5,3	1,5	0,0	8,7
D.P.	1,6	8,8	2,7	0,9	0,5	0,0	1,9
V.MIN.	24,7	36,2	12,8	3,8	1,0	0,0	3,5
V.MAX.	29,6	67,0	21,8	6,9	2,6	0,0	9,9

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 14.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
09/09/2014	27,0	45,3	21,4	6,1	2,3	0,0	9,5
10/09/2014	28,6	43,3	21,5	6,9	2,6	0,0	9,6
11/09/2014	29,1	46,4	19,8	5,1	1,2	0,0	8,4
12/09/2014	28,3	44,3	21,6	5,6	1,4	0,0	9,7
13/09/2014	27,9	36,2	21,6	6,1	1,9	0,0	9,7
14/09/2014	28,6	41,4	21,8	5,7	1,5	0,0	9,9
15/09/2014	25,7	58,2	12,8	3,8	1,5	0,0	3,5
16/09/2014	24,7	67,0	21,4	4,4	1,0	0,0	9,6
17/09/2014	27,7	51,8	21,6	5,0	1,0	0,0	9,8
18/09/2014	29,6	48,7	18,2	5,2	1,3	0,0	7,4
19/09/2014	27,1	66,8	13,2	4,7	1,7	0,0	3,8
TOTAL	-	-	-	58,6	-	0,0	90,9
MEDIA	27,7	49,9	19,5	5,3	1,6	0,0	8,3
D.P.	1,5	10,1	3,4	0,9	0,5	0,0	2,4
V.MIN.	24,7	36,2	12,8	3,8	1,0	0,0	3,5
V.MAX.	29,6	67,0	21,8	6,9	2,6	0,0	9,9

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 15.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
29/09/2014	29,5	68,7	21,0	5,0	0,9	0,0	9,5
30/09/2014	24,9	84,3	14,0	3,9	2,6	7,4	2,9
01/10/2014	25,6	84,1	15,0	3,9	0,9	47,2	3,5
02/10/2014	24,8	73,5	19,2	4,7	2,6	0,0	6,1
03/10/2014	23,2	60,5	23,8	6,0	3,1	0,0	8,9
04/10/2014	22,6	58,1	24,2	6,1	2,9	0,0	9,1
05/10/2014	23,6	54,2	22,1	5,9	2,6	0,0	7,8
06/10/2014	24,4	51,4	23,0	6,0	2,4	0,0	8,4
07/10/2014	25,7	45,6	20,4	5,5	1,8	0,0	6,8
08/10/2014	27,1	43,2	24,9	5,7	1,2	0,0	9,6
09/10/2014	28,4	43,2	24,7	5,8	1,2	0,0	9,5
TOTAL	-	-	-	58,5	-	54,6	82,1
MEDIA	25,4	60,6	21,1	5,3	2,0	5,0	7,5
D.P.	2,2	15,2	3,8	0,8	0,8	14,2	2,4
V.MIN.	22,6	43,2	14,0	3,9	0,9	0,0	2,9
V.MAX.	29,5	84,3	24,9	6,1	3,1	47,2	9,6

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br

Dados climáticos referentes aos dias de secagem da repetição 16.

Dia	Temperatura média	Umidade Relativa do ar média	Radiação Global	ETo PN-M	Velocidade do vento média	Chuva	Insolação
-	°C	%	MJ/m2.dia	mm/dia	m/s	mm	h/dia
30/09/2014	24,9	84,3	14,0	3,9	2,6	7,4	2,9
01/10/2014	25,6	84,1	15,0	3,9	0,9	47,2	3,5
02/10/2014	24,8	73,5	19,2	4,7	2,6	0,0	6,1
03/10/2014	23,2	60,5	23,8	6,0	3,1	0,0	8,9
04/10/2014	22,6	58,1	24,2	6,1	2,9	0,0	9,1
05/10/2014	23,6	54,2	22,1	5,9	2,6	0,0	7,8
06/10/2014	24,4	51,4	23,0	6,0	2,4	0,0	8,4
07/10/2014	25,7	45,6	20,4	5,5	1,8	0,0	6,8
08/10/2014	27,1	43,2	24,9	5,7	1,2	0,0	9,6
09/10/2014	28,4	43,2	24,7	5,8	1,2	0,0	9,5
10/10/2014	29,7	44,1	23,8	6,0	1,2	0,0	9,0
TOTAL	-	-	-	59,5	-	54,6	81,6
MEDIA	25,5	58,4	21,4	5,4	2,0	5,0	7,4
D.P.	2,2	15,7	3,8	0,8	0,8	14,2	2,4
V.MIN.	22,6	43,2	14,0	3,9	0,9	0,0	2,9
V.MAX.	29,7	84,3	24,9	6,1	3,1	47,2	9,6

D.P.= Desvio Padrão; V.MIN = Valor Mínimo; V. MAX = Valor Máximo
Eto_PN-M = Evapotranspiração por Tanque Classe A e por Penman_Monteith
Fonte: http://clima.feis.unesp.br