

# SECAGEM DO BIOSSÓLIDO EM UMA ESTUFA AGRÍCOLA

*Drying the biosolids in an agricultural stove*

Ana Gabriella Vassoler de Andrade Santos, Alessandro Augusto Rogick Athiê, Rodrigo de Freitas Bueno, Emília Satoshi Miyamaru Seo

Centro Universitário Senac - CAS

Grupo de Pesquisa em Sustentabilidade

ag\_gabriella@hotmail.com, alessandro.aathie@sp.senac.br, rodrigo.bueno@ufabc.edu.br, emília.smseo@sp.senac.br

**Resumo.** O presente estudo teve como objetivo avaliar as potencialidades das estufas agrícolas para a pós-secagem do excesso de lodo de reatores anaeróbios de estações de tratamento de esgoto (UASB). Como metodologias do estudo, foram realizados primeiramente os levantamentos bibliográficos e o dimensionamento do leito e estufa agrícola. Em seguida, foram determinados como parâmetros de avaliação do lodo as medidas de temperatura, umidade, peso das amostras, pH e série de sólidos, seguindo-se as metodologias de análises do Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos do MAPA (2014) e normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Baseado no dimensionamento, a estufa agrícola construída teve dimensões de 2,5x1,5x1,5 metros. Em seu interior, foi realizada a secagem do lodo em um ciclo de 20 dias. Como resultados da secagem do lodo, concluiu-se que a estufa construída foi efetiva para a retenção de calor em seu interior, retendo 34,76% de calor. Em relação ao lodo, este obteve uma redução de umidade de 75% e aumento no teor de sólidos em 78%, passando de um lodo fluido para granular ao término do experimento, com redução de peso de 73,33% do inicial.

**Palavras-chave:** Biossólido, Secagem do lodo, UASB.

**Abstract.** *The present study aimed to evaluate the potential of agricultural greenhouses for the post-drying of excess sludge from anaerobic reactors of sewage treatment plants (UASB). As methodologies of the study, first were performed bibliographic surveys and the design of the bed and the greenhouse. Then, the parameters of the sludge were determined as measurements of temperature, humidity, sample weight, pH and solids series, following the analysis methodologies of the Manual of official analytical methods for fertilizers and correctives of MAPA (2014) and the regulations of the Brazilian Association of Technical Standards. Based on the design, the built agricultural stove had dimensions of 2.5x1.5x1.5 meters. In its interior, the sludge was dried during 20 days. As a result of sludge drying, it was concluded that the greenhouse was effective for retaining heat in the interior, retaining 34.76% heat. Regarding sludge, this achieved a reduction of 75% moisture and increased solids content of 78%, passing a fluid to granular sludge at the end of the experiment, with 73.33% of the initial weight reduction.*

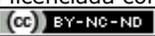
**Key words:** Biosolids, Sludge drying, UASB.

**Iniciação - Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**  
**Edição Temática em xxx**

Vol. x no x – (mês de publicação) de 2015, São Paulo: Centro Universitário Senac  
ISSN 2179-474X

Portal da revista: <http://www1.sp.senac.br/hotsites/blogs/revistainiciacao/>

E-mail: [revistaic@sp.senac.br](mailto:revistaic@sp.senac.br)

Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 

## 1. Introdução

O esgoto é um líquido cuja sua composição é, em média, 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos, sendo que 75% destes sólidos são constituídos de matéria orgânica em decomposição. Dentre os sólidos, estes podem ser sedimentáveis, não sedimentáveis e dissolvidos. Nesses sólidos, pode haver a proliferação de microrganismos patogênicos, além da possível presença de poluentes tóxicos, como os metais pesados, provenientes de efluentes industriais (METCALF & EDDY, 1991, *apud* NUVOLARI, 2011).

O sistema mais utilizado em estações de tratamento de esgoto convencionais são os Sistemas de Lodo Ativado, e apresentam inúmeras variações. Este é constituído por diversas unidades, e têm por finalidade a remoção dos sólidos presentes no esgoto (NUVOLARI, 2011).

Devido à predominância da água na composição do esgoto, admite-se que suas propriedades físicas são as mesmas da água, e, portanto, suas reações à ação de forças externas e seu escoamento em tubulações e canais é tratado como se fosse o da água (NUVOLARI e ARAÚJO, 2011). A grosso modo, pode-se dizer que tratar esgotos sanitários é basicamente remover os sólidos presentes, e esta remoção ocorre através de processos físicos, químicos e biológicos em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), no qual estes sólidos depositam-se no fundo dos decantadores, gerando uma biomassa conhecida como lodo (NUVOLARI, 2011).

Desta forma, o lodo representa o subproduto das estações de tratamento de esgoto, no qual se concentram poluentes, nutrientes e contaminantes. A geração deste lodo está diretamente relacionada à eficiência de tratamento da ETE, de modo que, quanto mais avançado for o tratamento, maior será a quantidade de lodo gerado no processo, que deve ser gerenciado e disposto adequadamente no meio ambiente, de forma a evitar problemas de contaminação ao meio (EPSTEIN, 2003, *apud* CORRÊA *et al*, 2007).

Como a geração de lodo tem sido cada vez maior nas grandes cidades, devido ao aumento da coleta de esgoto e avanço das tecnologias utilizadas para a remoção de sólidos, o posterior gerenciamento e descarte deste lodo de forma ambientalmente correta tem sido um desafio aos grandes centros urbanos (CORRÊA *et al*, 2007).

Pensando em formas de reutilização deste lodo e seus derivados ao invés do simples descarte deste no meio ambiente, foi criado o termo *Biossólido*, visando o reaproveitamento do lodo, sobretudo no setor agrícola. Definido pela USEPA- United States Environmental Protection Agency- (1995), biossólidos representam qualquer produto orgânico resultante de estações de tratamento de esgotos que, passado por devido tratamento e correção, podem ser benéficamente utilizados ou reciclados. A necessidade de tratamento deste lodo antes de sua utilização como biossólido é de suma importância, visto que este pode conter a presença de organismos como vírus, bactérias, protozoários e helmintos, que se relacionam diretamente às questões de saúde pública (USEPA, 1995).

A reciclagem de lodo para fins agrícolas é uma técnica que tem se destacado nos últimos anos. Tal técnica transforma um resíduo, antes sem novas utilidades a não ser o descarte, em um insumo agrícola, que fornece ao solo nutrientes e matéria orgânica. Além disso, na agricultura, tais biossólidos apresentam benefícios, como a diminuição do uso de fertilizantes químicos e melhoria das condições de balanço do CO<sub>2</sub> pelo incremento da matéria orgânica no solo (OUTWATER, 1994).

Do ponto de vista ambiental, tal técnica auxilia na redução do volume de resíduos destinados aos aterros sanitários, e respeita a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei 12.305/2010, que estabelece que a disposição final de rejeitos em aterros

sanitários é a última medida a ser adotada, devendo-se priorizar métodos de redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos (MMA, 2012).

Desta forma, a reciclagem dos resíduos proveniente de ETEs almeja trabalhar o lodo não mais como resíduo, e sim como produto de potencial agrônomico, denominado biossólido. Além de apresentar uma solução definitiva para o problema de disposição final do lodo, viabiliza a reciclagem de nutrientes e promove melhorias físicas na estruturação do solo (ANDREOLI *et al*, 1994, *apud* ANDREOLI 1998).

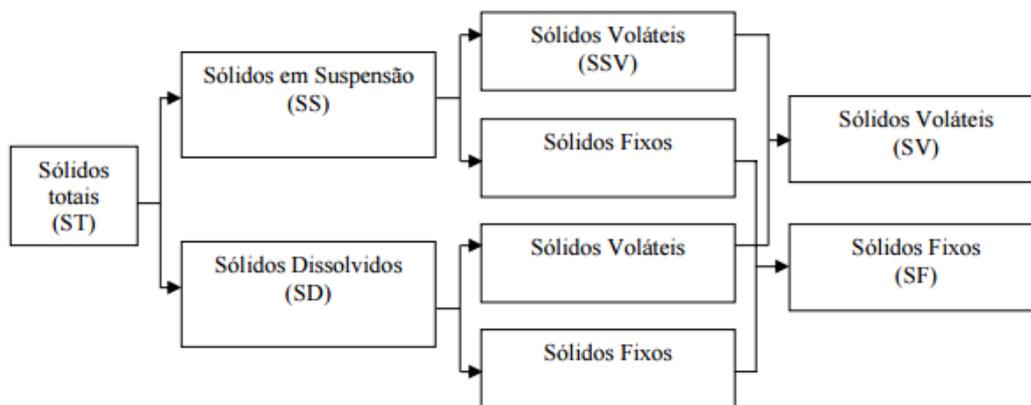
O presente artigo tem por objetivos avaliar as potencialidades das estufas agrícolas para a pós-secagem do excesso de lodo de reatores anaeróbios de estações de tratamento de esgoto (UASB).

## 2. Lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto e sua necessidade de tratamento

O lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto é constituído de água e sólidos. Esta relação entre água e sólido é tal que uma massa de lodo com umidade de 80% possui teor de sólidos de 20% (MELO, 2006).

A parte sólida do lodo pode ser classificada de acordo com o tamanho e sua fração orgânica. Ao analisar o tamanho de uma partícula sólida, esta pode ser classificada em Sólido Suspenso (SS) ou Sólido Dissolvido (SD). Em relação à matéria orgânica, estes podem ser inorgânicos e Fixos (SF), ou orgânicos e Voláteis (SV) (ANDREOLI *et al* 2001). A Figura 1 indica a distribuição de sólidos em lodo.

Figura 1- Distribuição de sólidos em lodo

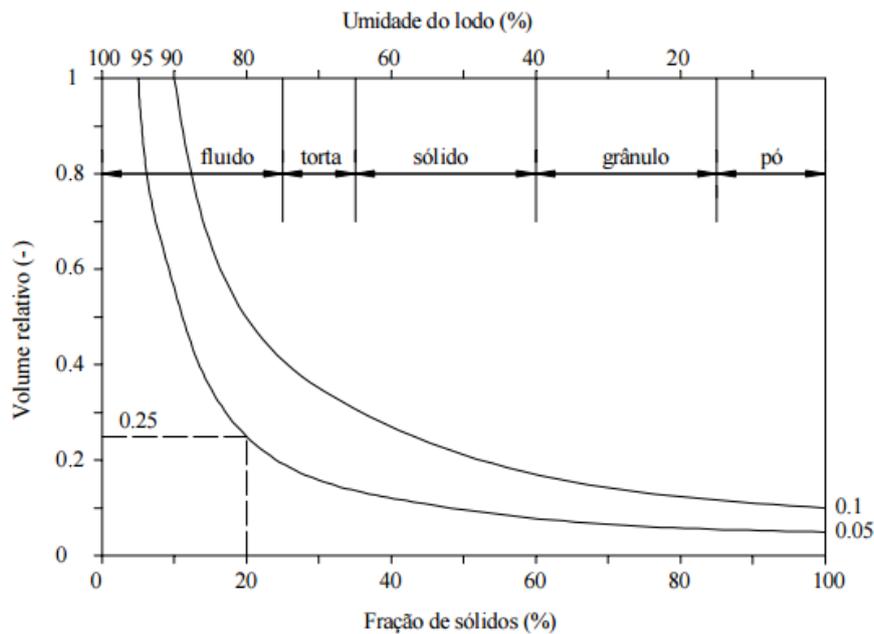


Fonte: ANDREOLI *et al*, 2001.

A fração orgânica de um lodo e seu nível de digestão pode ser determinada a partir da relação entre os Sólidos Voláteis e os Sólidos Totais. Em lodos digeridos a fração orgânica do lodo (SV/ST) situa-se entre 0,60 e 0,65, enquanto que em lodos não digeridos estes valores podem variar entre 0,75 e 0,80 (ANDREOLI *et al*, 2001, *apud* MELO 2006).

Em relação à umidade do lodo, a quantidade de água presente influi nas propriedades mecânicas e de manuseio do mesmo, além de variar o volume relativo e a fração de sólidos, como indica a Figura 2.

**Figura 2- Relação entre o volume de lodo e sua umidade ou fração de sólidos**



Fonte: Van Haandel & Lettinga,1994, *apud* MELO 2006.

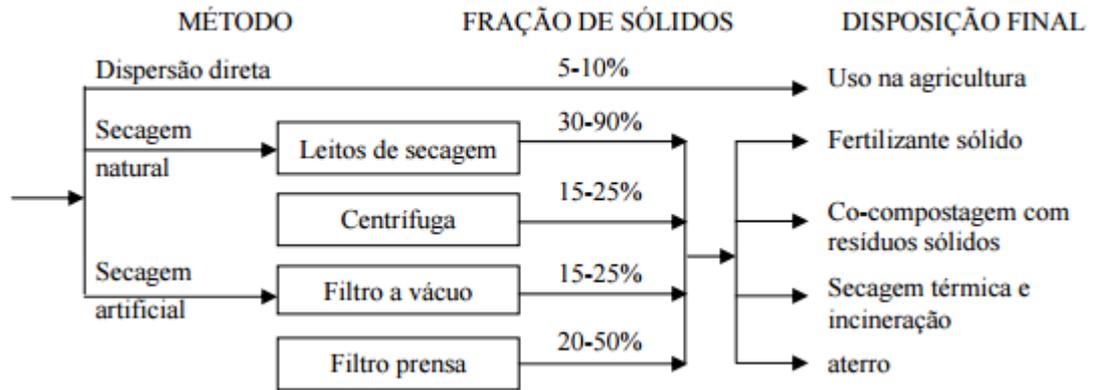
Na medida em que há uma redução na porcentagem de umidade do lodo, ocorre simultaneamente um aumento da fração de sólidos do mesmo. A quantidade de água presente relaciona-se à consistência do lodo, que passa de fluído à torta de lodo na medida em que se reduz a umidade. Quando a redução de umidade atinge valores próximos a 65%, o lodo começa a obter uma característica mais sólida. Atingindo-se valores de porcentagem de umidade inferiores a 40%, este se torna um grânulo duro, e umidades abaixo de 15% o transformam em um pó fino, que se desintegra facilmente. Diminuindo-se a umidade do lodo, além de alterações em sua consistência, há também uma diminuição significativa de seu volume, além do consequente aumento da concentração de sólidos totais presentes (MELO, 2006).

Como os lodos representam um subproduto proveniente de estações de tratamento de esgoto, estes concentram grande carga de microrganismos patógenos, como helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias, sendo de suma importância seu tratamento antes da reutilização (ANDREOLI *et al*, 2001).

A diminuição da umidade do lodo diminui as possibilidades de existência de alguns microrganismos de veiculação hídrica, relacionando-se a melhor higienização do lodo. Segundo Van Haandel & Lettinga (1994) citado por Melo (2006), existem alguns métodos para a diminuição da umidade do lodo, podendo ser métodos de secagem natural, artificial ou dispersão direta, como apresenta a Figura 3.

Métodos de dispersão direta conseguem atingir fração de sólidos de 5 a 10% em massa, com sua disposição final para uso agrícola. Métodos de secagem natural englobam leitos de secagem, com possibilidade de fração de sólidos de 30 a 90% em massa, e centrífugas, com teor de sólidos entre 15 e 25%. Entre os métodos de secagem artificial há o filtro a vácuo, com possibilidade de obtenção de teor de sólidos de 15 a 25% em massa, e o filtro prensa, com teor de sólidos de 20 a 50%. Como possibilidades de disposição final dos métodos de secagem direta e indireta, estes podem ser utilizados como fertilizantes sólidos; em processos de co-compostagem com resíduos sólidos; secagem térmica e incineração, ou a disposição final em aterros.

**Figura 3- Métodos de secagem de lodo e a fração de sólidos correspondentes**



Fonte: Van Haandel & Lettinga, 1994, apud MELO, 2006.

Realizada a etapa de secagem do lodo, faz-se necessária sua higienização. A etapa de higienização tem por objetivo reduzir as concentrações de microrganismos patógenos, evitando-se os riscos à saúde aos trabalhadores que irão manusear o biossólido, bem como possíveis contaminações no solo aplicado (PINTO, 2001, *apud* LIMA, 2010).

Alguns dos processos comumente utilizados para higienização do lodo, devido aos baixos custos associados, são a compostagem e o tratamento térmico, que se utilizam do aumento da temperatura do lodo para inativação de patógenos, e a caleação, processo no qual a adição de cal modifica o pH do lodo, proporcionando, também, a inativação de patógenos (ANDREOLI, 2001). Independente do processo de higienização utilizado é importante que o lodo já tenha passado pelos processos de estabilização e desaguamento, possuindo umidade reduzida e quantidade de sólidos por volta de 20 a 35%, para que o processo de higienização seja eficiente, reduzindo-se, também, os custos do processo (PINTO 2001, *apud* LIMA, 2010).

### 3. Leito de Secagem

O leito de secagem é o sistema mais comum de se preparar o lodo digerido para o destino final, no caso, a agricultura. Este é formado por camadas de areia apoiada em brita, possui uma base que pode ser de solo natural ou concreto, e deve ter uma ligeira declividade, para que a umidade escoe pelos drenos (MELO, 2006).

O leito de secagem pode ser coberto ou descoberto. Em leitos cobertos, a cobertura protege o lodo da chuva e pode auxiliar na higienização do mesmo, ocasionado pela elevação da temperatura, decorrente do processo de evaporação e liberação de energia dentro do sistema (MELO, 2006).

Para melhor aproveitamento dos leitos, estes requerem uma área elevada, e a taxa de evaporação da umidade dependerá de fatores como o clima, a natureza do lodo e a carga de lodo aplicada (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994, apud MELO 2006).

O ciclo de secagem do lodo no leito possui quatro etapas sequenciais: tempo de preparação do leito e descarga do lodo; tempo de percolação; tempo de evaporação até atingir a umidade desejada e tempo de remoção dos sólidos (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994, apud MELO 2006).

#### **4. Aplicação de biossólidos na agricultura**

No processo de tratamento de esgoto, há a geração de um resíduo conhecido como lodo. Quanto mais avançado e eficiente for o tratamento do esgoto, maior será a geração do lodo. Tal lodo constitui uma massa composta por poluentes, nutrientes, contaminantes e patógenos (EPSTEIN, 2003 *apud* CORRÊA, 2007)

Apesar de possuir muitos benefícios para uso agrícola, o lodo *in natura* pode exibir características indesejáveis, como instabilidade biológica, possibilidade de transmissão de patógenos e grandes volumes. Desta forma, o lodo deve passar por algumas etapas de tratamento até atingir a estabilização de um biossólido.

O tratamento do lodo de esgoto abrange processos físicos, químicos e biológicos. Usualmente, o tratamento do lodo, após a sua geração, inclui uma ou mais das seguintes etapas:

- Adensamento: redução de umidade (redução de volume)
- Estabilização: redução de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
- Condicionamento: preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
- Desidratação: redução adicional de umidade (redução de volume)
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

Os biossólidos são um insumo de grande potencial para uso agrícola, como fertilizante. A utilização deste insumo pode influenciar positivamente algumas características do solo, contribuindo com a redução da erosão e conseqüente melhoria da qualidade dos recursos hídricos.

A utilização de biossólidos na agricultura é uma técnica promissora, tanto sob o aspecto ambiental quanto econômico. Sob o aspecto ambiental, a utilização de tal insumo em áreas agrícolas "traz benefícios às propriedades físicas do solo relacionadas ao estado de agregação das partículas e o conseqüente incremento da capacidade de infiltração e retenção de água" (ANDREOLI, 1998).

A decomposição do lodo de esgotos gera agentes complexantes que facilitam a solubilização de fosfatos combinados no solo a ferro e alumínio, bem como nutrientes em compostos orgânicos de liberação lenta (CARVALHO E BARRAL, 1981, *apud* ANDREOLI, 1998).

Sob o aspecto econômico, trata-se de uma técnica que visa à reutilização de um resíduo, anteriormente sem utilidade, em um produto de potencial agrícola, com propriedades que o tornam especialmente interessante a solos agrícolas desgastados por manejos inadequados, bem como na recuperação de áreas degradadas (ANDREOLI 1995, *apud* ANDREOLI 1998).

Apesar dos benefícios, a reciclagem agrícola não é isenta de problemas. O correto estudo do lodo e do local onde o mesmo será reciclado é de suma importância. O lodo deve enquadrar-se nas exigências de qualidade e cuidados apontados pelas normas para estabilização, desinfecção e possíveis restrições de uso, evitando-se assim riscos associados a elementos traço, agentes patogênicos, problemas de odor e atração de vetores (OUTWATER, 1994).

#### **5. Aspectos Legais da reciclagem de lodo no Brasil**

A aplicação dos biossólidos na agricultura deve obedecer às normas brasileiras, a fim de se evitar possíveis riscos à saúde humana ou contaminações no solo. No Brasil, antes da criação de uma resolução de abrangência nacional, apenas três estados já haviam firmado suas próprias legislações a respeito da reutilização de lodos de estações de tratamento de esgoto e seus derivados: Paraná, São Paulo e o Distrito

Federal. Tomando frente dos estudos na área e com valores orientadores mais restritivos, a legislação do Paraná foi tomada como base para a criação da Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 375, de 29 de agosto de 2006, de abrangência nacional, na qual "define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências". Desta forma, como a Resolução Conama é mais restritiva que a legislação de São Paulo, criada em 1999 pela Cetesb, no estado de São Paulo deve-se adotar os valores orientadores fornecidos pela Resolução Conama.

A Tabela 1 indica um comparativo entre os valores de concentrações máximas de metais pesados e indicadores bacteriológicos em lodos de estações de tratamento de esgoto para reuso. Nesta, é possível observar que a Resolução Conama, semelhante à resolução Sema do Paraná, são as mais restritivas.

**Tabela 1- Comparativo das concentrações máximas permitidas de metais pesados e indicadores bacteriológicos**

Parâmetro	Concentração máxima permitida no lodo			
	Brasil Resolução nº 375/2006 (Conama)	São Paulo P4230/1999 (Cetesb)	Paraná 001/2007 (SEMA)	Distrito Federal (03-07/2006)
<b>Substâncias inorgânicas (mg/kg – base seca)</b>				
Arsênio	41	75	41	20
Bário	1300	-	1300	-
Cádmio	39	85	39	26
Chumbo	300	840	300	500
Cobre	1500	4300	1500	-
Cromo	1000	-	1000	-
Merúrio	17	57	17	15
Molibdênio	50	75	50	-
Níquel	420	420	300	-
Selênio	100	-	100	100
Zinco	2800	7500	2800	2800
<b>Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos</b>				
Coliformes termotolerantes	< 10 <sup>3</sup> NMP/ g ST	< 2 x10 <sup>6</sup> NMP/ g ST	< 10 <sup>3</sup> NMP/ g ST	
Ovos viáveis de helmintos	< 0,25 ovo/ g ST	-	< 0,25 ovo/ g ST	
<i>Salmonella</i> sp.	Ausência em 10g ST	3 NMP/ 4g ST	Ausência em 10g ST	
Vírus entéricos	< 0,25 UFP ou UFF/ g ST	-	< 0,25 UFP ou UFF/ g ST	
Cistos de protozoários	-	-	-	< 1/4 g ST

Fonte: ANDREOLI, et al, 2007; BRASIL, 2006; CETESB, 1999; adaptado por LIMA, 2010.

## 6. Materiais e Métodos

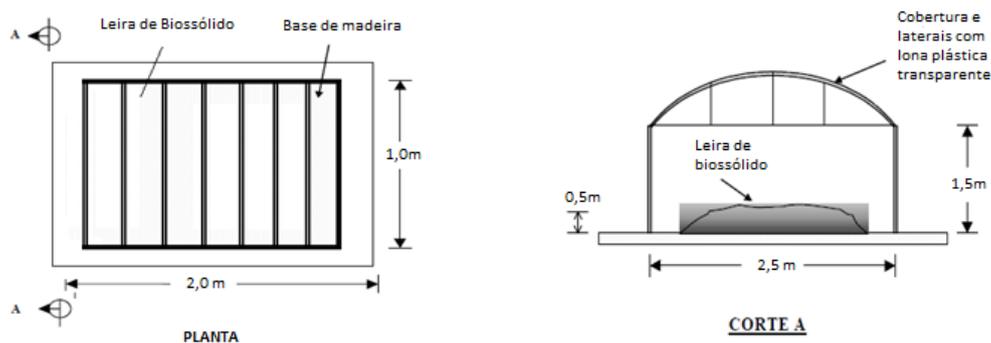
Para avaliação da secagem e higienização do lodo, foi construída uma estufa coberta com lona plástica com dimensões de 2,5 metros de comprimento por 1,5 metros de largura e 1,5 metros de altura. Dentro da estufa foi dimensionado um leito de secagem de lodo, dividido em 07 compartimentos (leiras) com espaçamento de 0,3 metros entre eles e 0,3 metros de altura, com um comprimento total de 2,0 metros por 1,0 metro de largura. A figura 4 composta ilustra as principais dimensões do leito de secagem de lodo (fig. a), e as principais dimensões da estufa agrícola, com o leito

de secagem em seu interior (fig. b). O equipamento foi construído no laboratório de Design Industrial do Centro Universitário Senac, seguindo-se as medidas de dimensionamento descritas. O leito de secagem foi construído em madeira MDF e impermeabilizado, e a estufa construída a partir de barras de ferro, cobertas com lona plástica transparente.

Material de partida: O lodo biológico utilizado nesse estudo foi proveniente de um reator anaeróbico de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) em operação no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) localizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), São Paulo – Brasil.

Ensaio de secagem de lodo: Considerou-se um ciclo de 20 (vinte) dias de secagem do lodo dentro da estufa agrícola, em triplicatas, colocadas em leiras separadas dentro do leito de secagem, com 3,0 kg de lodo já adensado em cada leira. Para melhor manuseio de cada amostragem do lodo, principalmente para a pesagem dos mesmos, estes foram colocados no leito de secagem dentro de sacos plásticos transparentes. Para a coleta de alíquotas a serem analisadas em laboratório, foi preenchida com lodo uma quarta leira, também com 3,0 kg, utilizada exclusivamente para a retirada de alíquotas (consequente redução da quantidade de lodo e seu peso), não influenciando nos valores obtidos nas leiras de triplicatas.

**Figura 4- Principais dimensões do leito de secagem de lodo e estufa agrícola (s/ escala)**



(fig. a)

(fig. b)

Desta forma, foram utilizadas, no total, quatro leiras do leito de secagem da estufa agrícola (01 leira para retirada de amostras e 03 leiras em triplicatas), todas com peso inicial de lodo de 3,0 kg, que foram revolvidos mecanicamente 01 vez por dia, de segunda a sexta feira, durante o ciclo do experimento. Após a alimentação do lodo no leito de secagem, foram realizadas, de segunda a sexta feira, medições da temperatura e umidade dentro da estufa, bem como a temperatura e umidade do lodo, em três pontos de cada leira, utilizando-se de aparelho termo higrômetro digital devidamente calibrado. O revolvimento do lodo foi realizado mecanicamente, com uma pá, todos os dias. Também foi realizada a pesagem do lodo de cada leira em uma balança, a fim de medir as diferenças de peso obtidas diariamente devido à evaporação da água presente no lodo. Além disso, foram coletadas diariamente alíquotas da quarta leira, em quatro pontos diferentes da mesma, para serem analisadas em laboratório as concentrações de sólidos totais, fixos e voláteis presentes e o pH das amostras.

Para o controle do processo de secagem do lodo na estufa agrícola, foram definidas variáveis de controle como pH, teor de sólidos, peso, temperatura e umidade do lodo e da estufa.

As análises de peso e temperatura foram realizadas no próprio local no qual se situa a estufa. Para as medidas de temperatura foi utilizado aparelho termo higrômetro digital de marca Akso, e para a pesagem foi utilizada uma balança da marca Filizola com precisão de 100 gramas, todos devidamente calibrados. Para a medição do pH das amostras, foi utilizado como base os procedimentos do Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) de 2014, especificamente o capítulo III do Manual- Análise dos fertilizantes orgânicos e organominerais destinados à aplicação via solo.

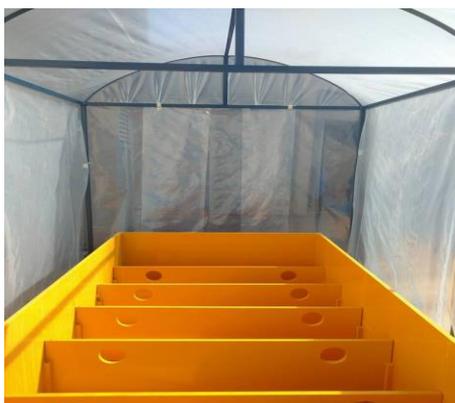
Em relação à umidade e série de sólidos, estes se basearam na normativa NBR ABNT 10664: Água- determinação de resíduos sólidos- Método Gravimétrico<sup>6</sup>, indicado para análises de sólidos em amostras de água, efluentes domésticos e industriais, lodos e sedimentos.

## 7. Resultados e Discussão

A câmara de estocagem de lodo, ou leito de secagem, foi construída em madeira MDF de 15 mm de espessura. O dimensionamento conta com uma base de 2,0 metros de comprimento por 1,0 metro de largura e 0,5 metros de altura. Dentro da câmara, o espaço interno foi dividido em 07 leiras de aproximadamente 0,3 metros de distância entre elas e 0,3 metros de altura. Por fim, este foi impermeabilizado com Primer P.U. e pintado.

A estufa agrícola que comporta a câmara de armazenamento foi construída a partir de barras de ferro de 2,5 cm de espessura. O dimensionamento da estrutura foi de 2,5 metros de comprimento por 1,5 metros de largura e 1,5 metros de altura, sem contar a altura do arco superior da estufa. A estrutura foi lixada e pintada para melhor acabamento. Além disso, na base foram soldadas 06 rodas com capacidade de suporte de 300 kg cada, facilitando o transporte da estufa. Na estrutura de ferro, foi fixada com rebites uma lona grossa transparente, com aberturas nas laterais. Dada esta etapa, o leito de secagem foi colocado dentro da estrutura da estufa, finalizando a construção da estufa agrícola, como indica a figura 5 (a e b).

**Figura 5- Estufa agrícola finalizada**



(fig. a)



(fig.b)

### 7.1.Umidade e série de sólidos

A umidade e série de sólidos foi realizada a partir da coleta de alíquotas em quadruplicata, retiradas da quarta leira do leito de secagem, não influenciando nas outras três leiras utilizadas como triplicatas. Os valores de umidade, sólidos totais, fixos e voláteis, e fração orgânica, todos em porcentagem, são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2- Porcentagem de umidade e série de sólidos**

Dia de análise	média % umidade	Desvio padrao umidade	média de ST	Desvio padrão ST	Média de SF	Desvio padrão SF	Média de SV	Desvio padrão SV	Fração orgânica SV/ST
1	82,63	0,00	17,37	0,00	10,08	0,00	7,29	0,00	0,42
4	77,83	0,38	22,17	0,38	13,14	0,35	9,03	0,46	0,41
5	77,60	0,67	22,40	0,67	12,96	0,57	9,44	0,69	0,42
7	70,83	1,28	29,17	1,28	17,60	1,25	11,57	0,16	0,40
8	69,65	0,51	30,35	0,51	16,29	0,52	14,06	0,67	0,46
11	65,59	0,39	34,41	0,39	19,97	0,98	14,45	0,80	0,42
12	61,01	1,81	38,99	1,81	23,26	1,66	15,73	0,22	0,40
13	49,54	5,34	50,46	5,34	32,49	3,58	17,97	2,34	0,36
14	36,57	9,43	63,43	9,43	40,66	5,85	22,76	3,86	0,36
20	20,27	4,70	79,73	4,70	48,19	2,63	31,53	4,13	0,40

Onde:

ST= sólidos totais

SF = sólidos fixos

SV = sólidos voláteis

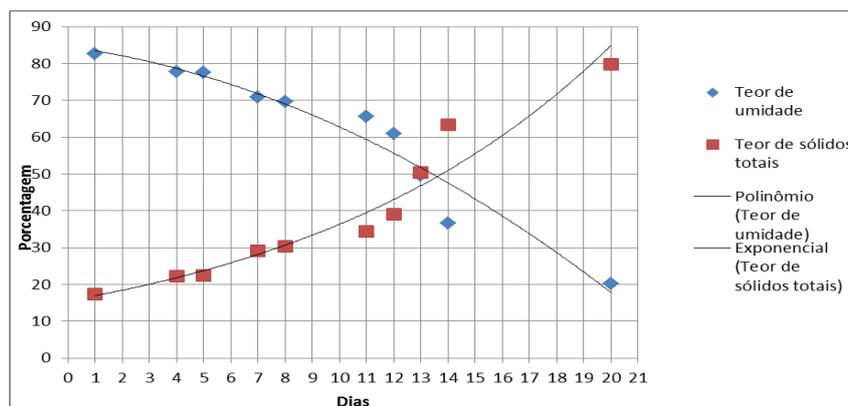
Como os dias de análise não foram sequenciais, estes estão indicados na tabela de acordo com o dia da análise a que correspondem, havendo então um intervalo de 02 dias entre a primeira e a segunda análise; um intervalo de 01 dia entre a terceira e a quarta análise; intervalo de 02 dias entre a quinta e a sexta análise; e intervalo de 05 dias entre a nona e a décima análise. Estes intervalos maiores ocorreram em feriados e emendas, e os intervalos menores associam-se aos finais de semana, não sendo possível a realização de análises.

Analisando-se a porcentagem de umidade obtida, esta passou de 82,63% no primeiro dia do experimento, para 20,27%, obtendo uma redução de umidade de 75% do início ao término do experimento, em um ciclo de 20 dias de secagem. Embora muito próximo ao sugerido pela Resolução Conama nº375, que é de 10% de umidade para que haja uma redução de agentes patogênicos e atratividade de vetores, este valor não foi obtido.

Em relação à série de sólidos, analisando-se em específico os sólidos totais, de acordo com a literatura, estes possuem relação direta com o teor de umidade, de modo que a diminuição da umidade acarrete no aumento do teor de sólidos totais. Além disso, de acordo com a Resolução Conama nº 375, a concentração de sólidos deve alcançar no mínimo 90%, sem que haja mistura de qualquer aditivo, para redução da atratividade de agentes patogênicos e vetores. Desta forma, no início do experimento o teor de sólidos era de 17,37%, e finalizando-se com 79,73%.

Relacionando-se os resultados obtidos para umidade e teor de sólidos totais, todos indicados em porcentagem, é possível perceber que estes se comportaram de fato como abordado pela literatura, mantendo-se a relação da diminuição da umidade com o aumento da concentração de sólidos, como indicado na figura 6.

**Figura 6 - Relação entre teor de umidade e teor de sólidos totais**



De acordo com a figura 6, é possível perceber a inversão das curvas de umidade, representada pelos pontos azuis no gráfico, com a curva de teor de sólidos, representado pela cor vermelha, as quais se cruzam especificamente no dia 13 do experimento, e, de acordo com as linhas de tendência projetadas, seriam necessários mais um ou dois dias para se atingir os resultados sugeridos pela Resolução do Conama, com teor de sólidos de 90%, e umidade próxima de 10%, para que haja uma redução de agentes patogênicos e atratividade de vetores. Além disso, observando-se a relação de teor de umidade e de sólidos no início do experimento, com o teor de umidade e sólidos ao final do experimento, é possível afirmar que a consistência do lodo apresentou alterações durante o ciclo de análises, passando de fluido para granular.

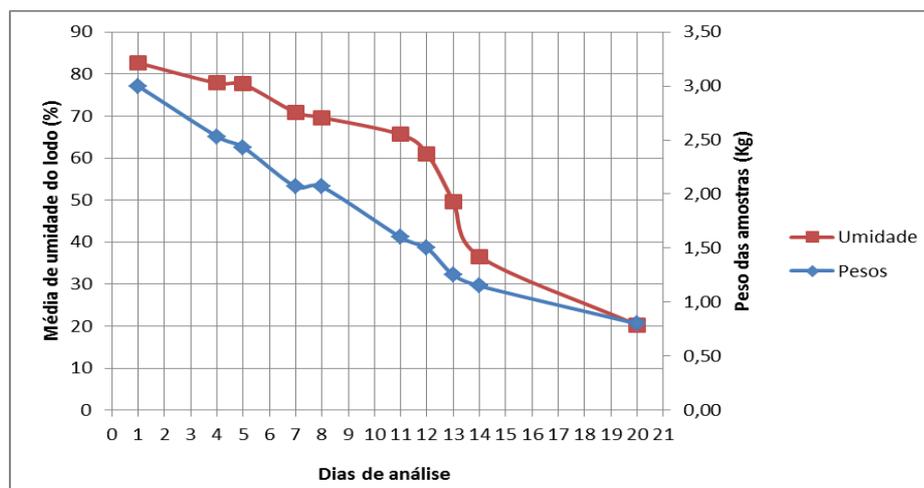
Em relação à fração orgânica do lodo, esta está diretamente relacionada ao nível de digestão do mesmo. Desta forma, analisando-se à fração orgânica do lodo estudado, os valores obtidos variaram entre 0,36 a 0,46, indicando, de acordo com a literatura, que o lodo está estável e possui digestão aceitável.

## **7.2.Redução de peso das amostras**

No início do experimento cada leira do leito de secagem possuía 3,0 kg de lodo. Durante o ciclo de 20 dias de secagem do mesmo em estufa agrícola, este perdeu quantidade significativa de umidade acarretando na redução do peso das amostras, que obtiveram peso de 0,800 kg no ultimo dia de análise do experimento, obtendo eficiência de redução de volume de 73,33%.

Por possuírem relação, a figura 7 mostra os resultados de porcentagem de perda de umidade do lodo com a redução de peso das amostras, todos em função dos dias de análise.

**Figura 7 - Relação entre diminuição da porcentagem de umidade e perda de peso do lodo, em quilos.**



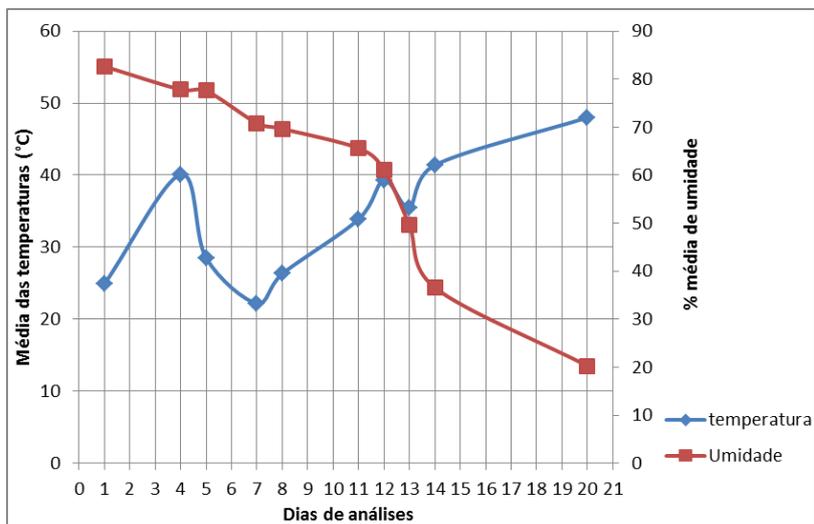
Desta forma, comparando-se os resultados de perda de umidade, indicados pela cor vermelha na figura 7, com perda de peso das amostras, indicado em azul, é perceptível que ambos possuem relação entre si e comportaram-se da mesma maneira, em uma linha decrescente, tendendo a sempre reduzir seus valores. Além disso, as porcentagens de eficiência de ambos foram muito próximas, apresentando uma redução de 73,33% de peso e 75% de redução de umidade ao longo do ciclo de análises.

### **7.3. Temperatura do Lodo**

Os valores obtidos de temperatura do lodo, em °C, variaram bastante ao longo dos dias de análises, obtendo como temperatura mínima 22,2°C, e a máxima de 48°C obtida no último dia do experimento. As médias de temperaturas obtidas pelos lodos indicam um dos fatores de suma importância para a redução de umidade obtida nos mesmos. Desta forma, a figura 8 relaciona os valores de porcentagem de umidade com a variação das temperaturas, em função dos dias de análises.

Embora os resultados de média de temperaturas obtidos não tenham se comportado de forma linear, devido às alterações climáticas naturais ocorridas durante o experimento, os valores de temperatura, representados pela linha azul no gráfico, tenderam a subir ao final do experimento. A relação entre os parâmetros apresentados torna-se mais evidente a partir do 13º dia de análise, no qual, com a estabilização do tempo, as temperaturas tendem a subir continuamente, enquanto que os valores de umidade, representados pela linha vermelha, passam a diminuir na mesma proporção, apresentando curvas inversas semelhantes.

**Figura 8 - Relação entre percentagem média de umidade do lodo e médias de variação de temperatura dos mesmos, em função dos dias de análises.**

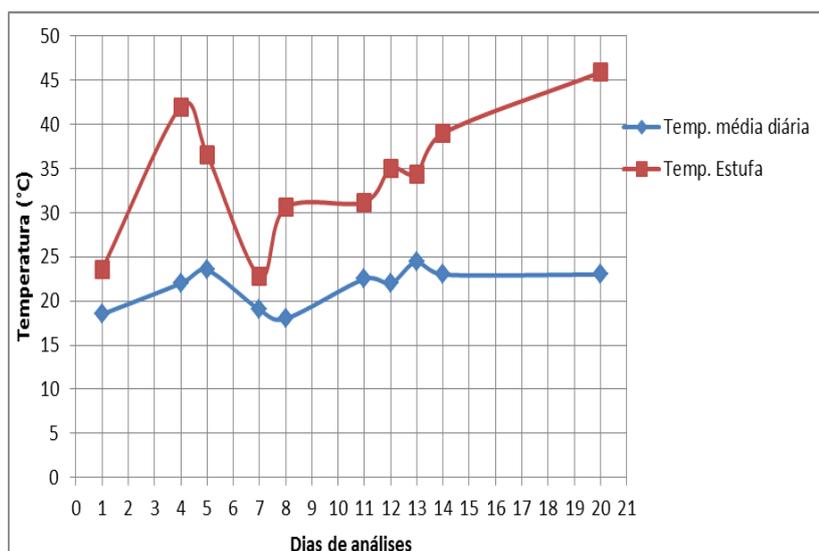


#### 7.4. Temperatura da Estufa

A temperatura mínima obtida no interior da estufa construída foi de 22,8°C, enquanto que a temperatura máxima foi de 45,9°C, obtida no último dia do experimento. Comparando-se os valores de temperatura interna da estufa com a temperatura do lodo, ambos apresentaram as mesmas reações de temperatura frente ao clima e às intempéries naturais ao qual a estufa agrícola estava sujeita, passando por períodos de chuvas fortes, seguido por dias ensolarados, que influenciavam nas temperaturas obtidas nas análises.

A fim de se verificar a eficiência de retenção de calor da estufa em relação à temperatura média ambiente fora da estufa, foi obtida a série história de médias de temperaturas diárias para o município de São Paulo, obtidas pelo site de meteorologia AccuWeather®, especificamente para os dias de análises realizados, com os resultados comparativos entre as temperaturas, em °C, apresentados na figura 9. Analisando-se o comparativo das temperaturas médias diárias fora da estufa e das temperaturas internas da estufa, percebe-se que esta obteve uma percentagem média de eficiência de retenção de calor de 34,76%.

**Figura 9 - Comparativo das temperaturas médias diárias e temperatura interna da estufa, em °C, em função dos dias de análises.**



### 7.5.pH do Lodo

Os valores de pH das amostras de lodo tenderam a diminuir, com valores iniciais próximos a 7, e finalizando o experimento com valor próximo a 4,5, indicando um processo de acidificação das amostras. Vale ressaltar que a unidade de leitura deste pH, definido pelo método utilizado, é pH em solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol.L<sup>-1</sup>.

Especificamente no estudo realizado, não foi realizada a correção e adição de cal ao lodo, justificando-se, desta forma, a diminuição dos valores de pH obtidos ao longo do ciclo de análises. Além disso, pode-se associar também a esta diminuição de pH a atividade de bactérias que degradam matéria orgânica no lodo e torna o meio mais ácido, visto que, além da não aplicação de cal no lodo estudado, este também não atingiu os valores de temperatura citados pela norma para garantir uma redução significativa de patógenos das amostras.

### 8. Conclusões

O experimento de secagem de lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto, em estufa agrícola, construída no Laboratório de Design Industrial do Centro Universitário Senac mostrou resultados satisfatórios em relação à funcionalidade da estufa construída, atendendo aos objetivos de retenção de calor, de modo que, em um ciclo de análises de 20 dias o lodo apresentou redução em seus teores de umidade e volume, e aumento nos teores de sólidos totais.

Apesar de interessantes os resultados, algumas considerações devem ser feitas, como, por exemplo, a respeito da quantidade de lodo utilizada. Devido dificuldades para a obtenção de lodo, foi disponibilizado para o estudo apenas 12 kg do mesmo, o que dificultou a continuidade do estudo, limitando o ciclo de secagem em 20 dias. Como esta quantidade precisou ser dividida em leiras de triplicatas e uma quarta leira de coleta de alíquotas, cada leira iniciou-se com 3,0 kg de lodo, que, com o tempo, por perder umidade, reduziram seu volume, até inviabilizar a coleta de novas alíquotas. Desta forma, para futuros estudos, sugere-se a utilização de uma quantidade maior de

lodo, de forma que a redução natural de seu volume não limite os dias possíveis de análise.

Associado à quantidade de lodo utilizada, sugere-se também a repetição de pelo menos três ciclos do experimento, auxiliando na comparação e veracidade dos resultados obtidos. Além de mais ciclos, faz-se interessante que cada ciclo possua mais dias de análises, visto que os 20 dias estudados não foram suficientes para atingir teor de umidade e sólidos desejados pela Resolução Conama nº 375 de 2006.

Buscando adequar os resultados obtidos aos valores indicados pela Resolução Conama, faz-se necessária a aplicação de cal ao lodo para correção de seu pH final. Além disso, para posteriores estudos, é interessante a verificação de sistemas de isolamento de calor mais eficientes para melhor vedação da estufa, almejando atingir temperaturas maiores, buscando-se a aproximação aos valores de temperatura da Resolução.

Apesar de este estudo tomar como base os valores orientadores sugeridos pela Resolução Conama, o lodo estudado não foi caracterizado nem mesmo classificado, visto que a realização de análises de potencial agrônômico, o detalhamento das substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos não eram possíveis de serem realizadas no laboratório da instituição. Desta forma, sugere-se, em estudos posteriores, a realização destas análises no início, no meio e no fim do experimento, pelo menos, a fim de nortear quanto a real evolução do potencial agrônômico atingido ou não pelo lodo nos leitos de secagem da estufa agrícola produzida.

## Referências

ACCUWEATHER©. Meteorologia. Série histórica de temperaturas máximas e mínimas diárias. Brasil. São Paulo, SP. Disponível em <<http://www.accuweather.com/pt/br/sao-paulo/45881/october-weather/45881?monyr=10/1/2016>>

ANDREOLI C. V.; de LARA A. I.; FERREIRA A. C.; BONNET B. R. P.; PEGORINI E. S. **Gestão dos Biossólidos Gerados em Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico II**. Engenharia e Construção, Curitiba, setembro de 1998, n. 24 Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/sanepar/gecip/congressos\\_seminarios/lodo\\_de\\_esgoto/gestao\\_biossolidos\\_etes.pdf](http://www.sanepar.com.br/sanepar/gecip/congressos_seminarios/lodo_de_esgoto/gestao_biossolidos_etes.pdf)>.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; 6. Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. 1989. **Nbr 10664- Água-Determinação de resíduos (sólidos) – Método Gravimétrico**. Rio de Janeiro.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>

CORRÊA, Rodrigo S.; FONSECA, Yone M. F.; CORREA, Anelisa S.. **Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental. Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 420-426, agosto de 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662007000400012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000400012&lng=en&nrm=iso)>.

LIMA, Marcia Regina Pereira. 2010. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.

MELO, Amilton Sales de. **Contribuição Para o Dimensionamento de Leitões De Secagem de Lodo**. Pós-Graduação Em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal De Campina Grande. Centro De Tecnologia e Recursos Naturais. Setembro de 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. 2014. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Secretaria da Defesa Agropecuária. Brasília.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais. Brasília, fevereiro de 2012. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS\\_consultaspublicas.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS_consultaspublicas.pdf)

NUVOLARI et al. **Esgoto Sanitário: Coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. Editora Blucher. 2011.

OUTWATER, A.B. **Reuse of sludge and minor wastewater residuals**. S.I. : Lewis Publishers, 1994. 179p.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 rule**. 1995. Washington: Office of Wastewater Management, EPA/ 832-B-93-005, 1995. 195p.