

AMILTON ALVES FILHO

**DESINFECÇÃO DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO PARA FINS AGRÍCOLAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

AMILTON ALVES FILHO

**DESINFECÇÃO DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO PARA FINS AGRÍCOLAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 28 de maio de 2014

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo

UFU

Prof. Dr<sup>a</sup>. Regina Maria Quintão Lana

UFU

Prof. Dr<sup>a</sup>. Sueli Moura Bertolino

UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Eiterer de Souza

UNIPAM

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo  
ICIAG-UFU  
(Orientador)

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A474d Alves Filho, Amilton, 1979-  
2014 Desinfecção de lodo de esgoto anaeróbio para fins agrícolas  
/ Amilton Alves Filho. -- 2014.  
68 f. :il.

Orientador: Reginaldo de Camargo.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.  
Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Lodo de esgoto - Teses. 3. Lodo  
- Aproveitamento - Teses. I. Camargo, Reginaldo de. II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
Graduação em Agronomia. III. Título.

---

CDU: 631

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Reginaldo de Camargo, pela oportunidade, pelos ensinamentos e pela dedicação.

À minha esposa Kamila Borges Alves, pelo incentivo e pela compreensão durante os períodos de estudo.

Aos meus pais Amilton Alves de Freitas e Ivone Maria de Moraes Freitas e aos meus irmãos.

À técnica administrativa Márcia Batistela, que auxiliou em todas as análises — microbiológicas, químicas e físicas — realizadas no lodo de esgoto.

Ao professor Dr. Hudson de Paula Carvalho, por liberar o laboratório de microbiologia ambiental para a realização das análises.

Ao Professor Dr. Roberto Terumi Atarassi, pelo auxílio na montagem e na coleta dos dados de temperatura do *Datalogger*.

À Professora Dr<sup>a</sup>. Regina Maria Quintão Lana, pela Co-orientação.

Ao Técnico de Laboratório Manoel Ribeiro Pires, pela ajuda e pelo ensinamento nas análises laboratoriais.

Ao Engenheiro Químico Alírio Coromoto Daboin Maldonado e ao Engenheiro Agrônomo Geraldo Silvio de Oliveira, servidores do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), por cederem o lodo de esgoto utilizado no experimento.

A todos os professores e colegas do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
2.1 Tratamento de efluentes sanitários .....	3
2.2 Características do lodo de esgoto .....	4
2.3 Agentes Patogênicos e indicadores bacteriológicos no lodo de esgoto.....	7
2.4 Bactérias presentes no lodo de esgoto .....	7
2.5 Vírus no lodo de esgoto .....	9
2.6 Ovos de helmintos e cistos de protozoários no lodo de esgoto .....	10
2.7 Tempo de sobrevivência de patógenos .....	11
2.8 Higienização do lodo de esgoto através de tratamento ácido e alcalino ....	13
2.9 Solarização .....	16
2.10 Aspectos normativos do uso agrícola do lodo de esgoto .....	17
2.11 Uso agrícola do lodo de esgoto .....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	24
3.1 Local do experimento .....	24
3.2 Lodo de esgoto utilizado no experimento .....	24
3.3 Tratamentos e delineamento experimental .....	25
3.4 Registros de temperatura .....	26
3.5 Coletas de amostras para análises laboratoriais .....	27
3.6 Análises laboratoriais .....	28
3.7 Análise estatística dos dados .....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
4.1 Parâmetros microbiológicos: coliformes totais e termotolerantes .....	31
4.2 Características físico-químicas do lodo .....	36
4.2.1 Temperatura .....	36
4.2.2 Umidade (U), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST) .....	41
4.3 Substâncias inorgânicas (íons metálicos) .....	45
4.4 Parâmetros de interesse agronômico .....	50
5 CONCLUSÕES .....	57
6 REFERÊNCIAS .....	58

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1.</b> Características químicas de lodo de esgoto proveniente das Estações de Tratamento de Barueri (LB), Franca (LF) e Jundiaí (LJ), no Estado de São Paulo	5
<b>TABELA 2.</b> Bactérias patogênicas de maior preocupação em lodo de esgoto e águas residuárias	8
<b>TABELA 3.</b> Vírus e lodo primário, secundário, misto e de lagoa anaeróbica	10
<b>TABELA 4.</b> Principais protozoários, helmintos e cestoides encontrados em lodo de esgoto	10
<b>TABELA 5.</b> Tempo de sobrevivência de agentes patogênicos no solo e em vegetais	12
<b>TABELA 6.</b> Redução de micro-organismos durante a digestão anaeróbica de esgoto sanitário	12
<b>TABELA 7.</b> Limites máximos permitidos em lodo de esgoto ou produto derivado	19
<b>TABELA 8.</b> Tratamentos utilizados no processo de higienização do lodo e suas respectivas concentrações	25
<b>TABELA 9.</b> Densidade, pureza, pH e estado físico dos produtos químicos utilizados	25
<b>TABELA 10.</b> Característica da cal hidratada, utilizada na caleação do lodo de esgoto	26
<b>TABELA 11.</b> Características do lodo de esgoto anaeróbio da Estação de Tratamento ETE - Uberabinha – Uberlândia-MG.	29
<b>TABELA 12.</b> Análise de variância dos coliformes totais e termotolerantes no período de amostragem entre 07/08/2013 e 27/08/2013	31
<b>TABELA 13.</b> Coliformes totais em Número Mais Provável (NMP) $g^{-1}$ de Sólidos Totais (ST), do lodo de esgoto, submetidos a diferentes produtos higienizadores em função das épocas de avaliação	32
<b>TABELA 14.</b> Coliformes termotolerantes em NMP $g^{-1}$ de ST, em função de sua submissão a diferentes produtos higienizadores e da época de avaliação	32

<b>TABELA 15.</b> Análise de variância dos dados de temperatura do lodo em função dos tratamentos e épocas de avaliação	36
<b>TABELA 16.</b> Resumo da análise de variância dos valores relativos à Umidade (U), aos Sólidos Totais (ST), aos Sólidos Voláteis (SV) e à relação Sólidos Voláteis/Totais	41
<b>TABELA 17.</b> Umidade (%) do lodo em função dos meios de higienização utilizados e épocas avaliadas	42
<b>TABELA 18.</b> Valores de Sólidos Totais (%) do lodo em função dos meios de higienização utilizados e épocas avaliadas	43
<b>TABELA 19.</b> Sólidos Voláteis (%) e relação Voláteis/Sólidos Totais	44
<b>TABELA 20.</b> Resumo da análise de variância das substâncias inorgânicas analisadas	46
<b>TABELA 21.</b> Metais pesados em lodo de esgoto em função dos tratamentos e épocas avaliadas	47
<b>TABELA 22.</b> Atributos químicos do lodo de esgoto	52
<b>TABELA 23.</b> Atributos químicos do lodo de esgoto	53

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> Coleta do lodo de esgoto desidratado na estação de tratamento ETE Uberabinha (A) e betoneira utilizada na mistura do lodo com os produtos higienizadores (B)	26
<b>FIGURA 2.</b> Coleta de dados do <i>datalogger</i> (A) e parcelas com lodo de esgoto e tampa de vidro transparente (B)	27
<b>FIGURA 3.</b> Coliformes Termotolerantes (CT) em função de sua submissão a diferentes produtos higienizadores e das épocas de avaliação comparadas com os limites máximos permitidos pela resolução CONAMA n. 375/2006	35
<b>FIGURA 4.</b> Temperatura do lodo de esgoto submetida a diferentes épocas de avaliação	37
<b>FIGURA 5.</b> Perfil da temperatura do lodo de esgoto ao longo do dia, durante o período de 07/08/2013 a 27/08/2013	38
<b>FIGURA 6.</b> Radiação solar registrada no período de 07/08/2013 a 27/08/2013	39
<b>FIGURA 7.</b> Temperatura ambiente e precipitação durante o período experimental, Uberlândia/ 2013	39
<b>FIGURA 8.</b> Temperatura do lodo homogeneizado com produtos higienizadores e temperatura ambiente	40
<b>FIGURA 9.</b> Relação entre Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST)	45
<b>FIGURA 10.</b> Íons metálicos no lodo de esgoto e limites máximos permitidos para uso agrícola em função dos tratamentos	49

## APÊNDICE A

<b>QUADRO 1.</b> Resumo da análise de variância para atributos agronômicos no lodo de esgoto	67
<b>QUADRO 2.</b> Resumo da análise de variância para atributos agronômicos no lodo de esgoto	68

ALVES FILHO,AMILTON. **DESINFECÇÃO DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO PARA FINS AGRÍCOLAS.** 2014. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.<sup>1</sup>

## RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar o efeito da combinação entre tratamentos químicos e solarização na higienização e composição química e física do lodo de esgoto — resíduo oriundo do sistema de tratamento de efluentes — proveniente de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) da Estação de Tratamento – ETE Uberabinha, localizada em Uberlândia-MG. Sabe-se que a presença de agentes patogênicos e metais pesados são os principais limitantes da utilização desse lodo na agricultura. Para tanto, utilizou-se o esquema de parcelas subdivididas no tempo, em delineamento experimental de blocos ao acaso  $5 \times 3 + 1$ , com quatro repetições, em 4 (quatro) épocas de avaliação (0,7,14 e 21 dias), sendo que a época zero (0) correspondia ao tratamento adicional, totalizando 64 subparcelas. Os tratamentos foram constituídos por lodo puro, lodo mais ácido peracético ( $260 \text{ mg L}^{-1}$ ), lodo homogeneizado com cal hidratada ( $\text{CaOH}_2$ ) na proporção de 30% da massa seca do lodo, lodo com hipoclorito de sódio ( $2500 \text{ mg L}^{-1}$ ) e lodo mais quaternário de amônio ( $2400 \text{ mg L}^{-1}$ ). O tratamento com cal hidratada reduziu os níveis de coliformes totais e termotolerantes aos 7 dias, após a mistura com o lodo, atendendo aos requisitos determinados na legislação ambiental para uso agrícola. A radiação solar, por si só, não reduziu a concentração de coliformes termotolerantes aos limites aceitáveis pela norma ambiental. Os tratamentos avaliados não ocasionaram diferenças de temperatura na massa do lodo de esgoto. O lodo caleado apresentou os maiores teores de cálcio ( $302 \text{ g kg}^{-1}$ ), magnésio ( $4,2 \text{ g kg}^{-1}$ ) e sólidos totais, menores teores de Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, sólidos voláteis e umidade após a mistura com o lodo de esgoto. Os teores de metais pesados (Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb) encontravam-se abaixo dos limites especificados na resolução CONAMA n. 375/2006. O lodo caleado apresentou os maiores valores de pH (12,65), menores teores de alumínio ( $20,10 \text{ g kg}^{-1}$ ), fósforo ( $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ ), matéria orgânica ( $368,6 \text{ g kg}^{-1}$ ), carbono ( $213,80 \text{ g kg}^{-1}$ ), nitrogênio ( $20,88 \text{ g kg}^{-1}$ ) e sódio ( $0,61 \text{ g kg}^{-1}$ ). No tratamento com hipoclorito de sódio, foram registrados os maiores valores de sódio ( $4,10 \text{ g kg}^{-1}$ ). As épocas de avaliação não influenciaram na concentração de nutrientes e metais pesados. Considerando a resolução CONAMA n. 375/2006, o lodo caleado na proporção de 30% da massa do lodo atende aos parâmetros de coliformes termotolerantes, sendo mais eficiente. Pode-se utilizar o lodo caleado na agricultura desde que atenda aos demais requisitos explícitos na resolução CONAMA n. 375/2006.

**PALAVRAS-CHAVE:** biossólido, micro-organismos, higienização, solarização, tratamento alcalino.

---

<sup>1</sup> Orientador: Prof. Dr. Reginaldo de Camargo – ICIAG/UFU.

ALVES FILHO, AMILTON. **OF SEWAGE SLUDGE ANAEROBIC FOR AGRICULTURAL PURPOSES.** 2014. 68 f. Dissertation (Masters degree in Agronomy/Crop Sciences) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.<sup>1</sup>

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of combination of chemical treatments and solarization on cleaning and chemical and physical composition of sewage sludge — a waste from sewage treatment system — from an upflow anaerobic sludge blanket reactor and UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) of Treatment Plant - ETE Uberabinha located in Uberlândia-MG. It is known that the presence of pathogenic organisms and heavy metals are major limiting the use of this sludge in agriculture. For this, we used the split plots in time, in an experimental design of randomized blocks 5x3 + 1, with four replicates, in four (4) evaluation periods (0, 7, 14 and 21), and the zero time (0) corresponded to additional treatment, totaling 64 plots. The treatments consisted of pure sludge, sludge more peracetic acid (260 mg L<sup>-1</sup>), homogenized with hydrated lime sludge (CaOH<sub>2</sub>) in the proportion of 30% of the dry mass of sludge, sludge with sodium hypochlorite (2500 mg L<sup>-1</sup>) and more quaternary ammonium sludge (2400 mg L<sup>-1</sup>). Treatment with hydrated lime reduced levels of total and thermotolerant at 7 days after mixing with the sludge, meeting the requirements specified in environmental legislation for agricultural use coliforms. A solar radiation alone did not reduce the concentration of fecal coliforms to acceptable limits by environmental standard. Evaluated treatments did not cause temperature differences in the mass of sewage sludge limed sludge showed the highest levels of calcium (302 g kg<sup>-1</sup>), magnesium (4.2 g kg<sup>-1</sup>) and total solids, lower levels of Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, volatile solids and moisture after mixing with sewage sludge. Concentrations of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Cr, Ni and Pb) were below the limits specified in Resolution CONAMA n. 375/2006. The limed sludge showed the highest pH (12.65) lower levels of aluminum (20.10 g kg<sup>-1</sup>), phosphorus (1.6 g kg<sup>-1</sup>), organic matter (368, 6 g kg<sup>-1</sup>), carbon (213.80 g kg<sup>-1</sup>), nitrogen (20.88 g kg<sup>-1</sup>) and sodium (0.61 g kg<sup>-1</sup>). In treatment with sodium hypochlorite, sodium highest values (4.10 g kg<sup>-1</sup>) were recorded. The evaluation periods did not influence the concentration of nutrients and heavy metals. Considering Resolution CONAMA n. 375/2006, limed sludge in the ratio of 30% by weight of silt meets the parameters of fecal coliform, being more efficient. You can use the limed sludge in agriculture provided it meets the other requirements explicit in CONAMA Resolution n. 375/2006.

**KEYWORDS:** biosolids, micro -organisms, hygiene, solarization , alkaline treatment

---

<sup>1</sup>Supervisor: Prof. Dr. Reginaldo de Camargo

## 1 INTRODUÇÃO

O esgoto sanitário, quando gerado e destinado para Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), pode passar por sistemas de tratamentos químicos, físico-químicos e biológicos, até seu descarte, com o intuito de atingir parâmetros determinados pela legislação ambiental brasileira. Após o tratamento, obtém-se uma fase líquida, normalmente lançada em corpos hídricos, e uma parte semissólida, denominada de lodo. O lodo de esgoto, portanto, é um resíduo proveniente do sistema de tratamento de efluentes sanitários e não pode ser descartado no corpo hídrico, pois este, mesmo depois do tratamento nas (ETEs), ainda contém altas concentrações de micro-organismos patogênicos com grande potencial para causar contaminação humana e poluição ambiental. Além disso, possui uma composição química bastante variável, com potencial agronômico, além da presença de substâncias inorgânicas e orgânicas.

Atualmente, o lodo de esgoto tem uma destinação bastante variável, sendo depositado em aterro sanitário, terreno baldio, rio, mar, ou incinerado, mas também possui um destino mais nobre e mais sustentável: a reciclagem agrícola.

Situação semelhante de reciclagem de resíduos ocorre no setor sucroenergético com a torta de filtro, cinzas e vinhaça, que representa uma economia no uso de fertilizantes e agroquímicos na produção de cana-de-açúcar, significando uma forma mais sustentável de disposição desses resíduos.

As normas ambientais vigentes vetam o uso de lodo proveniente de unidades de sistema de tratamento de saúde na agricultura, permitindo apenas o uso do lodo de esgoto de origem humana e industrial.

Após uma completa estabilização e higienização, o lodo de esgoto de origem doméstica, pode fornecer ao solo matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e, em menor quantidade, micronutrientes, contribuindo para a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo.

A matéria orgânica contida nesse resíduo pode aumentar o conteúdo de húmus que melhora a capacidade de armazenamento e de infiltração da água no solo, aumentando a resistência dos agregados e reduzindo a erosão (TSUTIYA et al., 2002).

O crescimento da conscientização ambiental por parte da população brasileira e o advento de políticas públicas voltadas para o saneamento básico favorecerão uma maior geração de lodo de esgoto nas ETEs. Neste sentido, o gerenciamento do lodo de esgoto

na estação de tratamento apresenta-se como uma atividade complexa e de alto custo para as empresas públicas ou privadas de saneamento básico.

Estudos realizados por Andreoli et al. (2001a) demonstram que o lodo representa apenas de 1% a 2 % do volume de esgoto tratado e apresenta um custo entre 20 a 60% do total gasto com a operação de uma ETE.

Para Bettoli e Santos (2006), a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, por permitir o fechamento do ciclo dos nutrientes minerais, é uma das melhores formas de disposição final deste resíduo no mundo. Seu simples acondicionamento em aterro sanitário, aceito atualmente por órgãos integrantes do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), não o elimina nem põe fim ao seu potencial para causar patologias e contaminação ambiental, mas apenas posterga um problema ambiental para um futuro próximo. No entanto o reaproveitamento agrícola do lodo de esgoto exige que as suas características químicas e biológicas garantam a segurança ambiental e sanitária da população. Nesse sentido, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) editou a Resolução CONAMA n. 375, de 29 de agosto de 2006, que disciplina critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. O lodo estabilizado, livre de agentes patogênicos e com níveis de metais pesados dentro dos parâmetros exigidos, pode trazer inúmeros benefícios ao meio ambiente e à agricultura, tornando-se uma forma de disposição mais sustentável do resíduo.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da combinação entre tratamentos químicos e solarização na higienização, composição química e física do lodo de esgoto proveniente de um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Tratamento de efluentes sanitários

O levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) da situação sanitária do país em 2008, sem falsas expectativas promissoras, revelou que o Brasil ainda possui 34,8 milhões de pessoas sem acesso à rede coletora de esgoto. A situação é mais branda na região sudeste, porém esta ainda ostenta o número de 1,2 milhões de pessoas desprovidas de tal serviço.

O advento da Lei Federal n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico — água, esgoto sanitário, resíduos e águas pluviais — e uma universalização na prestação desse segmento de serviço público levou à elaboração do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), cujo objetivo é melhorar a condição sanitária do país (BRASIL, 2007).

O acesso da população ao saneamento básico é condição essencial não apenas para proteger o meio ambiente, mas também para reduzir a quantidade de doenças de origem sanitária na população.

Nos últimos anos, observam-se melhorias em relação à coleta e ao tratamento de esgoto sanitário, conforme aponta a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades (SNIS, 2013), ao revelar que o contingente médio populacional atendido por redes coletoras é de 55,5 % com destaque para a região sudeste, cuja média é de 78,8% e o centro-oeste, de 52%. O tratamento de esgoto gerado atinge uma média nacional de 37,5%, destacando-se a região centro-oeste com 44,0%. Fica evidente que embora o esgoto seja conduzido para as redes coletoras, esse ainda não é totalmente tratado. Assim, espera-se que a quantidade de lodo de esgoto produzida no país aumente nos próximos anos, necessitando, neste caso, de políticas públicas voltadas para a área de saneamento básico, dotando os municípios brasileiros de sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário.

O esgoto sanitário, uma vez coletado, deve ser enviado a uma estação de tratamento antes de ser lançado no corpo receptor. A elevada carga orgânica presente no esgoto, quando lançada no corpo hídrico, pode levar ao consumo do oxigênio dissolvido no corpo receptor, ocasionando um grave problema ambiental. Além disso, os micro-organismos presentes podem contaminar a água e serem causadores de diversas patologias na população humana. Neste aspecto, urge realizar o tratamento dos efluentes

sanitários para um descarte ambientalmente correto da fase líquida e sólida produzida. O tratamento existente nas estações pode incluir as seguintes fases (CASSINI, 2008, VON SPERLING, 2005):

- Tratamento preliminar: nesta etapa, por ação física, removem-se o material grosso e uma parcela das partículas maiores em suspensão no esgoto. O material grosso é retido por grades e as partículas em suspensão são retidas por caixa de areia.
- Tratamento primário: inclui a etapa preliminar e também remove, por ação física, partículas em suspensão no esgoto através da passagem da fase líquida, em baixa velocidade, em um decantador. Neste caso, temos as partículas que se depositam no fundo, constituindo o lodo primário e outros que ascendem à superfície, formando a escuma. O lodo primário é muito próximo do material fecal original e possui um grande potencial de fermentação e acentuado problema de odor, necessitando de processos eficientes de higienização para aproveitamento agrícola.
- Tratamento secundário: é um tratamento biológico e pode atuar sobre o efluente primário, sobre o efluente preliminar ou sobre o esgoto bruto, livre de material grosso. O reator biológico de fluxo ascendente dispensa a utilização de qualquer tipo de decantador e retém o lodo por mais tempo, estabilizando-o.
- Tratamento terciário: nesta etapa, é necessário remover partículas diminutas suspensas e dissolvidas, minerais e orgânicas, para descarte da parte líquida no corpo receptor.

## 2.2 Características do lodo de esgoto

A composição média do esgoto sanitário é de 99,99% de água e de apenas 0,01% de sólidos. Em relação aos sólidos, 70% são constituídos de compostos orgânicos — proteínas, carboidratos e lipídeos — e 30% de compostos inorgânicos — areia, sais e metais (MELO; MARQUES, 2000).

O lodo de esgoto possui nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, mas pode ainda conter vários outros elementos potencialmente tóxicos, como arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio (TABELA 1).

**TABELA 1.** Características químicas do lodo de esgoto, proveniente das Estações de Tratamentos de Barueri (LB), Franca (LF) e Jundiaí (LJ), no Estado de São Paulo.

Atributos <sup>1</sup>	Unidade <sup>2</sup>	LB	LF	LJ
Umidade	%	80	83	76,2
pH	-----	6,4	6,3	5,5
Alumínio	mg kg <sup>-1</sup>	15950	32.564	11.465
Arsênio	mg kg <sup>-1</sup>	< 2,0	< 1	ND
Boro	mg kg <sup>-1</sup>	37,4	40,7	10,1
Cádmio	mg kg <sup>-1</sup>	9,1	3,32	9,2
Cálcio	mg kg <sup>-1</sup>	11,75	40,7	6,6
Chumbo	mg kg <sup>-1</sup>	138	199,6	136,4
Cobre	mg kg <sup>-1</sup>	840	239,8	547
Cromo	mg kg <sup>-1</sup>	773	633,8	97,5
Ferro	mg kg <sup>-1</sup>	27.970	33.793	15.728
Fósforo	g kg <sup>-1</sup>	17,2	16,0	4,5
Magnésio	g kg <sup>-1</sup>	3,02	2,2	1,3
Mercúrio	mg kg <sup>-1</sup>	1,6	< 0,01	ND
Molibdênio	mg kg <sup>-1</sup>	< 15,0	< 0,01	ND
Níquel	mg kg <sup>-1</sup>	3,0	54,7	25,3
Potássio	g kg <sup>-1</sup>	1,6	1,0	0,66
Zinco	mg kg <sup>-1</sup>	1950	1230	839
Nitrogênio total	g kg <sup>-1</sup>	21,0	21,2	21,2
Carbono orgânico	g kg <sup>-1</sup>	248,2	305,1	226

<sup>1</sup>/ Determinados de acordo com EPA SW – 846-3051 (1986). <sup>2</sup>/ Os valores de concentração são dados com base na matéria seca.

Fonte: Adaptado de Berton; Nogueira (2010), Bettoli (2004) e Fernandes et al. (2004)

Os subprodutos sólidos, gerados no sistema de tratamento, podem variar dependendo do tipo de tratamento a que o lodo é submetido; normalmente incluem material gradeado, areia, escuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001). Os resíduos produzidos podem ser encaminhados para o aterro sanitário classe I ou classe II, conforme sua classificação com base na

NBR 10.004 ou reciclados na agricultura, atendendo às características que apresentam. A quantidade média de lodo produzido é variável em função do sistema de tratamento empregado. No caso de reator biólogo de fluxo ascendente, não existe geração de lodo primário e estima-se uma média de 16 g de STS hab<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (AISSE et al., 1999).

Após a sua geração, o lodo de esgoto pode passar pelas seguintes etapas de gerenciamento (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001):

- Adensamento: processo físico de concentração de sólidos no lodo, com o objetivo de reduzir a umidade e, em consequência, o volume, facilitando as etapas sequentes de seu tratamento.
- Estabilização: remoção da matéria orgânica biodegradável, ou seja, a redução de sólidos voláteis, que possuem o inconveniente de causar maus odores e serem foco atrativo de vetores, dificultando o manuseio do lodo.
- Condicionamento: preparação para a desidratação, mediante a adição de produtos químicos normalmente coagulantes e polieletrolitos para melhorar a captura dos sólidos no processo de desidratação.
- Desaguamento: refere-se à redução da umidade do lodo, podendo ser esta feita por métodos naturais, como leitos de secagem ou por meios mecânicos com o uso de centrífugas e filtro-prensa.
- Higienização: os processos de digestão anaeróbica e aeróbica, empregados nos sistemas de tratamentos de efluentes sanitários, não reduzem o nível de patógenos aos níveis aceitáveis pelas normas ambientais, tornando-se elementar a higienização quando o destino é o aproveitamento agrícola. Caso o lodo seja destinado para o aterro sanitário ou para a incineração, não há necessidade de sua higienização.
- Disposição final: destinação final dos subprodutos, podendo incluir uso agrícola, uso não agrícola, incineração e disposição em aterro ou, até mesmo, disposição inadequada em terreno baldio ou rio.

Em síntese, um lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo, além da presença de outros elementos orgânicos e inorgânicos (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

De acordo com Pedroza et al. (2010), estima-se que a produção de lodo de esgoto no Brasil está entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Essa quantidade é relativamente baixa se comparada aos países mais desenvolvidos. Mas

espera-se que ela aumente à medida que novas estações de tratamentos de efluentes sanitários forem construídas pelos gestores públicos.

### **2.3 AGENTES PATOGÊNICOS E INDICADORES BACTERIOLÓGICOS NO LODO DE ESGOTO**

O uso do lodo na agricultura pode expor o homem e os animais aos agentes patogênicos presentes no material, estando inclusos entre estes: vírus, bactérias, cistos de protozoários e ovos de helmintos. No meio externo, geralmente os micro-organismos não sofrem multiplicação, necessitando de um hospedeiro intermediário (SOCCOL et al., 2000).

Os micro-organismos presentes no lodo de esgoto dependem das condições socioeconômicas da população, das condições sanitárias, da região geográfica, da presença de indústrias agroalimentares e do tipo de tratamento a que o lodo foi submetido (SILVA et al., 2001).

### **2.4 Bactérias presentes no lodo de esgoto**

As bactérias presentes no lodo de esgoto são provenientes da flora intestinal humana e animal, do solo, do ar e da água e existem no sistema de tratamento de esgoto das cidades brasileiras (SILVA et al., 2001). A dose de bactérias invectivas presentes no lodo de esgoto é da ordem de  $10^2$  a  $10^6$  e entre as principais patologias que podem provocar no ser humano, estão: febre paratifoide, febre tifoide, salmonelose, disenteria, cólera, leptospirose e gastroenterites (KOWAL, 1985; EPA, 1992).

A transmissão para o homem da maioria das bactérias entéricas ocorre por via oral e fecal e pela ingestão de água ou alimentos contaminados, sendo também possível a inalação de partículas contendo patógeno, o que pode levar a processos infecciosos (SOCOOL et al., 2000). Tais bactérias estão presentes, em grande quantidade, no lodo de esgoto e nas águas residuárias, podendo causar diversas patologias na população humana (TABELA 2).

**TABELA 2.** Bactérias patogênicas de maior preocupação em lodo de esgoto e água resíduária.

Patógenos	Reservatório não humano
<i>Campylobacter jejuni</i>	Animais domésticos, cachorros, gatos e aves
<i>Escherichia coli</i> (cepas patogênicas)	Animais domésticos
<i>Leptospira sp</i>	Mamíferos domésticos e selvagens e ratos
<i>Salmonela paratyphi A,B,C</i>	Mamíferos domésticos e selvagens, pássaros e tartarugas
<i>Salmonela typhi</i>	Mamíferos, aves domésticas e selvagens
<i>Salmonella sp</i>	Animais domésticos e selvagens, pássaros e tartarugas
<i>Shigella sonnei, S.flexneri, S.boydii, S.dysenteriae</i>	Animais domésticos
<i>Vibrio cholerae</i>	Animais domésticos
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Aves domésticas, silvestres e mamíferos
<i>Yersinia tuberculosis</i>	Aves domésticas, silvestres e mamíferos

Fonte: Kowal (1985), EPA (1992).

O lodo de esgoto pode conter uma quantidade expressiva de micro-organismos patogênicos e detectar todos os agentes patogênicos não é uma tarefa fácil, além de ser de elevado custo. Assim, a caracterização do lodo de esgotos e de biossólidos em geral é feita com base em organismos indicadores (SIDHU; TOZE, 2009). Os micro-organismos indicadores devem possuir uma série de características, dentre elas: estarem presentes em grandes quantidades em fezes humanas e de animais de sangue quente, não se multiplicarem fora do hospedeiro, serem detectáveis por métodos laboratoriais simples e rápidos e serem mais resistentes às condições de tratamento e de ambiente do que os micro-organismos patogênicos (DIAS, 2012; CETESB, 2007). Alguns micro-organismos, como os pertencentes ao grupo dos coliformes totais, atendem à maior parte destes requisitos e são utilizados como indicadores de qualidade ambiental (WHO, 2011).

As bactérias são os organismos típicos mais frágeis aos processos de tratamento de lodos e sua incidência é grandemente reduzida pela radiação solar e pela desidratação do lodo de esgoto (BONNET, 2000). As do grupo coliformes totais são conhecidas como bacilos aeróbicos e anaeróbios facultativos, gram negativo, não formadores de esporos, capazes de crescer na presença de concentrações elevadas de sais biliares e

fermentar a lactose na temperatura de 36º C – 37º C, com formação de ácido, gás e aldeído em 24 horas.

Os coliformes termotolerantes são um subconjunto do grupo coliformes totais que podem fermentar a lactose à temperatura de 44,5 º C. O principal representante é *Escherichia coli*, característico da flora intestinal humana e de muitos animais, mas existem outros gêneros, como *Citrobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia* e *Hafnia*, podendo ter origem do ambiente (WHO, 2011). No que se refere à caracterização bacteriológica, a Resolução CONAMA n. 375/2006 exige a análise de coliformes termotolerantes, sendo as bactérias utilizadas como indicador bacteriológico de avaliação da qualidade do lodo para reciclagem agrícola.

Assim, torna-se necessário o estabelecimento de processos de higienização capazes de reduzir o potencial patogênico no lodo de esgoto, a fim de torná-lo apto à utilização na agricultura.

## 2.5 Vírus presentes no lodo de esgoto

Os vírus podem estar presentes em águas residuárias e no lodo de esgoto proveniente dos diferentes tipos de tratamento existentes. Sua concentração é bastante variável, dependem do estado de saúde da população que utiliza o sistema de saneamento básico, do tipo de processamento que o esgoto sanitário sofre na estação de tratamento e do processo de estabilização utilizado no lodo (SILVA et al., 2001).

Divididos em dois grupos, os vírus entéricos podem ser: enterovírus, poliovírus, coxsackievírus, echovírus e um segundo grupo composto por rotavírus colicivirus humanos, astrovírus, adenovírus e vírus da hepatite A e E (SIDHU; TOZE 2009, ADEME, 1998).

Os vírus necessitam de um hospedeiro para se reproduzirem, conforme estudos elaborados por Bonnet et al. (2000); uma exceção é feita pelos reovírus e rotavírus com sorotipos similares em gado e suíno e também no ser humano, causando patologias.

A ingestão por vírus ocorre geralmente por via direta, como a oral, por aspiração ou ingestão de lodo, mas pode também ocorrer por ingestão de água contaminada ou alimentos contaminados com lodo e com a presença dos patógenos. A dose mínima infectante é de 10<sup>2</sup> vírus (SILVA et al., 2001). O sistema de tratamento a que o esgoto humano é submetido influencia na concentração de vírus (TABELA 3).

**TABELA 3.** Vírus em lodo primário, secundário, misto e de lagoa anaeróbia.

Vírus	Lodo primário	Lodo Secundário	Lodo misto	Lodo de lagoa anaeróbia
Entéricos	<sup>A</sup> $1 \times 10^3$	<sup>B</sup> $1 \times 10^2 - 1 \times 10^3$	<sup>B</sup> $1 \times 10^3$	-
Reovírus	-	-	-	<sup>C</sup> $1 \times 10^4 - 1 \times 10^5$
Enterovírus	-	-	-	<sup>C</sup> $1 \times 10^1 - 1 \times 10^2$

<sup>A/</sup> Número por L, <sup>B/UFP=</sup> Unidade Formado de População. L<sup>-1</sup>.<sup>C/NPPUC=</sup> Número mais Provável de Unidade Citoplasmática L<sup>-1</sup>.

Fonte: Adaptado de ADEME (1998)

Os vírus apontados pela norma ambiental brasileira para análise no lodo de esgoto são os entéricos e sua concentração deve ser inferior a 0,25 UFP g<sup>-1</sup> de ST para uso agrícola do resíduo (CONAMA, 375/2006).

## 2.6 Ovos de helmintos e cistos de protozoários no lodo de esgoto

As fezes humanas podem conter uma grande diversidade de agentes patogênicos, destacando-se entre estes os nematódeos, cestoides, trematódeos e protozoários (TABELA 4).

**TABELA 4.** Principais protozoários, helmintos e cestoides encontrados em lodo de esgoto.

Organismos	Patologias
<b>Protozoários</b>	
<i>Cryptosporidium sp</i>	Gastroenterite
<i>Giardia intestinalis</i>	Diarreia
<i>Entamoeba Histolytica</i>	Disenteria
<i>Balantidium coli</i>	Diarreia e Disenteria
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose
<b>Helmintos</b>	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Distúrbios gastrointestinais
<i>Trichuris trichiura</i>	Diarreia e dores abdominais
<i>Toxocora sp</i>	Diarreia e dores abdominais
<b>Cestoides</b>	
<i>Taenia sp</i>	Anorexia, distúrbios e insônia
<i>Hymenolepis sp</i>	Anorexia, distúrbios e insônia

Fonte: Adaptado de ADEME, (1988); Soccol et al. (2000).

Na fase de separação na Estação de Tratamento de Efluentes, os micro-organismos se aderem às partículas sólidas dos sedimentos, aumentando, assim, sua concentração. Esses micro-organismos podem estar presentes em maior concentração, mas alguns podem desnaturar, perdendo sua efetividade (Silva et al., 2001). Os cistos de protozoários são pouco resistentes e os processos de estabilização biológica mostram-se eficientes na sua eliminação (BONNET et al., 2000).

Os vermes de maior interesse sanitário no lodo de esgoto são os nematoides e os cestoides (BONNET et al., 2000). A infecção provocada por estes agentes patogênicos é de grande preocupação mundial. A maior parte dos ovos de helmintos, presente em águas residuárias, é concentrada no lodo de esgoto devido à elevada velocidade de sedimentação (NELSON, 2003). A dose mínima infectiva para ovos de helmintos é de  $10^0$  a  $10^1$  e a de cistos de protozoários varia de  $10^1$  a  $10^2$  (WHO, 1989). Portanto, apenas um único ovo de helminto presente no lodo de esgoto é capaz de infectar o ser humano e causar graves problemas de saúde.

Alguns patógenos não suportam o ambiente edáfico, outros podem permanecer viáveis por vários anos, como os ovos de helmintos (FERREIRA; ANDREOLI, 1999). As bactérias e os protozoários podem ser desativados por temperatura e pH, o que os torna pouco significativos como indicadores de saúde pública. Os ovos de helmintos possuem uma maior capacidade de sobrevivência, tornando o indicador mais importante para a avaliação das condições sanitárias (PINTO et al., 2001). Portanto, os processos de higienização devem ser eficientes no sentido de reduzir a concentração de patógenos até os limites que não causem infecção nos seres humanos e contaminação ambiental, garantindo a segurança no uso do produto para a reciclagem agrícola.

## 2.7 Tempo de sobrevivência de patógenos

Quando o lodo de esgoto é aplicado no solo agrícola, os micro-organismos presentes naquele não dispõem de um ambiente favorável para a sua sobrevivência, pois ficam sujeitos aos efeitos do clima (temperatura, radiação solar e umidade) e ainda sofrem influência de outros organismos presentes no solo. Porém alguns vermes parasitas podem assumir formas de resistências que lhes dão boa capacidade de sobrevivência (ADEME, 1998; ANDREOLI et al., 1999; PINTO et al., 2001).

Os micro-organismos presentes no solo possuem um tempo de sobrevivência maior em relação aos presentes nos tecidos vegetais (TABELA 5). O fato de estarem

não só no solo, mas nas estruturas dos vegetais que servem de alimentos para a população humana e animal faz com que seja proibida a disposição de lodo de esgoto em culturas, cuja parte comestível tenha contato direto com o solo. Os animais que se alimentam de capim adubado com lodo de esgoto podem ser contaminados por patógenos. Neste caso, exige-se um tempo de dois anos de carência para colocar o gado para pastejar em uma área que recebeu adubação com lodo de esgoto (CONAMA, 375/2006). Os ovos de helmintos podem permanecer viáveis por até sete anos no solo, sendo eles o parasita mais difícil de ser eliminado no lodo de esgoto (TABELA 5).

**TABELA 5.** Tempo de sobrevivência de agentes patogênicos no solo e em vegetais

Patógenos	Solo		Plantas	
	Máximo absoluto	Máximo Comum	Máximo Absoluto	Máximo Comum
Bactéria	1 ano	2 meses	6 meses	1 mês
Vírus	6 meses	3 meses	2 meses	1 mês
Protozoários	10 dias	2 dias	5 dias	2 dias
Helmintos	7 anos	2 anos	5 meses	1 mês

Fonte: Adaptado de Kowal (1985)

As quantidades de micro-organismos presentes no esgoto sanitário podem ser bastante variáveis, mas os sistemas de tratamento existentes não eliminam todos os agentes patogênicos aos níveis aceitáveis pelas normas ambientais para uso agrícola (TABELA 6).

**TABELA 6.** Redução de micro-organismos durante digestão anaeróbica de esgoto sanitário

Micro-organismo	Etapas do processo	Média geométrica em NMP
Coliforme total	Lodo misturado <sup>1</sup>	$1,31 \times 10^{10}$
	Líquido decantado <sup>2</sup>	$6,89 \times 10^5$
Coliforme Fecal	Lodo misturado	$1,59 \times 10^9$
	Líquido decantado	$4,44 \times 10^5$

<sup>1/</sup> Organismos. 100 g<sup>-1</sup> de lodo úmido, <sup>2/</sup> Organismo. 100 mL<sup>-1</sup> NMP= Número Mais Provável

Fonte: Adaptado de Clauret et al., 1999

## 2.8 Higienização do lodo de esgoto através de tratamento ácido e alcalino

Entre os diversos agentes capazes de promover a desinfecção do lodo, três fatores se destacam como os mais indicados: a temperatura, o pH e a radiação solar. Esses fatores apresentam faixas, nas quais os organismos se mantêm presentes ou em desenvolvimento no lodo e quando ultrapassadas, os mesmos são eliminados. A intensidade e o tempo em que esses fatores são impostos à massa de lodo de esgoto determinam a eficiência da desinfecção (ANDREOLI et al, 2001).

O processo de higienização do lodo pela via alcalina utiliza a cal virgem ou a cal hidratada, ocasionando a elevação de pH devido à liberação de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). O hidróxido de cálcio é uma base forte, obtida a partir da calcinação do carbonato de cálcio até sua transformação em óxido de cálcio. Com a hidratação do óxido de cálcio, chega-se ao hidróxido de cálcio (ESTRELA et al., 1994).

Yamane (2007) mencionou que o processo de caleagem do lodo de esgoto pode eliminar ou destruir micro-organismos patogênicos, reduzir odores, diminuir valores de nitrogênio resultante da remoção de amônia, aumentar a alcalinidade total, degradar parte da matéria orgânica e fixar metais pesados.

Rocha (2009) afirma que a reação da cal virgem com a umidade presente no lodo aumenta a temperatura deste, podendo auxiliar no processo de higienização. A ação resultante desta reação aumenta a eficiência da higienização, já que as maiores dosagens de cal virgem (35% do peso seco do lodo) propiciam elevação de temperatura do lodo acima de 60  $^{\circ}\text{C}$ , por mais de cinco horas consecutivas. Barros et al. (2006) incorporou cal virgem comum ( $\text{CaO}$ ) na proporção de 30% do peso seco do lodo, com o objetivo de avaliar a sua eficiência na eliminação de coliformes fecais e ovos de helmintos e verificou que houve 100% de destruição desses ovos e inativação de 5,39 e 4,87 unidades logarítmicas de coliformes totais e fecais, respectivamente.

Lodo estabilizado com cal hidratada tende a aumentar seu pH e os teores de cálcio quando aplicado no solo, diminuindo a sua acidez potencial. Lodo estabilizado sem cal tende a acidificar o solo e alterar muito pouco os cátions trocáveis do mesmo (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

A maioria das bactérias patogênicas cresce melhor em condições de pH neutro. Em condições de pH inferior a 2,0 e maior que 10,0, existem poucas bactérias que apresentam crescimento. A elevação do pH, provocada pela adição da cal hidratada,

ocasiona inibição da atividade enzimática e alteração no metabolismo celular das bactérias, possuindo grande efeito antibacteriano (ESTRELA et al., 1994).

A desinfecção de lodos através de ácidos orgânicos, como o peracético, apresenta vantagens potenciais em relação a outros desinfetantes, sendo as principais a falta de efeitos adversos no ambiente receptor e a rápida evolução para uma biodegração inócuia e fácil (BARROS et al., 2006). Estas características são de grande importância para a sustentabilidade do sistema agrícola produtivo, pois minimizam o impacto ambiental de aplicação do biossólido na reciclagem agrícola. Barros et al., 2006, mencionam que os ácidos orgânicos possuem um curto período de processamento, 10 a 30 minutos, para inativação dos agentes patogênicos. Roe et al., (2002) afirmam que os ácidos fracos (peracético) dependem do pH do meio, sendo que vários fatores se combinam para formar o efeito inibidor mais intenso quando o pH extracelular do micro-organismo é ácido. Pérez et al. (2002), ao estudarem o efeito do ácido peracético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) na concentração de  $550 \text{ mg L}^{-1}$ , com um tempo de 10 minutos de contato, concluíram que este possui um alto poder desinfetante ao reduzir o nível de coliforme fecal, *salmonella* e ovos de helmintos aos níveis aceitáveis pela norma mexicana. Barros et al., 2006, avaliaram diferentes concentrações de ácido peracético (230, 460 e  $920 \text{ mg L}^{-1}$ ) e concluíram que todas foram eficientes na inativação dos coliformes fecais, destruindo 99,9% dos micro-organismos rapidamente, em menos de 30 minutos de contato com o lodo de esgoto.

Um dos desinfetantes mais conhecido e utilizado é o cloro, tanto na sua forma líquida como gasosa. Segundo Gonçalves, (2003) ele é o produto mais utilizado em todo o mundo para desinfecção de esgoto sanitário. Em contato com as bactérias presentes no esgoto sanitário, induz uma série de eventos associados à atividade da membrana celular, como alterações da permeabilidade e modifica os ácidos nucleicos, causando mutações (GONÇALVES, 2003).

Estrela et al. (2002) mencionaram que o hipoclorito de sódio é uma base forte, com pH maior que 11 e possui a capacidade de causar inibição enzimática em bactérias patogênicas, provocando a sua inativação.

Lin et al. (2001) utilizaram o hipoclorito de sódio para higienizar lodo proveniente de resíduos hospitalares e verificaram que a eficiência do processo de desinfecção é dependente do tempo de contato entre os micro-organismos e o agente desinfectante, da concentração do hipoclorito de sódio, da temperatura e do pH da mistura.

No processo de desinfecção do esgoto sanitário com o uso do cloro, alguns fatores interferem na eficiência do processo, tais como: presença de sólidos no efluente, pois estes podem proteger os micro-organismos da ação desinfectante; pH do efluente, cujo decréscimo gera o aumento da inativação de micro-organismos, tanto para residuais de cloro livre quanto de cloro combinado; e temperatura, com cujo aumento obtém-se uma maior taxa de inativação dos micro-organismos (AISSE et al., 2003).

Na desinfecção de esgotos com compostos de cloro, a concentração do desinfetante se altera com o tempo e particularmente durante os momentos iniciais da aplicação do cloro, passa por transformações rápidas, desde a forma livre até as formas combinadas. O cloro combinado é resultante da reação com a amônia e produz uma série de compostos chamados de cloraminas, podendo oxidar a amônia em gás nitrogênio. A monocloramina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) e a dicloroamina ( $\text{NHCl}_2$ ), conhecidos por cloro combinado, têm poder desinfectante, inferior ao dos produtos resultantes da dissociação na água, conhecidos como cloro livre (AISSE et al., 2003).

O cloro, ao ser adicionado à água, reage formando ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) que se dissocia em  $\text{OCl}^-$  (íon hipoclorito) e  $\text{H}^+$  (hidrogênio iônico). É preferível o pH baixo, pois o efeito germicida do ácido hipocloroso é maior do que o íon hipoclorito. No entanto a grande desvantagem de subprodutos clorados é a liberação de cloro livre ( $\text{Cl}^-$ ), pois reage com a matéria orgânica, formando os compostos organoclorados, como os thialometanos, que são potencialmente cancerígenos (AISSE et al., 2003).

Barros et al. (2011) higienizaram um lodo de esgoto com 98% de umidade e tempo de contato de 30 minutos mediante o emprego do hipoclorito de sódio na concentração de  $2500 \text{ mg L}^{-1}$ . Após o processo de higienização, obtiveram um biossólido para fins agrícolas. Tal biossólido foi utilizado no cultivo do milho na dose de  $50 \text{ t ha}^{-1}$  e constatou-se elevada presença de sódio (Na),  $1200 \text{ mg kg}^{-1}$ , na parte aérea do milho, devido ao íon de sódio presente no hipoclorito.

O processo de higienização do lodo de esgoto para a reciclagem agrícola não pode elevar os teores das substâncias orgânicas e inorgânicas acima dos limites especificados pela norma ambiental. No entanto quando se refere à caracterização agronômica, o sódio (Na) não é tratado com limites máximos ou mínimos permitidos no lodo de esgoto pela legislação ambiental, mas a sua elevada concentração no biossólido pode gerar sintomas de fitotoxicidade nas plantas, além de causar problemas ambientais.

Os compostos de quaternário de amônio possuem propriedades sanitizantes, sendo empregados na limpeza de câmaras frigoríficas, hospitais e indústria alimentícia.

O quaternário de amônio tem o seu efeito bactericida inibido na presença de matéria orgânica, quando a superfície a ser desinfectada é rica em lipídios e, ainda, quando misturado em água com elevados teores de cátions (DASHNER, 1997).

O efeito antimicrobiano ocorre devido à inativação de enzimas produtoras de energia, desnaturando proteínas essenciais das células e rompendo a membrana celular (KALIL e COSTA, 1994). Os compostos com quaternário de amônio possuem efeito menor sobre bactérias gram-negativas, tais como coliformes e psicotróficos (PINTO, 2006). A menor eficiência nessas bactérias se dá em função da presença da membrana externa de natureza lipoproteica, que age como uma barreira, limitando a entrada de agentes antimicrobianos (MIYAGI et al., 2000).

Oliveira e Silva, 2000, verificaram que compostos contendo quaternário de amônio na concentração de  $400 \text{ mg L}^{-1}$  são mais eficientes do que compostos clorados na dose de  $50,2 \text{ mg L}^{-1}$  na redução de *salmonela enteritidis* e mesófilos totais presentes em cascas de ovos.

## 2.9 Solarização

Um dos meios mais baratos para desaguar e higienizar o lodo é a solarização, principalmente no Brasil onde predomina o clima tropical com altos níveis de insolação durante o ano. Outro aspecto bastante interessante no uso da energia solar é a ausência de contaminantes, pois ela não deixa resíduo quando utilizada na inativação microbiana do lodo de esgoto.

Silva (2007) menciona que o uso da radiação solar na inativação de micro-organismos patogênicos ocorre pela ação conjunta da radiação ultravioleta e infravermelha proveniente do sol. A radiação ultravioleta possui efeito germicida, destruindo compostos proteicos existentes na célula e a infravermelha aumenta a temperatura, provocando a inativação de micro-organismos patogênicos.

A época do ano, a presença de nuvens, a espécie de micro-organismos e o tempo em que os micro-organismos ficam submetidos à insolação são fatores que influenciam no processo de desinfecção com o uso da energia solar.

De acordo com Ghini (2001), a solarização do solo foi desenvolvida pelo Dr. Yaakov Katan, da Universidade de Jerusalém, Israel, em 1976, e vem sendo utilizada em diversos países, como Israel, Estados Unidos, Japão, Itália, Egito, Espanha e Brasil.

No solo, pode-se utilizar um filme plástico transparente com o objetivo de criar um efeito estufa e protegê-lo contra chuvas. A cobertura com um filme plástico transparente promove sua elevação de temperatura pela energia solar. Quanto maior a profundidade, menores temperaturas são atingidas. Outro aspecto é a umidade, pois favorece a condução de calor das camadas superficiais para as mais profundas, além de permitir a germinação das estruturas de resistências dos patógenos, deixando-os mais vulneráveis à ação da temperatura (GHINI, 1997).

Para Tchobanoglous et al. (1993), a temperatura letal para *Escherichia coli* é de 55°C com um tempo de exposição de 60 minutos ou, ainda, uma temperatura maior que 60°C durante 20 minutos.

Bueno (2006) utilizou a técnica da solarização no lodo de esgoto em diferentes profundidades e obteve remoção de 100% de ovos de helmintos e cistos de protozoários na profundidade de 5cm para um tempo de exposição de 15 dias.

Já Cherubini et al. (2002) utilizaram 34,5 Kg de Sólidos Totais (ST) m<sup>-2</sup>, no verão, na região de Curitiba/PR, e verificaram que a solarização será mais eficiente se cargas menores de sólidos por m<sup>2</sup> forem empregadas em leitos de secagem, com consequente redução na altura da camada de lodo a ser higienizada. Além disso, afirmaram que a solarização deve elevar a temperatura da massa do lodo a níveis suficientes para inviabilizar os agentes patogênicos.

Macedo (2004) ensina que ocorre eliminação de agentes patogênicos em água após duas horas de exposição solar direta de 600 W m<sup>-2</sup>.

Dias (2012) avaliou uma estufa para higienização do lodo de esgoto e verificou redução no teor de umidade para níveis inferiores a 20% e 10% em cerca de 45 e 75 dias respectivamente e diminuição nos níveis de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos em aproximadamente 60 e 75 dias dentro dos limites aceitáveis pela Resolução Conama n. 375/2006.

## **2.10 Aspectos normativos do uso agrícola do lodo de esgoto**

A norma americana 40 CFR (Código de Regulamentos Federais n. 40, seção 257,403 e 503), da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (UESPA), 1993, disciplina naquele país o uso agrícola do lodo de esgoto, fixando parâmetros máximos permitidos de substância orgânica, inorgânica e de agentes patogênicos.

A norma americana serviu de referência para outros países disciplinarem o uso agrícola do lodo de esgoto. Nessa perspectiva, o Brasil, influenciado pela norma americana retromencionada, através do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo vinculado ao governo federal e integrante do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), elaborou a Resolução Conama n. 375/2006. A norma brasileira definiu critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgotos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. No que antecede à norma nacional, tem-se pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, a norma P.4230, que disciplinou o uso do lodo de esgoto em solo agrícola. No Estado do Paraná, a Companhia de Saneamento (SANEPAR) elaborou diversos estudos e trabalhos técnicos voltados ao uso agrícola do lodo de esgoto. Assim, a Resolução Conama 375/2006 é uma norma federal e aplica-se a todos os estados brasileiros, mas não impede que cada ente federativo produza a sua própria norma a respeito da disposição de lodo no solo agrícola.

A resolução do CONAMA é mais restritiva em alguns parâmetros do que a norma paulista e americana, em se tratando do uso agrícola do lodo de esgoto (TABELA 7). É importante destacar que os princípios norteadores do direito ambiental impõem ao ente federado a aplicação da norma mais restritiva, respeitando, assim, a divisão de competência legislativa, estabelecida no artigo 24 da Constituição Federal.

Em relação aos parâmetros microbiológicos, a norma aponta que será classificado o lodo como classe A aquele que possuir coliformes termotolerantes  $< 10^3$ , Número Mais Provável  $g^{-1}$  de ST (Sólidos Totais), ovos viáveis de helmintos  $< 0,25$  ovo  $g^{-1}$  de ST e ausência de *Salmonella* em 10 g de ST e vírus entéricos inferiores a 0,25 UFP (Unidade Formadora de Placa)  $g^{-1}$  de Sólidos Totais (TABELA 7). A utilização deste material como bioassólido somente poderá ser feita quando ele for enquadrado na classe A. A referida norma traz uma preocupação especial em relação ao teor de metais pesados e potencial patogênico do material. Assim, torna-se fundamental a caracterização do lodo, ou produto derivado, nos termos da resolução CONAMA e, ainda, o constante monitoramento do solo na área onde o bioassólido é aplicado.

**TABELA 7.** Limites máximos permitidos em lodo de esgoto ou produto derivado

Parâmetro	Brasil - Resolução nº 375/2006	São Paulo- P 4230 CETESB	EUA (40 CFR 503)
Concentração máxima de metais pesados permitida no lodo de esgoto em mg kg <sup>-1</sup>			
Arsênio	41	75	75
Bário	1300	-	-
Cádmio	39	85	85
Chumbo	300	300	840
Cobre	1500	4300	4300
Cromo	1000	-	3000
Mercúrio	17	57	57
Molibdênio	50	75	75
Níquel	420	420	420
Selênio	100	-	100
Zinco	2800	7500	7500
Agentes patogênicos em lodo de esgoto ou produto derivado			
Coliformes	< 10 <sup>3</sup> NMP g <sup>-1</sup> de ST	< 2,0 x 10 <sup>6</sup> NMP g <sup>-1</sup> de ST	< 10 <sup>3</sup> NMP g <sup>-1</sup> de ST
Termotolerantes			
Ovos viáveis de	< 0,25 ovo g <sup>-1</sup> de ST	-	< 1 ovo viável 4 g <sup>-1</sup> ST
Helmintos			
<i>Salmonella</i> sp.	Ausência em 10 g de ST	< 3 NMP 4 g <sup>-1</sup> de ST	< 3 NMP 4 g <sup>-1</sup> de ST
Vírus entéricos	< 0,25 UFP ou UFF / g de ST	-	< 1 NMP 4 g <sup>-1</sup> de ST

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

Fonte: CONAMA (2006); CETESB (1999); USEPA (2002).

Os resíduos sólidos, urbanos ou rurais, se não forem destinados adequadamente, podem trazer graves problemas ambientais e de saúde pública, no entanto é possível viabilizar diferentes tipos de resíduos na agricultura. Neste aspecto, a Resolução Conama nº 375/2006 define os procedimentos para uso do lodo de esgoto na agricultura, fixando parâmetros orgânicos máximos permitidos no solo e no lodo. Contudo, para comercializar qualquer resíduo ou substrato com potencial agrícola no Brasil, é necessário o registro do insumo no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

(MAPA). A Instrução Normativa nº 25, de 23 de Julho de 2009, aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura e atesta que o lodo de esgoto, após passar pelo devido processo de tratamento ou higienização, é classificado como fertilizante orgânico, classe D. Neste caso, a instrução normativa permite a mistura de lodo de esgoto com outros resíduos para a formulação dos fertilizantes (BRASIL, 2009).

A Resolução Conama n. 375/2006 especifica no § 8º do artigo 7º que “para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70”.

A norma ainda é categórica ao afirmar, *ipsis litteris*, que: “Artigo 9º - A aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados no solo agrícola somente poderá ocorrer mediante a existência de Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL)”.

Neste caso, a UGL deverá ser licenciada pelo órgão ambiental competente, assim como as áreas agrícolas que receberão o lodo como insumo agrícola.

O artigo 15 da citada Resolução restringe a aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado:

- I- *Em unidades de conservação, com exceção das áreas de proteção ambiental;*
- II- *Em área de preservação permanente- APP;*
- III- *Em áreas de proteção aos mananciais - APMs, definidas por legislações estaduais e municipais e em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;*
- IV- *No interior da Zona de transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidas na Portaria DNPM nº 231, de 1998.*
- V- *Num raio mínimo de 100 metros de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;*
- VI- *Numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;*
- VII- *Em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:
  - a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação;
  - b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação;*

*c) 18% no caso de aplicação superficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal.*

*VIII- Em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;*

*IX- Em áreas onde a profundidade do nível do aqüífero freático seja inferior a 1,5 metros na cota mais baixa do terreno; e*

*X- Em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes.*

No artigo 12 da norma supracitada, existe uma proibição referente à utilização de lodo de esgoto ou de produto derivado, mesmo que devidamente higienizado, ou, ainda, de trato em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes e culturas inundadas, bem como as demais culturas, cuja parte comestível entre em contato com o solo. Portanto, a utilização do lodo em áreas agrícolas deve ser feita com observação a essas restrições citadas, sob pena de punição administrativa por parte do poder público.

Para caracterização do potencial agronômico do lodo de esgoto, é necessário realizar análises de compostos orgânicos e inorgânicos, tais como: carbono total, fósforo total, nitrogênio, pH em água, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade e sólidos totais e voláteis. Em relação aos metais pesados para a caracterização do lodo, são exigidos os seguintes parâmetros: arsênio total, bário total, cádmio total, chumbo total, cobre total, cromo total, mercúrio total, molibdênio total, níquel total, selênio total e zinco total.

Neste contexto, os processos de higienização do lodo devem possibilitar o seu uso de forma segura como fertilizante agrícola, descaracterizando seu papel de agente veiculador de doenças e de contaminante ambiental. Com esta prática espera-se que não seja criado um passivo ambiental, mas que ocorra sua reciclagem de forma correta na agricultura.

## **2.11 Uso agrícola do lodo de esgoto**

A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola não pode ser compreendida como uma forma do poder público, ou das empresas privadas, se livrar do problema do resíduo, depositando ou utilizando-o no solo de forma inadequada.

O uso agrícola do lodo de esgoto deve considerar as características do solo de forma a orientar o cálculo de doses, visando à reciclagem dos nutrientes e da matéria

orgânica no solo, como alternativa de fertilização de culturas (BITTENCOURT et al., 2010).

Em culturas de *Eucalyptus*, já instaladas, o lodo pode ser aplicado na forma líquida, geralmente em subsuperfície, para evitar as perdas de nitrogênio por volatização. O lodo centrifugado ou compostado é passível de ser usado em culturas perenes como as de citros, café e bananeira, enquanto o lodo seco e granulado pode ser administrado em culturas como a de cana-de-açúcar, milho, girassol e feijão por meio de adubadoras convencionais (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

O lodo de esgoto possui todos os nutrientes essenciais e benéficos para os vegetais, além de promover o aumento da população microbiana do solo, provocando mudanças nas suas propriedades bioquímicas (MELO; MARQUES, 2000).

Sampaio et al. (2012) estudaram a adição de lodo de esgoto nas melhorias das características físicas de um solo degradado (Neossolo Quartezarênico) e observaram que a aplicação de 15 a 20 t ha<sup>-1</sup> de esgoto no solo proporciona a formação de agregados até 12 meses após a aplicação. Além disso, teve sua porosidade aumentada em 20 t ha<sup>-1</sup> aos seis meses após a aplicação, enquanto, aos 12 meses, apenas sua microporosidade sofreu aumento.

Com relação às propriedades físicas, a incorporação do lodo tende a aumentar tanto o diâmetro quanto a quantidade dos agregados estáveis em água, diminuindo a densidade e aumentando a capacidade de retenção de água do solo (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

Lima et al. (2008) estudaram lodo de esgoto digerido anaerobicamente, condicionado com cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e cloreto férrico, suplementado com K e P, sendo aplicado durante cinco anos entre as linhas de plantio, a lanço e em cobertura no cultivo de *Eucalyptus grandis*. Na dose de 10 t ha<sup>-1</sup> (massa seca), produziu a mesma quantidade de matéria seca epígea que as plantas adubadas com fertilizante mineral e aumentou os estoques de C e N na biomassa aérea das plantas.

Oliveira (2000) relatou que o lodo de esgoto pode substituir totalmente a adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar e de 30% a 35% do fósforo no plantio de cana. A aplicação do lodo de esgoto puro ou complementado com adubos minerais apresenta grande potencial para a cultura da cana-de-açúcar, pois não é de consumo imediato pela população humana e as lavouras podem ser mecanizadas, diminuindo o contato direto com o resíduo.

Franco et al. (2010) verificaram que a aplicação de lodo de esgoto no plantio da cana-de-açúcar, combinado ou não com adubo mineral nitrogenado e/ou fosfatado, aumentou a produtividade de colmos de 84 a 118 t ha<sup>-1</sup> e não alterou a qualidade tecnológica da planta; em relação à adubação convencional, produziu 91 t ha<sup>-1</sup> de colmo.

Melo et al. (2007) observaram que o lodo de esgoto na dose de 67,6 t ha<sup>-1</sup> (base seca), como fertilizante para a cultura do milho, proporcionou maiores produtividades (8,6 t ha<sup>-1</sup>), enquanto as apresentadas por adubos minerais foram de 5,6 t ha<sup>-1</sup>.

Lemainski et al. (2006) aplicaram lodo de esgoto da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) na cultura do milho e concluíram que o bioassólido foi, em média, 21% mais eficiente do que o fertilizante mineral, com produtividade média de dois cultivos acima de 6,50 t ha<sup>-1</sup> nas doses de 30 e 45 t ha<sup>-1</sup> de lodo úmido.

Bovi et al. (2007) avaliaram diferentes doses de lodo de esgoto (0,5,10,20,25,30 e 35 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) na produção da pupunheira e verificaram efeito linear na produtividade de palmito com o aumento da dose de lodo.

Berton e Nogueira (2010) mencionaram que o lodo de esgoto é desbalanceado para alguns nutrientes, principalmente em relação ao potássio e ao boro. Torna-se necessário o balanceamento de nutrientes de acordo com a exigência da cultura, o qual pode ocorrer durante o processo de secagem ou de granulação do lodo para fins agrícolas. Assim, chega-se a um material mais equilibrado para a adubação mineral de plantas.

O lodo de esgoto, devidamente tratado para uso agrícola, é capaz de proporcionar benefícios agronômicos. Além disso, a sua disposição no solo agrícola, conforme determinam as normas ambientais brasileiras, pode representar vantagens sociais com menor impacto negativo à saúde pública e ao meio ambiente.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local do experimento**

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental do Glória, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizada nas coordenadas geográficas 18° 57' 30" S, 48° 12' 0" W, ao lado de uma estação climatológica. A pesquisa teve início no dia 07 de agosto de 2013 e finalizou-se em 27 de agosto de 2013, perfazendo 21 dias de duração. O clima da região é do tipo Aw de acordo com a classificação climática de Koppen, apresentando dois períodos distintos, o inverno seco, ameno e com baixa intensidade de chuvas e o verão quente e chuvoso (MENDES, 2001).

#### **3.2 Lodo de esgoto utilizado no experimento**

O lodo de esgoto utilizado no experimento é proveniente da unidade ETE - Uberabinha, sendo esta a principal estação de tratamento de efluentes sanitários da cidade de Uberlândia/MG, responsável pelo esgoto sanitário de 95% da população uberlandense. A estação é composta inicialmente por um sistema de gradeamento e de desarenagem (tratamento primário ou preliminar), seguido por um conjunto de reatores anaeróbios do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), sistemas com polimento físico-químico, centrífugas e sistemas geotêxteis, destinados às etapas de desaguamento do lodo de esgoto. A gestão da ETE - Uberabinha compete ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), autarquia vinculada à Prefeitura Municipal de Uberlândia/MG. De acordo com Silva (2011), é estimada uma produção mensal de 264,23 toneladas de lodo de esgoto na referida estação, sendo este destinado, em sua totalidade, para o aterro sanitário da cidade de Uberlândia-MG.

O material em referência foi extraído de um reator anaeróbio, após passar por um processo de desaguamento, mediante a adição de polímeros catiônicos (Cloreto férrico) e centrifugação até atingir um teor de umidade de 71,21% e uma massa seca de 28,79%, sendo coletado na saída da rosca transportadora.

Em seguida, a quantidade de lodo necessária para a execução do experimento foi acondicionada em tambores plásticos e transportada para a Fazenda Experimental do Glória.

### 3.3 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 5 x 3 + 1, com 4 repetições. Os tratamentos consistiram em lodo de esgoto anaeróbio puro e lodo misturado com 04 produtos higienizadores (TABELA 8). O monitoramento foi realizado em quatro épocas distintas de avaliação (0,7, 14 e 21 dias), sendo que a época zero (0) correspondia ao tratamento adicional, totalizando 64 subparcelas.

**TABELA 8.** Tratamentos utilizados no processo de higienização do lodo e suas respectivas concentrações

Tratamentos	Concentração do Produto Químico
Lodo + ácido peracético	T1 260 mg L <sup>-1</sup>
Lodo + quaternário de amônio <sup>1</sup>	T2 2400 mg L <sup>-1</sup>
Lodo + cal hidratada	T3 30 % da massa seca do lodo
Lodo + hipoclorito de sódio	T4 2500 mg L <sup>-1</sup>
Lodo puro sem produto químico	T5 -

<sup>1</sup>Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetilbenzil amônio, álcool e água

A concentração dos produtos higienizadores utilizados no experimento foi estimada em estudos realizados por Barros et al. (2006, 2011); González et al. (2002); Barrios, et al. (2002) e Andreoli et al. (2001).

Na TABELA 9, são apresentados a pureza, o pH, o aspecto físico e a densidade de três produtos químicos avaliados no processo de desinfecção do lodo de esgoto.

**TABELA 9.** Densidade, pureza, pH e estado físico dos produtos químicos utilizados<sup>1</sup>.

Produto	Pureza	Densidade	pH	Aspecto físico
Ácido peracético	15 %	1,1374 g cm <sup>-3</sup>	< 2,0	Líquido
Hipoclorito de sódio	12%	1,1824 g cm <sup>-3</sup>	11,0 – 13,0	Líquido
Quaternário de amônio <sup>2</sup>	14%	0,9816 g cm <sup>-3</sup>	5,5 – 7,5	Líquido

<sup>1/</sup> Análises disponibilizadas pelo fabricante Start Química; <sup>2/</sup>Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetilbenzil amônio e água.

A cal hidratada, empregada no processo de higienização do lodo de esgoto, foi misturada na proporção de 30% da massa seca deste. De acordo com Novais et al., 2007, a cal utilizada pode ser classificada como sendo um corretivo de solo, calcário calcítico do grupo D com Poder Reativo de Neutralização Total (PRNT) acima de 90% (TABELA 10).

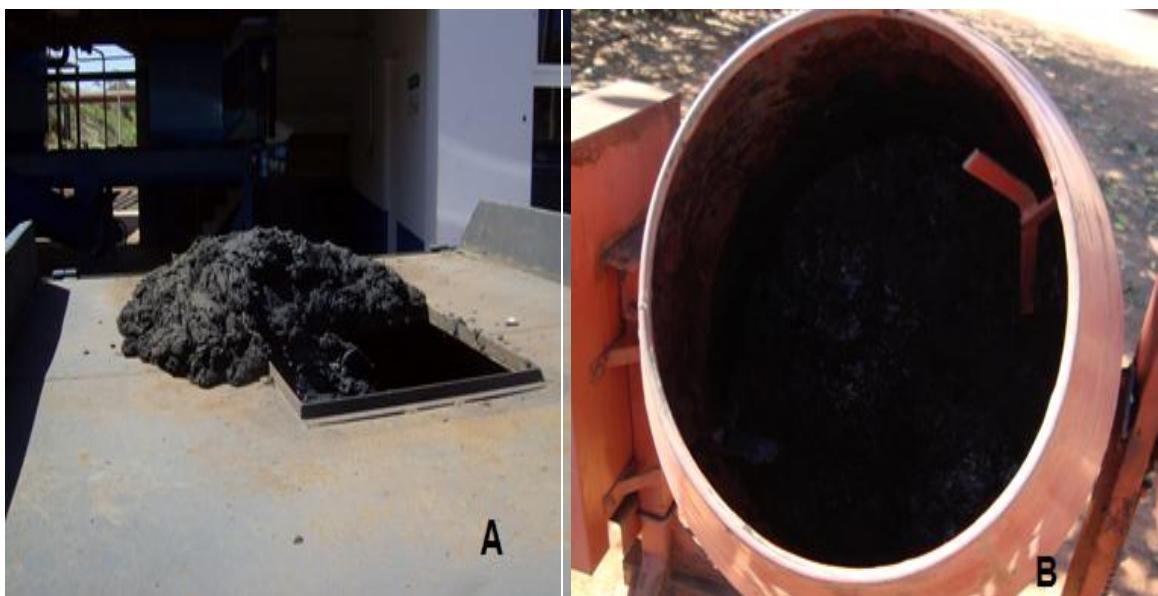
**TABELA 10.** Característica da cal hidratada utilizada na caleação do lodo de esgoto<sup>1</sup>.

Produto	CaO	CaCO <sub>3</sub>	MgO	MgCO <sub>3</sub>	PN	ER	PRNT
Cal Hidratada	79,9 %	142,2%	1,8 %	3,8 %	153,8	99,0	152,2

<sup>1/</sup> Análises realizadas no LABAS- ICIAG-UFU, PN=Poder de Neutralização, ER= Eficiência Relativa e PRNT= Poder Reativo de Neutralização Total.

As parcelas experimentais foram constituídas por caixas metálicas de zinco com dimensões de 0,30 x 0,23 x 1,0 metros, encaixadas em um suporte, com a finalidade de eliminar ao máximo as interferências provenientes do solo, tais como umidade e temperatura.

Individualmente, cada tratamento químico com ácido peracético, hipoclorito de sódio, compostos de quaternário de amônio e cal hidratada, além do lodo puro, foi misturado em uma betoneira (FIGURA 1 A e B) durante 3 minutos. Ao passar de um tratamento para outro, a betoneira foi lavada com água corrente para eliminar qualquer tipo de resíduo do tratamento anterior.



**FIGURA 1.** Coleta do lodo na Estação de Tratamento ETE- Uberabinha (A). Betoneira utilizada na mistura do lodo de esgoto com os produtos higienizadores (B).

### 3.4 Registros de temperatura

Em cada caixa metálica, que correspondia à unidade experimental (parcela), foram acondicionados aproximadamente 30,0 kg da mistura, contendo lodo de esgoto e material higienizante, incluindo o tratamento correspondente apenas ao lodo puro. No interior de cada caixa, a espessura da camada de lodo foi de 10,0 cm, com distância de 13,0 cm entre a superfície do lodo e a tampa de vidro que a recobriu. Na profundidade de 5,0 cm na massa do lodo e a 40 cm da lateral da caixa, foram instalados individualmente, em cada caixa, termopares para determinação da temperatura. Os dados foram armazenados em um *datalogger*, modelo CR 1000 (Campbell Scientific®),

calibrado para registro da temperatura diária em intervalos de 30 minutos durante todo o período experimental (Figura 2A).

As caixas com os meios higienizadores foram dispostas no sentido do norte magnético, com o intuito de inibir a formação de sombras e captar a maior radiação solar disponível. Em cada bloco, composto por cinco caixas, foi colocado vidro transparente com espessura de 5,0 mm, com a finalidade de formar um efeito estufa dentro de cada parcela e evitar a entrada de umidade do meio externo, como a ocorrência de chuvas (FIGURA 2B). Foi utilizada uma fita flexível entre o vidro e as caixas para impedir a entrada de ar e de umidade do meio externo.



**FIGURA 2.** Coleta de dados do *datalogger* (A). Parcelas com lodo de esgoto e tampa de vidro transparente (B).

Durante o período de avaliação, os resultados referentes à temperatura média ambiente e radiação solar foram coletados em uma estação climatológica vicinal ao experimento.

### 3.5 Coletas de amostras para análises laboratoriais

Amostras foram coletadas no momento da instalação (tempo zero) e aos 7,14 e 21 dias após o início do experimento. Em cada época, foram retiradas 20 amostras para análises microbiológicas e físico-químicas. Iniciaram-se as amostragens no dia 07/08/2013, e no dia 27/08/2013, foram encerradas, sendo que a coleta operou-se através de espátula autoclavada para cada amostra. Dentro de cada parcela, foram coletadas 4 sub-amostras em pontos distintos desde a superfície do lodo até o fundo da

caixa. Em seguida, foram acondicionadas em um saco plástico limpo e, após a mistura, retirou-se 70,0g do lodo com um coletor autoclavado para análise microbiológica e 200,0g para as análises físico-químicas. As amostras destinadas às análises microbiológicas foram acomodadas em caixas de isopor com gelo à temperatura de 4°C e enviadas, imediatamente após a coleta, para os testes microbiológicos. No laboratório, todas as amostras foram mantidas à temperatura de 4°C, sendo processadas em até 24 horas.

### **3.6 Análises laboratoriais**

Antes de se iniciar o experimento, foram coletadas quatro amostras do lodo de esgoto proveniente do reator anaeróbio para análises de coliformes totais, coliformes termotolerantes, *salmonella*, ovos viáveis de helmintos e cistos de protozoários. As análises laboratoriais não revelaram a ocorrência de *Salmonella*, ovos de helmintos e cistos de protozoários no material fornecido pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto-DMAE (TABELA 11).

Dessa forma, as análises microbiológicas do experimento em tela foram realizadas para coliformes totais e termotolerantes, utilizando-se a técnica de tubos múltiplos, recomendada pela United States Environmental Protection Agency para lodos (USEPA, 2006). As análises de *salmonella* foram desenvolvidas conforme CETESB (1993) e as de ovos viáveis de helmintos, de acordo com a metodologia descrita em USEPA (1992).

As análises químicas, físicas e de coliformes totais e termotolerantes foram aferidas nos períodos de 0, 7, 14 e 21 dias durante a fase experimental. As análises bacteriológicas foram realizadas no Laboratório de Microbiologia Ambiental da Universidade Federal de Uberlândia, enquanto as de *salmonella*, de ovos viáveis de helmintos e de cistos de protozoários no laboratório privado, denominado “Araxá Ambiental”, acreditado junto ao Inmetro e cadastrado na rede metrológica do estado de Minas Gerais para análises ambientais. As análises químicas e físicas para diagnosticar no lodo os teores totais — fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, zinco, sódio, alumínio, ferro, carbono, matéria orgânica, sólidos voláteis, sólidos totais, umidade e pH — foram efetivadas no Laboratório de Análise de Solo (LABAS) do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). As

análises dos valores totais de metais pesados: cádmio, cromo, níquel e chumbo foram feitas no Laboratório Brasileiro de Análise Agrícola, Monte Carmelo-MG.

**TABELA 11.** Características do lodo de esgoto anaeróbio da Estação de Tratamento ETE- Uberabinha – Uberlândia-MG

Análise microbiológica	Resultados	Unidades	Metodologia
Coliformes totais	$3,53 \times 10^8$	NMP g <sup>-1</sup> ST	USEPA, 2006
Coliformes Termotolerantes	$2,87 \times 10^7$	NMP g <sup>-1</sup> ST	USEPA, 2006
<i>Salmonella</i>	Ausência	-	CETESB, 1993
Ovos de Helmintos	Ausência	-	USEPA, 1992
Análises química e física <sup>1</sup>			
pH em CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup>	8,62	-	EMBRAPA 2009
Nitrogênio – N	30,01	g kg <sup>-1</sup>	RAIJ et al 2001
Sódio – Na	0,75	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Alumínio – Al	39,34	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Fósforo – P	9,60	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Cálcio – Ca	17,30	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Magnésio- Mg	2,60	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Enxofre – S	9,70	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Manganês – Mn	121	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Ferro – Fe	11,99	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Potássio – K	1,0	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Matéria Orgânica – MO	573,91	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Carbono Orgânico – CO	332,89	g kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Cromo- Cr	166,72	mg kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Níquel- Ni	31,93	mg kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Cádmio – Cd	0,94	mg kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Chumbo - Pb	ND	mg kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Cobre – Cu	211	mg kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Zinco – Zn	1500	mg kg <sup>-1</sup>	EMBRAPA 2009
Umidade a 105 °C	71,21	%	EMBRAPA, 2009
Massa Seca a 105°C	28,79	%	EMBRAPA 2009
Relação C/N- total	9,91	-	-

NMP: Número Mais Provável; MS – Massa Seca; ND- Não Detectado; <sup>1</sup>/Análises realizadas no LABAS – ICIAG –UFU e LABRAS – Monte Carmelo/MG. Resíduos: Gravimétricos. <sup>2</sup>/N – [N total]= Digestão Sulfúrica <sup>3</sup>/Digestão Nitro-perclórico = P, K,Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Na, Cr, Ni, Cd, Pb, Al, Ca, Mg e Fe. <sup>4</sup>/Determinado por ICP/OES= Espectrômetro de Plasma Simultâneo (Cr, Ni, Cd, Pb), espectrometria de absorção atômica (Cu, Mn, Zn e Fe) e espectrometria de chama (K, Ca, Mg).

As amostras de lodo de esgoto foram submetidas à digestão nitro-perclórica. Nos extratos, foram determinados os teores totais de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Na, Ni, Cd, Pb, Al, Mg e Fe, por meio de espectrofotometria de absorção atômica com chama ar/acetileno e por meio de espectrômetro de plasma simultâneo - ICP/OES, de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA, 2009. Na determinação do nitrogênio total, foi realizada a digestão sulfúrica (método Kjedahl), conforme

metodologia descrita por RAIJ et al. (2001). A determinação dos valores de pH em solução de 0,010 mol L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub>, umidade a 105° C, sólidos voláteis e sólidos totais foi conseguida de acordo com a EMBRAPA, 2009. O método para determinação do carbono orgânico baseia-se na oxidação da matéria orgânica, com solução de 0,17 mol L<sup>-1</sup> de dicromato de potássio, e titulação do excesso de dicromato, com solução de sulfato ferroso amoniacial 0,5 mol L<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2009).

### **3.7 Análise estatística dos dados**

Para a análise de variância, os valores obtidos para coliformes totais e termotolerantes foram transformados em Log (x+ 10). Os valores relativos às análises físico-químicas e de temperatura não sofreram transformações.

As análises de variâncias dos dados encontrados foram desenvolvidas no programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2008) e ASSISTAT (SILVA, 2002) e, quando significativo, as médias para o fator tratamento foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, considerando-se 5% de significância. Para o fator época, aplicou-se o teste de Tukey, a 5% de significância. As médias ainda foram comparadas ao tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão abordados, inicialmente, os resultados bacteriológicos e, em seguida, as características físico-químicas frente à homogeneização de produtos higienizadores com diferentes concentrações em lodo de esgoto anaeróbio: ácido peracético ( $260\text{ mg L}^{-1}$ ), cal hidratada (30% da massa seca do lodo), quaternário de amônio ( $2400\text{ mg L}^{-1}$ ), hipoclorito de sódio ( $2500\text{ mg L}^{-1}$ ) e lodo puro em diferentes épocas de avaliação.

O resumo da análise estatística dos dados relativos aos parâmetros agronômicos serão apresentados no apêndice A.

### 4.1 Parâmetros Microbiológicos: coliformes totais e termotolerantes

Os valores encontrados de coliformes totais e termotolerantes foram submetidos à análise de variância (TABELA 12) e verificou-se que existiram diferenças significativas pelo teste F entre os diferentes produtos higienizadores e entre as épocas de observação. Constatou-se, também, interação significativa entre o fator principal e o secundário. Quando o tratamento controle (Testemunha) foi comparado com os tratamentos principais e secundários, verificaram-se diferenças consideráveis pelo teste F.

**TABELA 12.** Análise de variância de coliformes totais e termotolerantes no período de amostragem entre 07/08/2013 e 27/08/2013

Fonte de Variação <sup>1</sup>	Graus de liberdade		Quadrado médio	
	Total e termotolerante	Total	Termotolerante	
Tratamento (T)	4	48,74620 *	28,46860*	
Bloco	3	0,8448 <sup>NS</sup>	0,323189 <sup>NS</sup>	
Resíduo (a)	12	0,5847	0,167492	
Época (E)	2	12,292974 *	11,07884*	
Tratamento x Época	8	1,0101 *	0,96998*	
Resíduo (b)	30	0,306519	0,324041	
Fator. x adicional	1	59,76245*	53,38032*	
C.V (I)		16,78 %	11,08 %	
C.V (II)		12,15%	15,41%	

\* Significativo a 5% e pelo teste de F, respectivamente. <sup>NS</sup> Não Significativo C.V- Coeficiente de Variação.

<sup>1</sup>Para análise de variância, os valores foram transformados em Log ( $x + 10$ ); para se obter o valor original, basta calcular o (antilogaritmo – 10).

Nas TABELAS 13 e 14, encontram-se os valores médios da interação entre o fator principal (produtos higienizantes) e o fator secundário (épocas) e observa-se que as concentrações médias de coliformes totais e termotolerantes no lodo de esgoto, antes dos tratamentos, foram de  $3,53 \times 10^8\text{ NMP g}^{-1}$  de ST e  $2,87 \times 10^7\text{ NMP g}^{-1}$  de ST,

respectivamente, valores estes dentro da faixa estabelecida por Soares et al., (1992). Os referidos estudos mencionaram que a concentração de coliformes totais e termotolerantes em lodo de esgoto e biossólidos podem variar de  $1,9 \times 10^8$  NMP g<sup>-1</sup> de ST a  $1,1 \times 10^{10}$  NMP g<sup>-1</sup> e para coliformes termotolerantes, na faixa de  $9,3 \times 10^6$  a  $1,7 \times 10^9$  NMP g<sup>-1</sup>.

**TABELA 13** – Coliformes totais em Número Mais Provável (NMP) g<sup>-1</sup> de Sólidos Totais (ST), do lodo de esgoto, submetidos a diferentes produtos higienizadores em função das épocas de avaliação

Tratamentos	Épocas em dias			
	0	7	14	21
Testemunha	$3,53 \times 10^8$ *			
Ácido Peracético		$*1,04 \times 10^6$ Bb	$*1,28 \times 10^5$ Bb	$*8,50 \times 10^3$ Ab
Quaternário de amônio		$*5,01 \times 10^6$ Bc	$*6,16 \times 10^5$ Bb	$*2,04 \times 10^4$ Ab
Cal Hidratada		$*0,71$ Aa	$*0,23$ Aa	$*0,23$ Aa
Hipoclorito de Sódio		$*3,54 \times 10^5$ Bb	$*3,23 \times 10^5$ Bb	$*1,86 \times 10^4$ Ab
Lodo Puro		$*4,4 \times 10^6$ Bc	$*3,31 \times 10^6$ Bc	$*7,24 \times 10^5$ Ab

Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na linha (Tukey) não diferem entre si a 5 % de significância.

**TABELA 14.** Coliformes termotolerantes em (NMP) g<sup>-1</sup> ST, em função de sua submissão a diferentes produtos higienizadores e da época de avaliação.

Tratamentos	Épocas em dias			
	0	7	14	21
Testemunha	$2,87 \times 10^7$ *			
Ácido Peracético		$*1,02 \times 10^5$ Bb	$*1,86 \times 10^4$ Bb	$*8,50 \times 10^3$ Ab
Quaternário de amônio		$*4,26 \times 10^5$ Bc	$*1,41 \times 10^4$ Ab	$*2,04 \times 10^4$ Ab
Cal Hidratada		$*0,71$ Aa	$*0,23$ Aa	$*0,23$ Aa
Hipoclorito de Sódio		$*2,1 \times 10^5$ Bb	$*2,00 \times 10^5$ ABb	$*1,5 \times 10^4$ Ab
Lodo Puro		$*7,07 \times 10^5$ Bc	$*1,38 \times 10^5$ Bc	$*6,15 \times 10^4$ Ab

Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na linha (Tukey) não diferem entre si a 5% de significância.

O tratamento que reduziu o nível de coliformes totais e termotolerantes até os valores aceitáveis pela Resolução CONAMA n. 375/2006, ditado em  $10^3$  NMP g<sup>-1</sup> de coliformes termotolerantes, foi a cal hidratada aos sete dias após a mistura com o lodo de esgoto (TABELA 13 e 14). Em sete dias de tratamento, a cal hidratada, devido à elevação do pH (12,65) e à produção de NH<sub>3</sub>, inativou os coliformes totais e termotolerantes. Não foi observada diferença na redução de coliformes totais e termotolerantes no tratamento com cal hidratada aos quatorze e vinte e um dias,

indicando que o lodo caleado aos sete dias após a mistura reduz o nível de coliformes aos limites aceitáveis pela legislação ambiental brasileira. Resultados semelhantes foram encontrados por Barros et al. (2006) ao utilizar a cal virgem na proporção de 30% da massa seca do lodo, reduzindo a concentração de agentes parasitológicas abaixo dos limites definidos pela Instrução Normativa do Instituto Ambiental do Paraná. Pinto (2001) mencionou que para se obter um lodo sanitariamente seguro, deve-se elevar o pH deste para valores superiores a 12 por, no mínimo, 72 horas.

Mendez (2003) e Barros et al. (2006) afirmaram que a estabilização alcalina do lodo de esgoto possui a capacidade de elevar o pH e produzir NH<sub>3</sub>. Berton e Nogueira (2010) relataram que lodos estabilizados ou higienizados com cal hidratada possuem pH mais elevado e menos nitrogênio por causa das perdas por volatilização da amônia NH<sub>3</sub>.

Para Barros et al. (2006), a cal provoca, ainda, uma alteração na concentração de sais do lodo, ocasionando aumento da pressão osmótica, o que dificulta a absorção de água e contribui para a morte de estruturas de resistência.

Os sais de quaternário de amônio não apresentaram eficiência na redução de coliformes totais e termotolerantes. Os valores aferidos não atingiram o padrão estabelecido pela norma ambiental brasileira para coliformes termotolerantes. Resultados semelhantes são relatados por Dashner (1997) e Pinto (2006), destacando que os compostos de quaternário de amônio não apresentam eficiência na redução de micro-organismos em condições de elevada presença de matéria orgânica e de meios com altos teores de sais e, ainda, por possuírem baixo efeito inibidor em bactérias gram-negativas, como as pertencentes ao grupo dos coliformes totais e termotolerantes.

O hipoclorito de sódio, na concentração de 2.500 mg L<sup>-1</sup>, não reduziu o número de coliformes totais e termotolerantes aos valores preconizados pela resolução CONAMA nº 375/2006, devido, principalmente, à eminente quantidade de sólidos no lodo de esgoto, ao ressaltado teor de matéria orgânica e ao pH inicial do lodo alcalino. Aisse et al. (2003) salientaram que a alta presença de sólidos pode proteger os micro-organismos da ação desinfetante e em condições de pH elevado, o efeito germicida do cloro é diminuído.

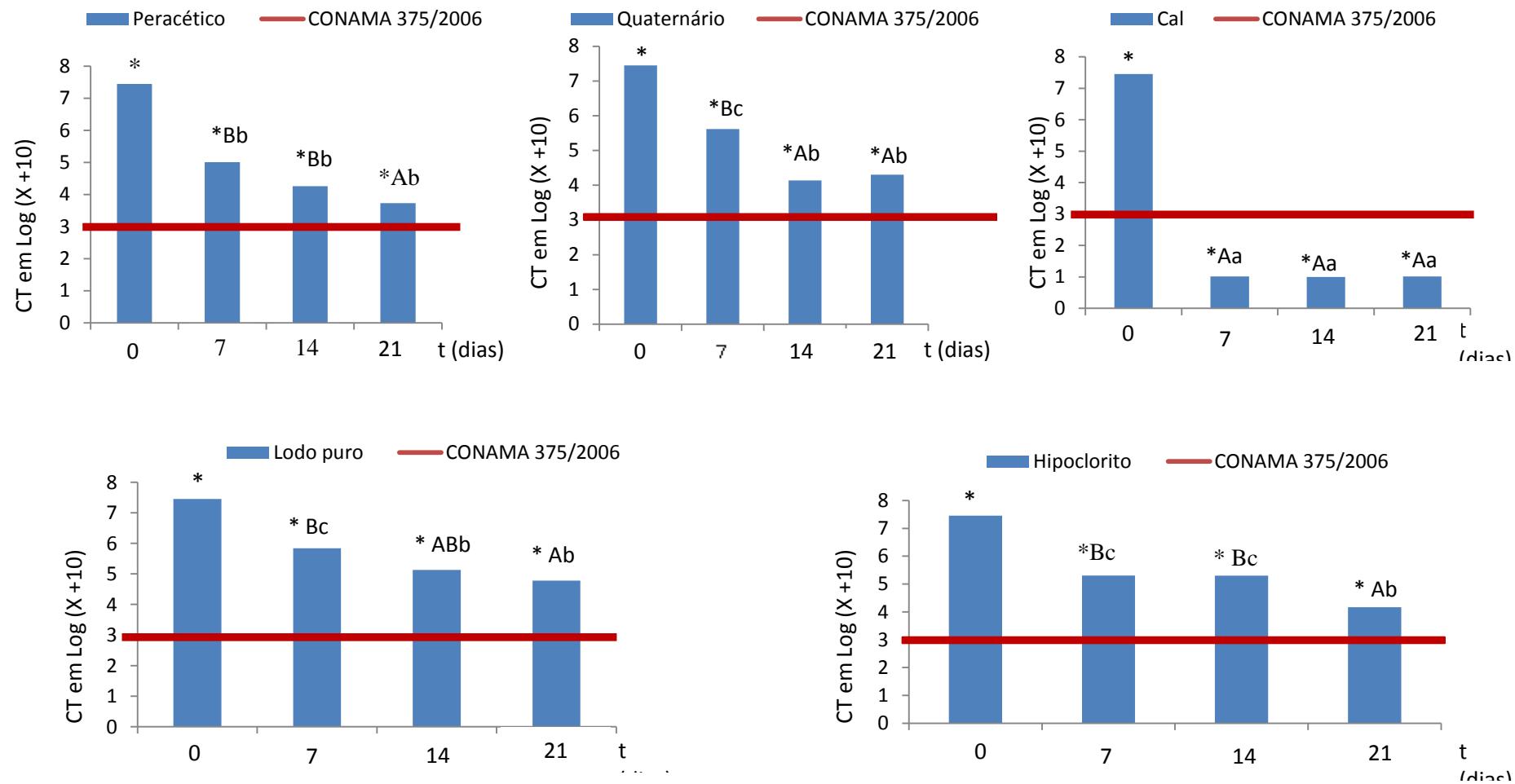
O ácido peracético não reduziu o nível de coliformes termotolerantes até os limites estabelecidos pela norma ambiental brasileira. A aplicação de ácidos orgânicos, como o peracético, no processo de higienização do lodo de esgoto, normalmente é feita no lodo líquido com altos teores de umidade e possui um grande poder de inativação de

micro-organismos, necessitando apenas de 10 minutos para uma completa redução (BARROS et al., 2006).

A ação dos ácidos orgânicos como produto higienizador é influenciada pela capacidade de tamponamento do meio, pela presença de compostos orgânicos, pela concentração do ácido utilizado, pelo valor de pH e pela temperatura, pois estes interferem na concentração do ácido não dissociado no meio (CHERRINGTON et al., 1991). No caso presente, o ácido foi misturado ao lodo semi-pastoso, com 71,21% de umidade e pH alcalino de 8,62, o que resultou em uma baixa eficiência na redução de coliformes termotolerantes e totais. O ácido peracético possui uma maior eficiência na inativação de micro-organismos quando o pH do lodo é ácido e em condições de elevada umidade no mesmo (BARRIOS et al., 2002; GONZÁLES et al., 2002).

O lodo sem a adição de produtos higienizadores apresentou queda nos níveis de coliformes totais e termotolerantes aos sete, quatorze e vinte e um dias de avaliação, mas não atingiu os limites determinados na Resolução CONAMA n. 375/2006. Rocha (2009) mencionou que o decaimento da concentração de coliformes em lodo de esgoto sem a adição de meios higienizadores é lento e demanda um tempo de 120 dias para atingir o limite de  $10^3$  NMP g<sup>-1</sup> de ST.

As concentrações de coliformes termotolerantes foram comparadas com os limites máximos permitidos pela resolução CONAMA 375/2006 (FIGURA 3). A comparação somente é feita com coliformes termotolerantes, pois eles são o indicador de contaminação bacteriana apontado na legislação ambiental brasileira.



**FIGURA 3.** Coliformes Termotolerantes (CT) em função de sua submissão a diferentes produtos higienizadores e das épocas de avaliação comparadas com os limites máximos permitidos pela resolução CONAMA 375/2006.

Médias seguidas de letras iguais minúsculas (Scott-Knott) e maiúsculas (Tukey) não diferem entre si a 5% de significância.\* Significativo a 5% pelo teste de Dunnett.

## 4.2 Características Físico-Químicas do lodo

### 4.2.1 Temperatura

A adição do ácido peracético, do hipoclorito de sódio, dos sais de quaternário de amônio e da cal hidratada não ocasionaram alterações de temperatura no lodo de esgoto. No entanto detectou-se diferença a 5% de significância entre as épocas de observação (TABELA 15). Tais diferenças, provavelmente, devem-se às condições atmosféricas do local, que proporcionaram menores médias de temperatura ambiente para a época 2, de 14/08/2012 a 21/08/2013, após a instalação do experimento.

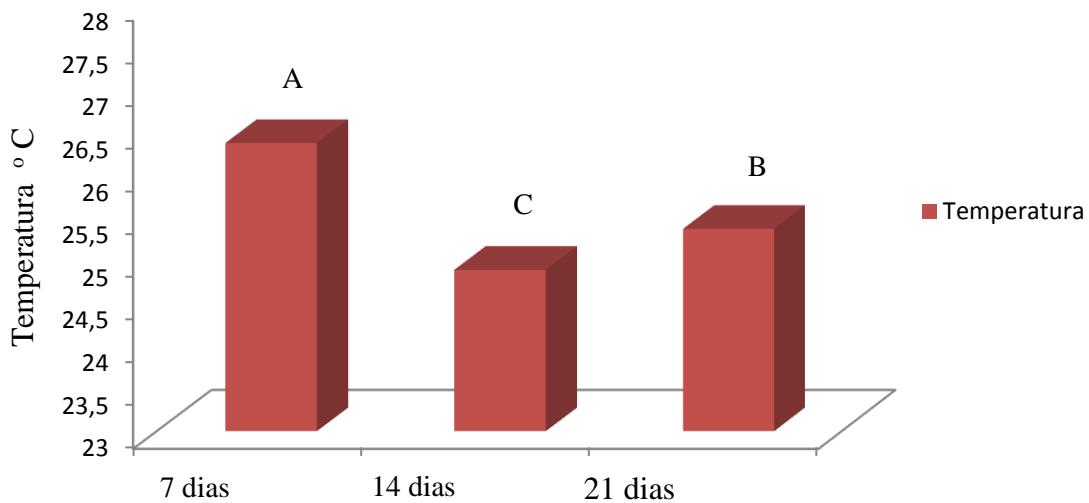
**TABELA 15** – Análise de variância dos dados de temperatura do lodo de esgoto em função dos tratamentos e da época de avaliação

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio
Tratamentos (T)	4	3,9199 <sup>NS</sup>
Bloco	3	8,6159 <sup>NS</sup>
Resíduo (a)	12	4,2456
Épocas (E)	2	11,3722 *
Tratamentos * Épocas	8	0,6927 <sup>NS</sup>
Resíduo (b)	30	0,3264
Coeficiente de variação I		8,06 %
Coeficiente de variação II		2,24 %

<sup>NS</sup> = Não significativo. \* Significativo a 5% pelo teste de F.

Pela análise comparativa das médias, através do teste de Tukey, constatou-se que a variável temperatura foi maior na época 1 – sete dias, valores de 26,37 ° C, seguida pela época 3 – vinte e um dias, 25,37 °C e pela época 2 – quatorze dias, com os menores valores de temperatura, 24,89 °C (FIGURA 4).

As maiores médias de temperatura no lodo de esgoto foram observadas nos primeiros sete dias após a instalação do empreendimento (FIGURA 4). No período compreendido entre os dias 14/08/2012 e 21/08/2013, verificaram-se as menores temperaturas ambiente e também as menores temperaturas na massa do lodo de esgoto.

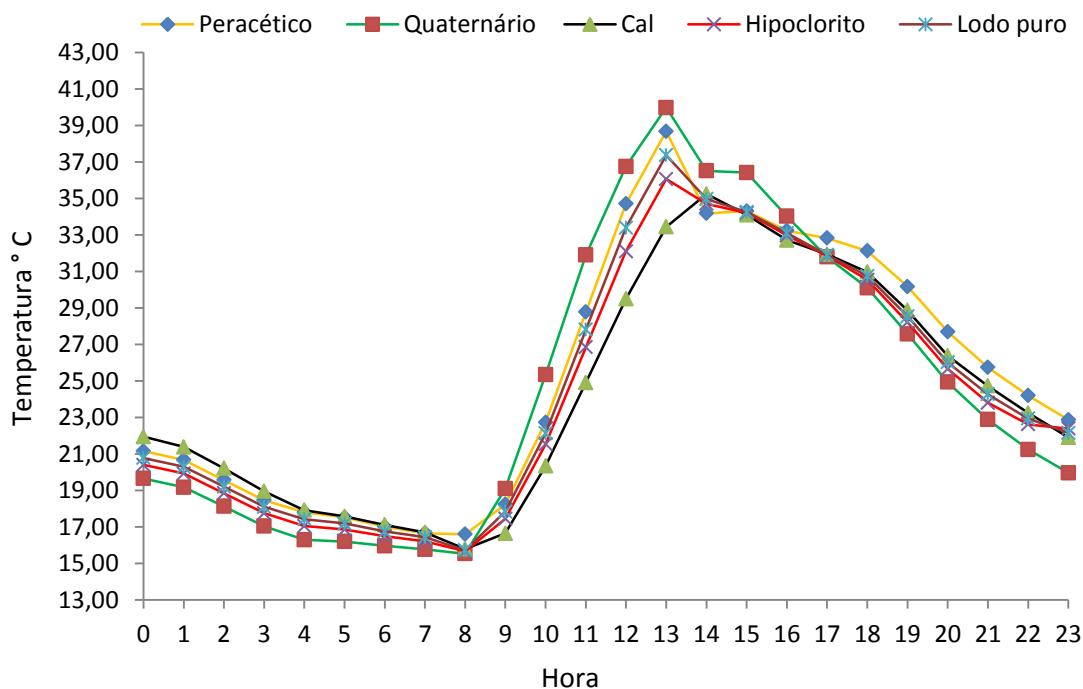


**FIGURA 4.** Temperatura do lodo de esgoto, submetida a diferentes épocas de avaliação.

Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O lodo de esgoto homogeneizado com os produtos higienizadores apresentou tendência similar de variação da temperatura ao longo das 24 horas do dia durante o período de avaliação (FIGURA 5). Considerando que o experimento esteve sob observação por 24 horas, percebeu-se um decréscimo da temperatura nas primeiras 08 horas do dia e um incremento abrupto a partir das 09 horas, com pico de temperatura próxima a 39,87 °C às 13 horas do dia em relação ao lodo, com adição do quaternário de amônio na dose de 2400 mg L<sup>-1</sup>. Em sequência, verificou-se uma queda da temperatura para os tratamentos avaliados, com disposição à estabilização ao entardecer do dia.

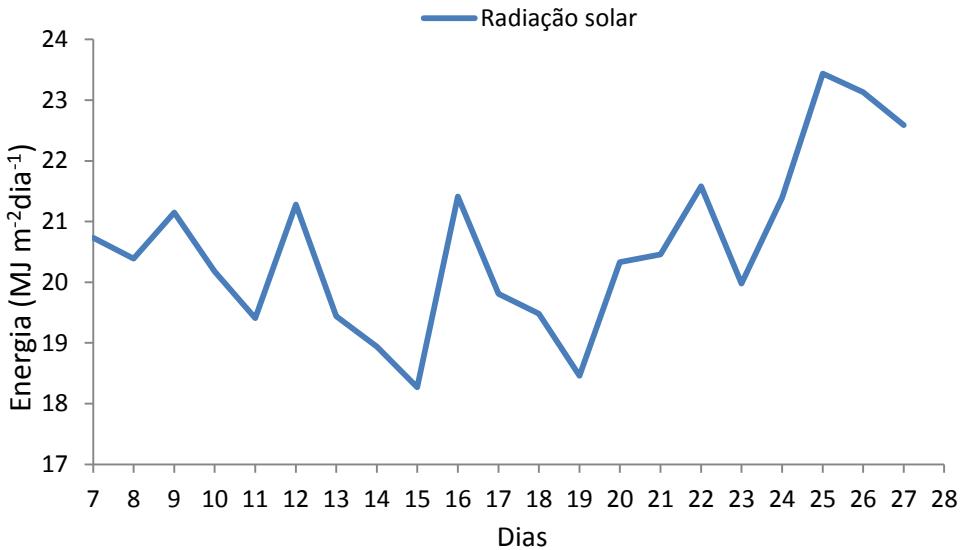
Os valores de temperatura média do lodo de esgoto variaram de 19,66°C a 22,88°C nas horas iniciais e finais do dia, com pico de temperatura das 13 às 16 horas e variação entre 35,24°C a 39,98°C para os diferentes tratamentos avaliados (FIGURA 5).



**FIGURA 5.** Perfil da temperatura do lodo de esgoto ao longo do dia, durante o período de 07/08/2013 a 27/08/2013.

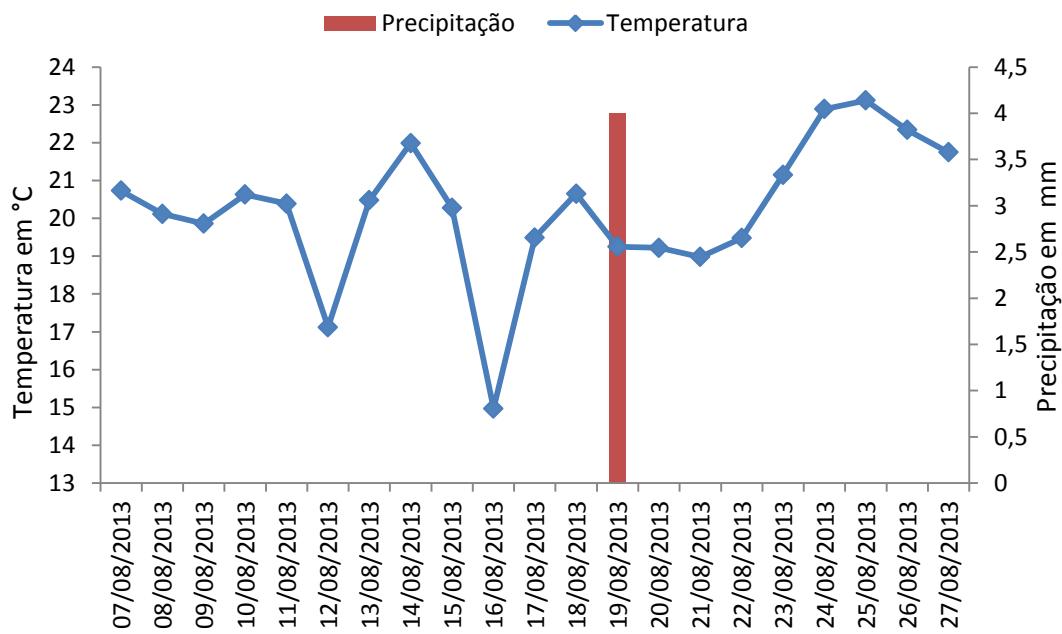
Os resultados encontrados assemelham-se aos relatados por Lima (2010) ao estudar uma estufa agrícola na higienização do lodo, onde constataram-se maiores temperaturas no período das 10 às 17 horas do dia.

A radiação solar obtida nos vinte e um dias de estudos variou entre  $18,27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e  $23,44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (FIGURA 6), sendo registrada uma temperatura média na massa do lodo de  $25,20^\circ\text{C}$  para a cal,  $26,7^\circ\text{C}$  no lodo com ácido peracético,  $26,73^\circ\text{C}$  no tratamento com compostos de quaternário de amônio,  $26,73^\circ\text{C}$  no lodo homogeneizado com hipoclorito de sódio e no lodo puro,  $26,43^\circ\text{C}$ . A cal utilizada não alterou a temperatura do lodo por ser hidratada. Rocha (2009), mencionou que o uso da cal virgem ( $\text{CaO}$ ) pode aumentar a temperatura do lodo de esgoto e auxiliar no processo de higienização.



**FIGURA 6.** Radiação solar registrada no período de 07/08/2013 a 27/08/2013.

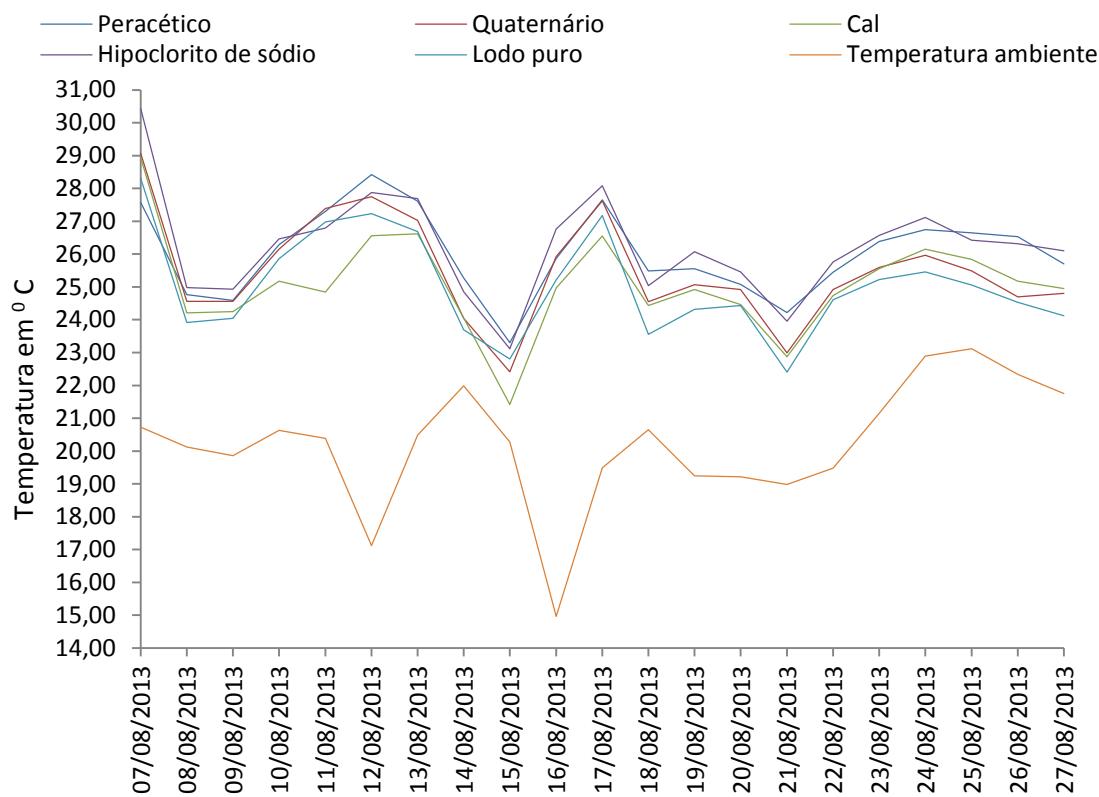
A temperatura ambiente, registrada no período experimental, variou entre 14,91°C no dia 16/08/2013 e 23,12°C no dia 25/08/2013, sendo que em 19/08/2013, foi registrada uma chuva de 4,00mm devido a uma frente fria que atingiu a região (FIGURA 7).



**FIGURA 7.** Temperatura ambiente e precipitação durante o período experimental, Uberlândia, 2013.

Os valores de temperatura registrados nas parcelas experimentais foram superiores à temperatura ambiente (FIGURA 8). A radiação solar e as temperaturas

registradas no período experimental contribuíram para a redução do nível de coliformes totais e termotolerantes em 2,68 log e 1,67 log, respectivamente, mas não atingiram os limiares explícitos na Resolução CONAMA n. 375/2006 para uso agrícola, necessitando de processos de tratamentos adicionais para adequada redução de micro-organismos patogênicos.



**FIGURA 8.** Temperatura do lodo homogeneizado com produtos higienizadores e temperatura ambiente.

A temperatura obtida na massa do lodo pode ser influenciada por diversos fatores; entre estes, a época do ano e o volume de lodo que, no caso presente, é de  $0,1\text{m}^3\text{ m}^{-2}$ . Cherubini et al. (2002) mencionaram que a quantidade de lodo por  $\text{m}^2$  influencia na eficiência da higienização. Maiores níveis de insolação e menores camadas de lodo por  $\text{m}^2$  podem melhorar a eficiência da higienização com o uso da energia solar. Pinto (2001) mencionou que a fim de se obter lodo ambientalmente seguro para uso na agricultura pode-se manter a temperatura do lodo superior a 52°C por no mínimo 72 horas, durante o período onde o pH é maior que 12,0. Para Tchobanoglou et al. (1993), a temperatura letal para *Escherichia coli*, principal

representante do coliforme termotolerante, é de 55 ° C com um tempo de exposição de 60 minutos.

#### 4.2.2 Umidade (U), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST)

A umidade (U) e os Sólidos Totais (ST) apresentaram interação significativa entre o fator principal (tratamentos) e o secundário (épocas). Com respeito aos Sólidos Voláteis e à relação entre Sólidos Voláteis e Totais, averiguou-se que os tratamentos apresentaram diferenças entre si, mas não se apurou diferença para épocas e para a interação entre o fator principal e secundário (TABELA 16).

O lodo de esgoto apresentou inicialmente um teor médio de umidade de 71,21% e um teor de sólidos totais igual a 28,78%. O material é proveniente de um reator anaeróbio e ainda passou por processo de desaguamento com o objetivo de reduzir a umidade (TABELAS 17 e 18).

**TABELA 16.** Resumo da análise de variância dos valores relativos à umidade (U), aos Sólidos Totais (ST), aos Sólidos Voláteis (SV) e à relação sólidos voláteis/ totais

Fonte de variação	G. 1	Quadrado médio			
		U	ST	SV	SV/ST
Tratamento	4	440,95*	440,95*	988,17*	0,1054*
Bloco	3	60,69 <sup>NS</sup>	60,69 <sup>NS</sup>	4,27 <sup>NS</sup>	0,000287 <sup>NS</sup>
Resíduo (a)	12	74,83	74,83	26,46	0,003014
Época	2	7559,46*	7559,46*	6,43 <sup>NS</sup>	0,000980 <sup>NS</sup>
Tratamento*Época	8	225,17*	225,17*	19,74 <sup>NS</sup>	0,002132 <sup>NS</sup>
Resíduo (b)	30	78,59	78,59	31,68	0,003277
Fator X Testemunha	1	2659,7*	2659,7*	71,44 <sup>NS</sup>	0,01114 <sup>NS</sup>
Coeficiente de variação I (%)		34,00	15,61	9,70	10,11
Coeficiente de variação II (%)		36,00	16,0	10,61	10,54

U= Umidade a 105° C, ST= Sólidos Totais (%), SV= Sólidos Voláteis (%), SV/ST= Relação Sólidos Voláteis/ Sólidos Totais. G.1 = Grau de liberdade. \*Significativo a 5% de significância pelo teste F. <sup>NS</sup>= Não significativo.

O lodo puro (tratamento adicional) apresentou diferença em relação aos demais tratamentos avaliados aos quatorze (14) e vinte e um (21) dias, não sendo verificadas diferenças significativas aos sete (7) dias após o início do experimento com os tratamentos avaliados (TABELAS 17 e 18). A redução nos teores médios de umidade e acréscimo de sólidos totais é favorecida pelo tempo de exposição à ação dos raios

solares. Resultados de redução de umidade no lodo de esgoto submetido à solarização são relatados por diversos autores: Andreoli et al., 2001, Rocha, 2009 e Lima, 2010.

Aos 14 e 21 dias após o início do experimento, verificou-se que o tratamento com cal hidratada apresentou valores inferiores de umidade (%) e superiores de sólidos totais (%) quando comparados com os valores médios do lodo puro, lodo com hipoclorito de sódio, quaternário de amônio e ácido peracético (TABELAS 17 e 18). Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos realizados por Andreoli et al., (2001) e Rocha (2009) ao observarem que o lodo caleado reduz o teor de umidade por adicionar sólidos e precipitar os sólidos dissolvidos no lodo de esgoto. A redução média de umidade no lodo caleado aos 14 dias é de 38,63 % e o acréscimo de sólidos totais é de 39,70 %.

Os menores valores de umidade (%) e o aumento no teor de sólidos totais (%), em relação ao lodo puro e ao lodo com hipoclorito de sódio, aconteceram aos 21 dias após o início do experimento. Esses resultados, referentes ao lodo misturado com ácido peracético, quaternário de amônio e cal hidratada, foram constatados aos 14 e 21 dias, não apresentando diferenças significativas nesse período. No entanto, é salutar destacar que a cal hidratada aos 14 e 21 dias apresentou os melhores resultados para a redução de umidade e aumento no teor de sólidos totais.

**TABELA 17.** Umidade (%) do lodo em função dos meios de higienização utilizados e épocas avaliadas.

Tratamentos	Épocas em dias			
	0	7 dias	14 dias	21 dias
Testemunha	71,21*			
Ácido Peracético		67,41 bB	47,25 bA*	43,22 bA*
Quaternário de amônio <sup>1</sup>		68,70 bB	39,79 bA*	31,02 bA*
Cal hidratada		56,98 bB	27,51 aA*	23,10 aA*
Hipoclorito de sódio		65,98 bC	47,04 bB*	38,8 bA*
Lodo puro		67,43 bC	48,02 bB*	43,1 bA*

Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na linha (Tukey), dentro da mesma característica, não diferem entre si a 5% de significância.

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. <sup>1</sup>= Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetil benzil amônio e água.

A ocorrência de uma chuva de 4,0 mm no dia 19/08/2013 não contribuiu para elevar o teor de umidade dos tratamentos.

Notou-se uma capa dura de cor escura nas unidades experimentais nos tratamentos com lodo puro, lodo com ácido peracético, lodo com quaternário de amônio e lodo com hipoclorito de sódio no sentido da parte superior para as camadas inferiores. Nas camadas inferiores foi possível observar aparente acúmulo de umidade. No caso do lodo caleado, formou-se uma camada mais clara e dura na parte superior e sem formação aparente de acúmulo de umidade nas camadas inferiores. No entanto verificaram-se fortes odores no lodo caleado, provavelmente devido à volatilização da amônia. Pinto (2001) mencionou que a adição da cal hidratada no lodo de esgoto pode liberar fortes odores causados pela volatilização da amônia. O odor é mais percebido em lodos digeridos anaerobicamente, devido à alta concentração de amônia gerada no processo de caleação.

**TABELA 18.** Valores de Sólidos Totais (%) do lodo em função dos meios de higienização utilizados e épocas avaliadas.

Tratamentos	Épocas em dias			
	0	7 dias	14 dias	21 dias
Testemunha	28,7825*			
Ácido peracético	32,58 bB	52,746 bA*	56,77 bA*	
Quaternário de amônio <sup>1</sup>	31,29 bB	60,20 bA*	68,98 bA*	
Cal hidratada	43,01 bB	72,49 aA*	76,89 aA*	
Hipoclorito de sódio	34,44 bC	52,96 bB*	61,2 bA*	
Lodo puro	32,56 bC	51,97 bB*	56,9 bA*	

Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na linha (Tukey), dentro da mesma característica, não diferem entre si a 5 % de significância.

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett;<sup>1</sup>/ Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetil benzil amônio e água.

A estabilidade do lodo de esgoto é de crucial importância para a reciclagem agrícola, uma vez que o material estabilizado não é foco de atratividade de vetores. Inicialmente, o lodo de esgoto apresentava-se inalterado, devido ao processo de tratamento a que é submetido na estação de tratamento de efluentes, processo denominado de “Reator anaeróbio de Fluxo Ascendente”, seguido de uma desidratação, mediante a adição de polímeros e separação sólido/líquido, pela ação de uma força centrífuga com valores médios de sólidos voláteis iguais a 57,39% e relação entre sólidos voláteis e totais igual a 0,59. A Resolução CONAMA 375/2006 somente admite a utilização do lodo de esgoto na agricultura estável e a estabilidade é medida pela

relação entre o teor de sólidos voláteis e totais presentes no lodo de esgoto, sendo considerado estável o material que possuir valores inferiores a 0,7.

A concentração de sólidos voláteis e a relação sólidos voláteis e totais não foram influenciadas pela época de avaliação de 7,14 e 21 dias (TABELA 19).

Entre os tratamentos avaliados, constatou-se que a cal hidratada reduziu os níveis de sólidos voláteis e também estreitou a relação sólidos voláteis e totais. Já o ácido peracético, o hipoclorito de sódio, os compostos de quaternário de amônio e lodo puro não promoveram diferenças significativas na concentração de sólidos voláteis e na relação entre voláteis e totais. Resultados semelhantes são relatados por Rocha (2009), ao afirmar que a elevação do pH pelo processo de tratamento alcalino é também uma condição para a estabilidade do lodo. Andreoli et al. (2001) mencionam perdas de orgânicos voláteis no lodo com aumento do pH. Lima et al. (2007) afirmam que pode ocorrer uma oxidação química da matéria orgânica pela elevação do pH, resultando na redução da relação entre sólidos voláteis e totais.

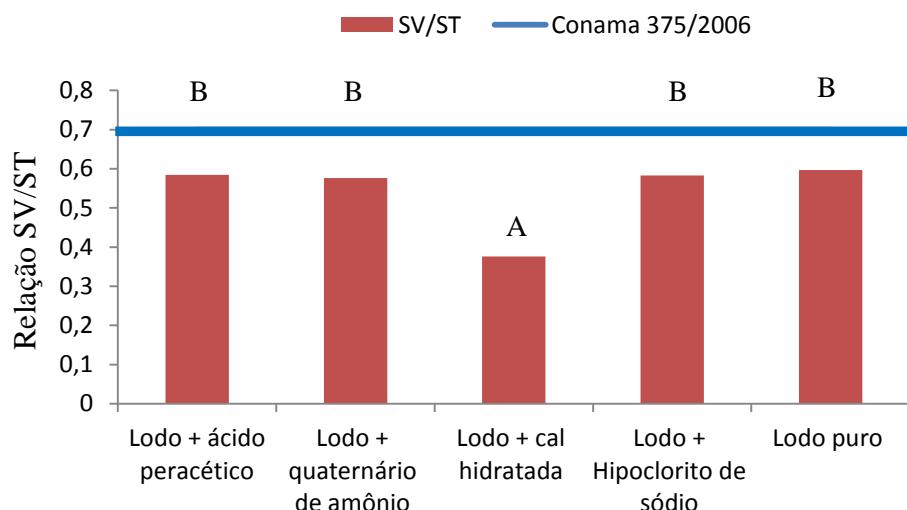
**TABELA 19.** Sólidos Voláteis (%) e relação Sólidos Voláteis/ Sólidos Totais.

Épocas em dias	Sólidos Voláteis (SV)	Relação SV/ST
Testemunha (0)	57,39 <sup>NS</sup>	0,59750 <sup>NS</sup>
7 dias	53,45 <sup>NS</sup>	0,5460 <sup>NS</sup>
14 dias	52,38 <sup>NS</sup>	0,5350 <sup>NS</sup>
21 dias	53,24 <sup>NS</sup>	0,5480 <sup>NS</sup>
<hr/> Tratamentos		
Ácido peracético	57,08 B	0,584167 B
Quaternário de amônio <sup>1</sup>	55,99 B	0,575833 B
Cal hidratada	36,86 A*	0,375833 A*
Hipoclorito de sódio	56,89 B	0,582500 B
Lodo puro	58,30 B	0,596667 B

Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna (Scott-Knott), dentro da mesma característica, não diferem entre si a 5% de significância. \*Difere da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de significância. <sup>NS</sup> = Não significativo <sup>1</sup>= Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetil benzil amônio, álcool e água.

Os valores médios do fator principal (tratamentos) foram expressos na forma de gráfico e comparados com o limite fixado na Resolução CONAMA n. 375/2006 no que diz respeito à estabilidade do lodo de esgoto (FIGURA 9). O lodo coletado do reator anaeróbio apresentava-se estabilizado, pois a relação entre voláteis e totais era inferior a

0,7. Verificou-se que todos os tratamentos mantiveram o lodo estabilizado e a cal hidratada reduziu a concentração de voláteis e a relação entre voláteis e totais (FIGURA 9).



**FIGURA 9.** Relação entre Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST)  
ST= Sólidos Totais, SV= Sólidos Voláteis. Médias seguidas de letras iguais maiúsculas (Scott-Knott) não diferem entre si a 5% de significância.

#### 4.3 Substâncias inorgânicas (íons metálicos)

Os valores das substâncias inorgânicas foram submetidos à análise de variância (TABELA 20). Os parâmetros inorgânicos avaliados incluem: zinco, cobre, cádmio, cromo, níquel e chumbo. Enquanto cobre, níquel e zinco são nutrientes essenciais à nutrição mineral de plantas, os demais não o são e podem se acumular no solo. No entanto todos pertencem ao grupo dos metais pesados por possuírem elevada massa molar e necessitarem de atenção quanto ao uso agrícola do lodo de esgoto. A Resolução CONAMA n. 375/2006 considera os micronutrientes essenciais às plantas, cobre e zinco como metais pesados e fixa os limites máximos permitidos no lodo de esgoto para o uso agrícola.

A aplicação de lodo de esgoto na agricultura, com níveis de metais pesados acima dos limites determinados na Resolução CONAMA n. 375/2006, pode afetar negativamente a saúde humana. Gandzik et al. (2012) mencionaram que os metais pesados no lodo de esgoto encontram-se sob a forma de óxidos, hidróxidos, sulfetos, sulfatos, silicatos, ligados às frações orgânicas do resíduo.

**TABELA 20.** Resumo da análise de variância das substâncias inorgânicas analisadas

Fonte de Variação	G. L.	Quadrado Médio				
		Zn	Cu	Cd	Cr	Ni
Tratamento (T)	4	3922,04*	5564,43*	0,76*	17737,67*	317,78*
Bloco	3	726,96 <sup>NS</sup>	338,95 <sup>NS</sup>	0,06 <sup>NS</sup>	182,48 <sup>NS</sup>	62,43 <sup>NS</sup>
Resíduo (a)	12	1140,72	279,92	0,03	309,65	42,13
Época (E)	2	6512,1*	245,02 <sup>NS</sup>	0,34*	369,51 <sup>NS</sup>	4,14 <sup>NS</sup>
Tratamento x Época	8	11233,11 <sup>NS</sup>	1655,74 <sup>NS</sup>	0,07 <sup>NS</sup>	64,18 <sup>NS</sup>	68,79 <sup>NS</sup>
Resíduo (b)	30	799,47	708,57	0,08	312,55	33,92
Fator. x adicional	1	158,36 <sup>NS</sup>	902,87 <sup>NS</sup>	0,02 <sup>NS</sup>	654,20 <sup>NS</sup>	33,76 <sup>NS</sup>
C.V 1 (%)		53,07	8,56	20,18	11,46	22,43
C.V 2 (%)		44,43	13,62	33,25	11,52	20,13

G.L = Grau de liberdade, NS= Não significativo, C.V= Coeficiente de Variação, \* significativo a 5% pelo teste F.

No modelo estatístico de parcelas subdivididas para as substâncias inorgânicas zinco, cobre, cádmio e níquel, verificaram-se diferenças significativas entre os tratamentos principais (lodo puro e lodo homogeneizados com produtos higienizadores) na comparação de médias pelo teste de Scott-Knott (TABELA 21), existindo efeito acentuado entre os tratamentos secundários (épocas) somente para zinco e cádmio; e não se constatou interação entre o fator principal e o fator secundário para todas as substâncias inorgânicas analisadas. A concentração de Pb no lodo de esgoto encontrava-se abaixo do limite de detecção, sendo este excluído da análise de variância.

O tratamento adicional, quando comparado com cada um dos tratamentos principais e secundários foi não significativo, indicando que as adições dos produtos higienizadores não possuem efeito sobre os atributos do lodo de esgoto: zinco, cobre, cádmio, cromo e níquel (TABELA 21).

**TABELA 21.** Metais pesados em lodo de esgoto em função dos tratamentos e épocas avaliadas<sup>1</sup>.

Épocas em dias	Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb
	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Testemunha (0)	1500,00 <sup>NS</sup>	211,00 <sup>NS</sup>	0,94 <sup>NS</sup>	166,72 <sup>NS</sup>	31,93 <sup>NS</sup>	Nd
7	16200,00 A	195,45 <sup>NS</sup>	0,98 A	157,83 <sup>NS</sup>	28,68 <sup>NS</sup>	Nd
14	1750,00 A	199,00 <sup>NS</sup>	0,72 A	149,23 <sup>NS</sup>	29,45 <sup>NS</sup>	Nd
21	2670,00 B	192,00 <sup>NS</sup>	0,90 A	153,48 <sup>NS</sup>	28,65 <sup>NS</sup>	Nd
Tratamentos						
Ácido Peracético	1840,00 b	210,16 b	1,05 c	176,25 b	32,60 b	Nd
Quaternário de amônio	2700,00 b	209,00 b	1,08 c	171,52 b	31,15 b	Nd
Cal Hidratada	1180,00 a	157,91 a	0,45 a	85,340 a	19,86 a	Nd
Hipoclorito de sódio	2340,00 b	201,00 b	0,83 b	162,41 b	30,12 b	Nd
Lodo puro	1990,00 b	199,33 b	0,93 b	172,07 b	30,90 b	Nd

<sup>NS</sup>= Não significativo, Nd- Não detectado. Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na coluna (Tukey), dentro da mesma característica, não diferem entre si a 5% de significância.<sup>1/</sup> Análises Realizadas no LABAS – ICIAG –UFU e LABRAS – Monte Carmelo/MG. Resíduos: Gravimétricos. <sup>2</sup> Digestão Nitro perclórico = Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb. <sup>3</sup>/Determinado por ICP/OES= Espectrômetro de Plasma Simultâneo (Cr, Ni, Cd, Pb) e espectrofotometria de absorção atômica ( Zn e Cu).

Pela análise comparativa das médias pelo teste de Tukey (épocas) e Scott-Knott (tratamentos), o zinco apresentou maior concentração aos 21 dias com nível de 2670m g kg<sup>-1</sup> de Zn. Os demais meios utilizados no processo de higienização (ácido peracético, quaternário de amônio, hipoclorito de sódio e lodo puro) não demonstraram diferenças significativas.

As épocas avaliadas não influenciaram na concentração de cobre, cromo e níquel presentes no lodo de esgoto higienizado. O lodo misturado à cal hidratada, na proporção de 30% da massa seca do lodo de esgoto, reduziu significativamente a disponibilidade de zinco, cobre, cádmio, cromo e níquel em relação aos demais meios testados. Resultados semelhantes foram obtidos por Melo et al. (2001), ao afirmarem que o lodo caleado precipita os metais pesados. Nestas condições, formam compostos insolúveis e diminuem o risco de contaminação ambiental e humana. Amaral sobrinho et al. (1997 e 2009) mencionaram que os teores de Ni, Cd, Zn, Cr e Cu são influenciados pelo pH do meio e em condições alcalinas, favorecem a passagem das formas mais solúveis para as de menor solubilidade. Matos et al. (2012) relataram que o lodo caleado atende à legislação ambiental, apresentando baixas concentrações de metais pesados prontamente disponíveis pelas plantas, indicando um menor risco de contaminação ambiental.

O lodo tratado com ácido peracético e compostos de quaternário de amônio apresentou maiores valores de cádmio. Já no tratamento com hipoclorito de sódio, não se observou diferença em relação ao lodo puro, indicando que a adição daquele na concentração de 2400 mg L<sup>-1</sup> não eleva os teores de cádmio. Os níveis de cromo no lodo higienizado com ácido peracético, quaternário de amônio, lodo puro e hipoclorito de sódio, foram inferiores ao lodo higienizado com cal hidratada.

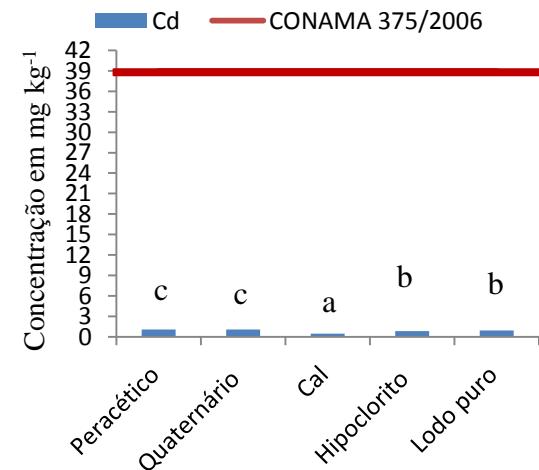
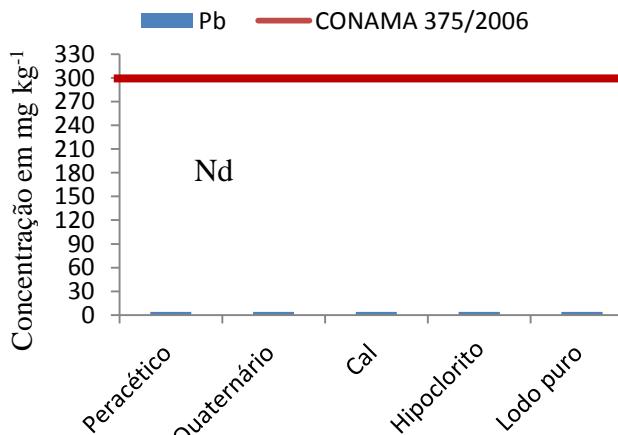
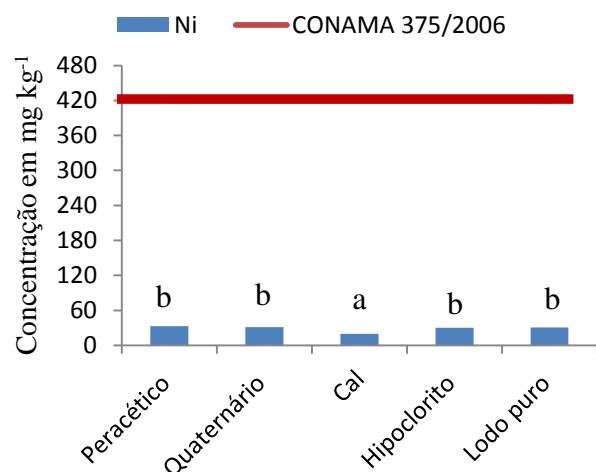
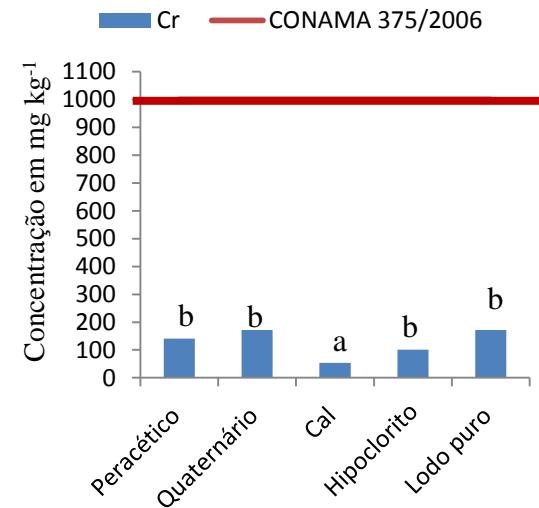
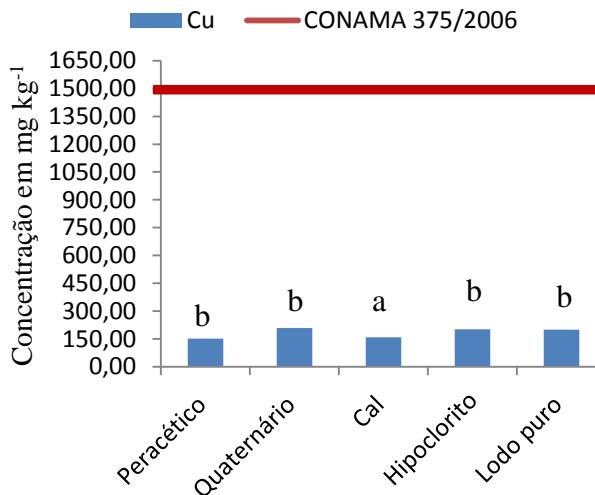
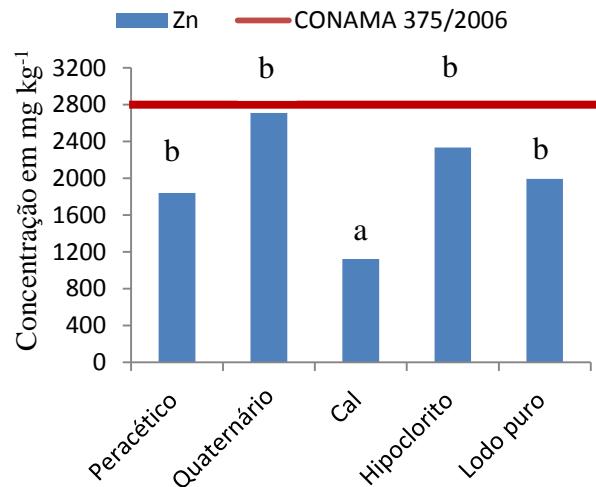
Em relação ao níquel, os valores aferidos não se sensibilizaram pela adição ao lodo de esgoto de ácido peracético, compostos de quaternário de amônio e hipoclorito de sódio (TABELA 21).

Entre os tratamentos avaliados, observou-se que a cal hidratada reduziu a disponibilidade de cobre, cádmio e níquel no lodo de esgoto, enquanto a adição de ácido peracético e quaternário de amônio elevou a disponibilidade de cádmio e cromo no referido lodo, mas não apresentou diferença significativa em relação ao tratamento adicional.

As concentrações médias dos íons metálicos foram comparadas com os limites máximos permitidos pela resolução CONAMA n. 375/2006, por meio da qual se constatou que nenhum elemento analisado apresentou limites superiores aos determinados pela norma ambiental (FIGURA 10). Os valores encontrados indicaram que o lodo submetido aos meios de higienização não extrapolou os limites fixados para a reciclagem agrícola. Mesmo o lodo puro, sem a adição de produtos químicos, manteve os limites abaixo do exigido pela norma ambiental. Conforme Silva et al. (2001), o lodo de esgoto, de origem exclusivamente doméstica, possui menores níveis de metais pesados. Quando ocorre a mistura de efluentes de origem industrial com efluentes sanitários, os níveis de íons inorgânicos podem elevar, merecendo a devida atenção quando este lodo for destinado à reciclagem agrícola.

Os valores encontrados nos diferentes tratamentos e épocas avaliadas sempre se mantiveram abaixo dos limites determinados pela legislação ambiental; somente o zinco apresentou concentração maior, mas, mesmo assim, inferior ao limite legal, que é de 2800 mg kg<sup>-1</sup> para uso agrícola do resíduo.

Assim, verificou-se que a presença dos metais cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco foi baixa, ficando aquém da concentração máxima permitida para o uso agrícola do lodo de esgoto.



**FIGURA 10.** Íons metálicos no lodo de esgoto e limites máximos permitidos para uso agrícola em função dos tratamentos.

Médias seguidas de letras iguais minúsculas (Scott-Knott), dentro da mesma característica, não diferem entre si a 5% de significância. Nd= Não detectado

#### 4.4 Parâmetros de interesse agronômico

A Resolução Conama 375/2006 determina os padrões necessários para a caracterização do lodo de esgoto para fins agrícola e lista os parâmetros agronômicos que devem ser analisados. No entanto quando se refere à caracterização agronômica, a norma ambiental não fixa limites máximos permitidos no resíduo e no solo agrícola, deixando a sua determinação baseada no conhecimento agronômico.

Depreende-se do apêndice A que não existe interação significativa entre o fator principal (tratamentos) e o fator secundário (épocas) para todos os parâmetros analisados: pH, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, manganês, alumínio, cálcio, magnésio, fósforo, potássio, enxofre e ferro (TABELAS 22 e 23).

Entre os produtos testados para a higienização do lodo, a cal hidratada, na proporção de 30% da massa seca do lodo, apresentou a maior média de pH, com 12,65, sendo determinante na redução dos níveis de coliformes fecais e termotolerantes, principalmente pela elevação do pH e liberação de NH<sub>3</sub> (TABELA 22). Resultados semelhantes são relatados por Rocha (2009) e Andreoli et al. (2001). O lodo higienizado com cal hidratada pode ser utilizado como corretivo de solo devido ao seu elevado pH, desde que as características de íons metálicos e de agentes patogênicos presentes estejam em conformidade com a Resolução CONAMA n. 375/2006. Para Andreoli et al. (2001), o lodo caleado pode substituir a aplicação de calcário quando o objetivo for a calagem do solo. Fia et al. (2005) mencionaram que a caleação com cal hidratada é capaz de elevar o pH do lodo a valores superiores a 12,0, podendo provocar aumentos não desejáveis de pH quando o lodo de esgoto é aplicado ao solo. Assim, recomenda-se que o lodo de esgoto caleado seja considerado um corretivo da acidez do solo e não um adubo orgânico.

Em relação à época avaliada, constatou-se que aos 7 dias, foi registrada a maior média de pH; posteriormente, aos 14 e 21 dias, verificou-se uma queda nos valores médios do pH, mas não se apuraram diferenças significativas entre 14 e 21 dias (TABELA 23).

A concentração de CaO na cal hidratada utilizada é de 79,8%; valores maiores poderão ser encontrados na cal virgem. Pegorini et al. (2006) mencionaram que a manutenção dos níveis de pH ao longo do tempo se deve à maior ou menor concentração de CaO. A cal que possuir a maior concentração de CaO tem a capacidade de manter os valores mais estáveis de pH ao longo do tempo. Rocha (2009) trabalhou com a cal virgem e hidratada na proporção de 29,1% da massa seca do lodo de esgoto e

verificou que a cal hidratada manteve o pH com valores iguais ou superiores a 12,0 por 60 dias, enquanto a cal virgem manteve o pH com valores superiores a 12,0 por 120 dias de estocagem.

O tratamento adicional (testemunha), com valor médio de pH igual a 8,62, apresentou diferença somente em relação ao lodo caleado com valor médio de pH de 12,65, indicando que a adição de cal hidratada, na proporção de 30% da massa seca do lodo, eleva os níveis de pH a valores médios superiores a 12,0 (TABELA 22) . Os demais tratamentos testados — ácido peracético, compostos de quaternário de amônio, hipoclorito de sódio e lodo puro — não apresentaram diferenças entre si para o parâmetro pH pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

O lodo caleado com cal hidratada apresentou os menores valores médios de matéria orgânica 368,60 g kg<sup>-1</sup>, carbono orgânico 213,8 g kg<sup>-1</sup> e nitrogênio 20,88 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 22). As épocas analisadas não influenciaram na concentração total dos parâmetros estudados: MO, C, N. De acordo com estes parâmetros, o tratamento adicional (testemunha) possui valores médios superiores ao do lodo caleado com a cal hidratada, em relação aos meios de higienização avaliados (TABELA 22). A menor concentração de matéria orgânica e de carbono orgânico total deve-se à elevação do pH, que proporcionou uma maior mineralização da matéria orgânica total.

A relação carbono/nitrogênio do lodo de esgoto manteve valores inferiores a 15,0, indicando que o material favorece a ação de micro-organismos no processo de decomposição, pois se trata de um resíduo que possui rápida degradação da matéria orgânica. Berton e Nogueira (2010) relatam que a matéria orgânica do lodo de esgoto é rica em proteína bruta, hemicelulose e celulose e a adição desse resíduo ao solo promove uma rápida decomposição destas frações, resultando em uma meia vida de 33 dias, tempo necessário para que 50% do carbono mineralizável sejam convertidos em CO<sub>2</sub>.

O baixo valor de nitrogênio no lodo caleado é devido à volatização da amônia (NH<sub>3</sub>).

**TABELA 22.** Atributos químicos do lodo de esgoto

Épocas em dias	pH	M.O g kg <sup>-1</sup>	C g kg <sup>-1</sup>	N g kg <sup>-1</sup>	Na g Kg <sup>-1</sup>	Mn g kg <sup>-1</sup>
Testemunha (0)	8,62*	573,91*	332,89*	30,01*	0,75*	0,13 <sup>NS</sup>
7	9,37 A	523,83 <sup>NS</sup>	310,05 <sup>NS</sup>	29,64 <sup>NS</sup>	1,38 <sup>NS</sup>	0,12 A
14	8,79 B	531,97 <sup>NS</sup>	303,84 <sup>NS</sup>	32,20 <sup>NS</sup>	1,52 <sup>NS</sup>	0,13 A
21	8,80 B	534,54 <sup>NS</sup>	308,56 <sup>NS</sup>	31,92 <sup>NS</sup>	1,52 <sup>NS</sup>	0,13 A
Tratamentos						
Ácido peracético	8,17 b	570,36 b	330,83 b	33,48 a	0,94 b	0,13 a
Quaternário de amônio <sup>1</sup>	7,88 b	559,65 b	324,62 b	34,21 a	0,83 b	0,13 a
Cal hidratada	12,65*a	368,60*a	213,80*a	20,88*b	0,61 a	0,14 a
Hipoclorito de sódio	8,05b	568,91b	329,99 b	30,86 a	4,10*c	0,13 a
Lodo puro	8,15 b	583,05b	338,19 b	36,84 a	0,88 b	0,13 a

Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na coluna (Tukey), dentro da mesma característica, não diferem entre si a 5% de significância. \*Significativo a 5% de significância pelo teste de Dunnett. <sup>NS</sup> = Não significativo = <sup>1</sup>/ Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetil benzil amônio, álcool e água. <sup>3</sup>/ Análises realizadas no LABAS-ICIAG-UFU; <sup>4</sup>/ C total (oxidação da matéria orgânica com solução 0,17 mol L<sup>-1</sup> de dicromato de potássio e titulação do excesso de dicromato com solução de sulfato ferroso amoniacial 0,5 mol L<sup>-1</sup>); <sup>5</sup>/ N método (micro-Kjedhal) <sup>6</sup>/Extraídos por digestão nitro-perclórica (Na e Mn). <sup>7</sup>/ pH em CaCl<sub>2</sub> a 0,01 mol L<sup>-1</sup>.

**TABELA 23.** Atributos químicos do lodo de esgoto

Épocas em dias	Al	Ca	Mg	P	K	S	Fe
	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
Testemunha (0)	39,34*	17,3*	2,6*	9,6*	1,0 <sup>NS</sup>	9,7*	11,99 <sup>NS</sup>
7	30,33 <sup>NS</sup>	79,3 <sup>NS</sup>	3,3 <sup>NS</sup>	7,7 <sup>NS</sup>	0,9 <sup>NS</sup>	18,9A	18,21 <sup>NS</sup>
14	29,90 <sup>NS</sup>	79,4 <sup>NS</sup>	3,2 <sup>NS</sup>	8,3 <sup>NS</sup>	0,9 <sup>NS</sup>	14,6A	15,34 <sup>NS</sup>
21	29,56 <sup>NS</sup>	87,2 <sup>NS</sup>	3,3 <sup>NS</sup>	7,0 <sup>NS</sup>	0,8 <sup>NS</sup>	18,4A	15,99 <sup>NS</sup>

Tratamentos							
Ácido peracético	33,60 b	21,5 b	3,1 b	10,2 a	0,9 <sup>NS</sup>	16,6*a	17,72 <sup>NS</sup>
Quaternário de amônio <sup>1</sup>	32,31 b	22,7 b	3,1 b	9,4 a	0,9 <sup>NS</sup>	21,8*a	17,79 <sup>NS</sup>
Cal hidratada	20,10* a	302,0* a	4,2* a	1,6 *b	0,6 <sup>NS</sup>	12,4*a	12,75 <sup>NS</sup>
Hipoclorito de sódio	32,80 b	22,2 b	3,1 b	9,0 a	1,0 <sup>NS</sup>	18,7*a	17,11 <sup>NS</sup>
Lodo puro	30,85 b	41,4 b	3,0 b	8,1a	0,8 <sup>NS</sup>	16,2*a	17,20 <sup>NS</sup>

Médias seguidas de letras iguais minúsculas na coluna (Scott-Knott) e maiúsculas na coluna (Tukey), dentro da mesma característica, não diferem a 5% de significância. \*Significativo ao nível de 5% de significância pelo teste de Dunnett. <sup>NS</sup> = Não significativo <sup>1</sup>= Cloreto de dicetil amônio, cloreto de alquil amido propil, dimetil benzil amônio, álcool e água; <sup>2</sup>/ Análises realizadas no LABAS-ICIAG-UFU; <sup>3</sup>/ Teores totais extraídos por digestão nitro-perclórica (Al, Ca, Mg, P, K, S e Fe).

Pinto (2001) menciona que a elevação do pH, mediante a estabilização química com cal virgem ou hidratada em lodo de esgoto digerido anaerobiamente, libera fortes odores, causando a volatilização da amônia em decorrência desse aumento do pH.

O lodo caleado, por apresentar perda de nitrogênio por volatilização da amônia, diminuiu o teor de nitrogênio total de 30,01 g kg<sup>-1</sup> para 20,88 g kg<sup>-1</sup>, necessitando de doses maiores quando destinado ao uso agrícola (TABELA 22). No entanto é saliente destacar que a aplicação do lodo em solo agrícola é determinada em função da quantidade de nitrogênio disponível no lodo e na demanda do nutriente pela cultura agrícola. O limite de tal aplicação não deve ultrapassar os valores de pH a níveis superiores a 7,0, conforme descreve a resolução CONAMA n. 375/2006. Os elevados níveis de pH na mistura do lodo com o solo podem indisponibilizar elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas.

Em relação à concentração de ferro, que atinge valores médios de 11997 mg kg<sup>-1</sup>, os tratamentos não influenciaram na sua concentração total (TABELA 23). Sampaio (2000) menciona maior nível de ferro e zinco entre os micronutrientes, principalmente quando o lodo é acondicionado com FeCl<sub>3</sub>. Outro fato que possibilitou uma maior concentração total de ferro no lodo, quando submetido a diferentes meios de higienização, foi a sua origem. O material de origem humana apresenta elevados níveis de ferro, pelo fato de fazer parte dos tecidos humanos. Melo et al. (2010) mencionaram que no baço, órgão responsável pela síntese de hemoglobina, a ferritina contém 30% de ferro, o que proporciona elevada concentração nos dejetos de origem humana.

Já com respeito ao teor total de sódio (Na), verificou-se que o lodo submetido ao tratamento com hipoclorito de sódio, na dose de 2500 mg L<sup>-1</sup>, teve seus níveis elevados, com valores médios de 4,10 g kg<sup>-1</sup>, diferentes dos valores médios iniciais de 0,75 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 22). A elevação do nível de sódio (Na) no resíduo justificou-se por sua presença no hipoclorito de sódio.

A concentração média de sódio no lodo tratado com hipoclorito de sódio é elevada e pode ocasionar problemas de salinização e solidificação quando aplicado em solo agrícola. Em relação aos demais meios testados, não se observaram diferenças significativas e não se constatou influência da época na concentração total de sódio. Barros et al. (2011), ao aplicarem 50 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto higienizado com hipoclorito de sódio (2500 mg L<sup>-1</sup>), obtiveram uma concentração de 1.200 mg kg<sup>-1</sup> de sódio na parte aérea do milho, mas não foi observada a fitotoxicidade da planta. No entanto os elevados teores de sódio no resíduo podem causar problemas de

fitotoxicidade à cultura agrícola e o seu uso contínuo pode acarretar aumento nos teores de sódio presente no solo. Andreoli et al. (2001) mencionaram que os teores de  $1,4 \text{ g kg}^{-1}$  de sódio no lodo de esgoto são considerados elevados e a sua disposição no solo pode levar a problemas de salinidade.

Em se tratando do manganês (Mn), não existiu diferença marcante em relação aos tratamentos, épocas e tratamento adicional. Andreoli et al. (2001) afirmam que o lodo de esgoto caleado, quando aplicado em solo agrícola, reduz os níveis tóxicos de alumínio e manganês, além de aumentar a atividade microbiana.

Em relação ao Alumínio (Al), ao Cálcio (Ca), ao Magnésio (Mg) e ao Fósforo (P), verificou-se que o lodo caleado, com o uso da cal hidratada na proporção de 30% da massa seca do lodo, apresentou os maiores valores médios de cálcio ( $302,0 \text{ g kg}^{-1}$ ), magnésio ( $4,2 \text{ g kg}^{-1}$ ) e menores teores totais de alumínio ( $20,10 \text{ g kg}^{-1}$ ) e fósforo ( $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ ).

Considerando o fator secundário (épocas), não se verificou diferença significativa para os parâmetros Al, Ca, Mg e P, mas constatou-se alteração expressiva para o tratamento adicional (testemunha) pelo teste de Dunnett a 5% . Assim, o lodo caleado elevou os teores de cálcio e magnésio, reduzindo a disponibilidade de alumínio e fósforo.

A elevação dos teores de cálcio e magnésio foi devida, em parte, à adição da cal hidratada, pelo fato de esta possuir teores de cálcio e de magnésio em sua composição. Os menores valores totais de alumínio e fósforo justificaram-se pela formação de compostos pouco solúveis, como os fosfatos de cálcio e o hidróxido de alumínio. De acordo com Andreoli et al. (2001), o lodo caleado com pH acima de 12,0 proporciona a fixação dos metais pesados e a insolubilização de fósforo. Silva (2007) salientou que o conteúdo elevado de carbono orgânico em lodos de esgotos estabilizados alcalinamente acima de  $250 \text{ g kg}^{-1}$  também leva à complexação de  $\text{Al}^{+3}$ .

A concentração média de potássio (K) no lodo de esgoto estudado foi baixa, com valores médios de  $1,0 \text{ g kg}^{-1}$  (TABELA 23). Resultados semelhantes são relatados em trabalhos realizados por Nogueira et al. (2010), que encontraram valores de  $1,0 - 3,0 \text{ g kg}^{-1}$  de potássio em lodo de esgoto. Os valores de potássio não apresentaram efeito considerável para os tratamentos com ácido peracético, hipoclorito de sódio, cal hidratada e lodo puro e para as épocas avaliadas. Não se verificaram diferenças entre o tratamento adicional (testemunha), o fator principal e o secundário. Com isso, observa-se que os meios de higienização avaliados não influenciaram na concentração total de

potássio; as épocas também não demonstraram nenhum efeito em relação a sua concentração média.

Em relação ao enxofre (S), verificou-se que o tratamento controle (adicional) diferiu de todos os meios de higienização testados (TABELA 23). Mas não foi observada diferença significativa entre os tratamentos e épocas avaliadas. As concentrações médias iniciais de enxofre no lodo de esgoto foram iguais a  $9,7 \text{ g kg}^{-1}$ , e, 7 dias após o inicio do experimento, registraram-se valores médios de  $18,9 \text{ g kg}^{-1}$ .

O lodo de esgoto apresentou acréscimos no teor total de enxofre independente dos produtos químicos adicionados. O acréscimo deve-se à mineralização da matéria orgânica, tendo como consequência o aumento da disponibilidade de enxofre no resíduo. Estudos realizados por Sígolo e Pinheiro (2010) demonstram que o enxofre presente no lodo de esgoto encontra-se associado à matéria orgânica, aos compostos orgânicos sulfonados e aos surfactantes presentes nos detergentes.

## 4 CONCLUSÕES

O lodo de esgoto homogeneizado com compostos de quaternário de amônio, hipoclorito de sódio e ácido peracético, submetido à insolação, não reduziu a concentração de coliformes termotolerantes abaixo de  $1.000 \text{ NMP g}^{-1}$  de Sólidos Totais (ST). Da mesma forma, a radiação solar que foi aferida, por si só, também não reduziu a concentração de coliformes termotolerantes aos limites aceitáveis pela norma de regência.

Os teores de metais pesados (Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb) estiveram abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/2006.

A calefação a 30% da massa seca do lodo apresentou forte alcalinidade e diminuiu a concentração de coliformes totais e termotolerantes abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n. 375/2006. Proporcionou, ainda, menores teores de N, P, Na, M.O, C, Al, Zn, Cu, Sólidos Voláteis (SV) e Umidade no lodo. Aumentou a concentração dos teores de Ca, Mg e Sólidos Totais (ST) no bioassólido.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEME (Agence De l' Environnement et de la Maîtrise de l' Energie). Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires de l' épandage des boues d' épuration des collectivités locales. Ministère de l' agriculture et de la pêche. 1988, 75p.

AISSE, M.N.; VAN HAANDEL, A.C.; VON SPERLING, M.; CAMPOS, J.R.; COURACCI FILHO, B.; SOBRINHO, P.A. Tratamento e disposição final de lodo gerado em reatores anaeróbicos. In: CAMPOS, J.R (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Projeto Prosab, Rio de Janeiro: Abes/ RJ, 1999 cap. 11, p 271-299

AISSE, M.N.; CORAUCCI FILHO.; ANDRADE NETO.; JUR, G.D.; LAPOLLI, F.R.; MELO, H.N.S. de.; PIVELI, R.P.; LUCCA, S. J.de. Cloração e Descloração. In: GONÇALVES, R.F (Coord.). **Desinfecção de efluentes sanitários**. Projeto Prosab, Rio de Janeiro: Abes/RJ, cap. 4, 2003, p-113-168.

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 21, p. 9-16, 1997.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; BARRA, C. M.; LÃ, R. O. Química dos Metais Pesados no Solo (cap. XVI). In: MELO, V. F.; ALLEONI, R. F. Química e Mineralogia do Solo, parte II. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS)**, Viçosa, p. 250-278, 2009.

ANDREOLI, C.V.; SPERLING, V.M. FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: Tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Desa – UFMG, 2001a, p.13-14. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

ANDREOLI, C. V.; LARA, A.I. de.; FERREIRA, A. C.; PEGORINI, E.S.; IHLENFELD, R.G. **Uso e Manejo do lodo de esgoto na Agricultura**. Curitiba: Prosab/Finep, 1999, 98 p.

ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos: Transformando problemas em soluções**. 2. Ed. Curitiba: Sanepar, Finep, 2001.

BARROS, I.T.; ANDREOLI, C.V.; SOUZA JUNIOR, I. G. de.; COSTA, A.C.S. da. Avaliação Agronômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 630-638, 2011

BARRIOS, J.A.C.; JIMENEZ, B.; MAYA, C. Tratamiento ácido de lodos residuales fisicoquímicos para reducir el contenido de microorganismos. Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y ambiental, 28., 2002, Cancún. **Anais...México**, 27 al 31 octubre, 2002.

BARROS, I. T.; COSTA, A.C.S.; ANDREOLI, C.V. Avaliação da higienização do lodo de esgoto anaeróbico através do tratamento ácido e alcalino. **Sanare- Revista Técnica da Sanepar** [S.I], v. 24, p.61-69, 2006.

BRASIL. Lei Federal n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010)>. Acesso em 20 dez. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa n. 25 julho de 2009.** Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2009. 25 de julho. Seção n. 1, p. 20.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto. In: SPADOTTO, C.; RIBEIRO, W (Ed.). **Gestão de Resíduos na Agricultura e Agroindústria.** Botucatu, FEPAF, 2006, p.181- 204.

BETTIOL, W.; SANTOS, I, dos. Efeito do lodo de esgoto sobre fitopatógenos veiculados pelo solo: Estudos de casos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A (Ed.). **Impacto ambiental na agricultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006, p- 317- 343.

BERTON, R.S.; NOGUEIRA, T.A.R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A.R.; NOGUERIA, T.A.R.; PIRES, A.M.M (Ed.). **Uso Agrícola de Lodo de Esgoto (avaliação após a Resolução n. 375 do CONAMA).** Botucatu, Fepaf, 2010, p 31-51.

BONNET, B.R.P.; LARA, A. I de.; DOMASZAK, S.C. Indicadores biológicos da qualidade sanitária do lodo de esgoto. IN: ANDREOLI, C.V.; BONNET, B.R.P (Coord). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto.** Curitiba: Sanepar, 2000, 2 ed.cap.1, p.11-26.

BUENO, R.C.R. Biossódio- Processo de Redução Adicional de Patógenos com a Utilização Energia Solar. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. ABES. **Trabalhos técnicos**, 2006.

CAVALLINI, G.S. Estudo do ácido peracético na desinfecção de Esgoto Sanitário: Influência das características físico – químicas do efluente, determinação da concentração residual e cinética de degradação. **Dissertação apresentada a Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de mestre em química aplicada.** Ponta Grossa, 2011

CASSINI, A.S. **Estudo de Processos Alternativos no pré- tratamento de efluentes provenientes da produção de isolados proteicos.** 2008, 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente . Presidente do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 375 de 29 de agosto de 2006**. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2006. 30 ago. Seção n. 167, seção 1, p.141-146

CHERRINGTON, C.A.; HINTON, M.; CHOPRA, I. Organic acids: Chemistry, antibacterial activity and practical applications. **Advances microbiological physiology**, v. 32, p. 87-108, 1991.

CHERUBINI, C., ANDREOLI, C.V, FERREIRA, A.C., CARNEIRO, C. Secagem e higienização do Lodo de Esgoto Anaeróbico em Leitos de Secagem Através da Solarização. **VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vitória/Es, 2002.

CLAURET, C.; SPRINGTHORE, S.; SATTAR, S. Fate of cryptosporidium oocysts, giardia cysts, and microbial indicators during wastewater treatment and anaerobic sludge digestion. **Can. J.Microbiol.** Canada, v .45, p.257-262, 1999.

CETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Salmonella – Isolamento e identificação: Método de ensaio**. São Paulo, 1993. 42 p (norma técnica L.5128).

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Coliformes termotolerantes: Determinação em amostras ambientais pela técnica de tubo múltiplos com meio A1- método de ensaios**. São Paulo, 2007. 16 p. (Norma técnica L. 5.406).

DASCHNER, F. O hospital e a poluição: Papel do epidemiologista na proteção do ambiente. In: WENZEL, R. **Prevenção e controle de infecção hospital**. Baltimore, 3<sup>a</sup> Ed. 1997, p. 595-605.

DIAS, E.H.O. **Tratamento de lodo de esgoto por secagem em estufa: Higienização e produção de biossólidos para uso agrícola**. 2012, 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, Plantas e Fertilizantes**, 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009, 627p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of Water, Office of Science and Technology Sludge Risk Assessment Branch. 1992, Washington, DC 20460, 147.

ESTRELA, C.; SYDNEY, G.B.; BAMMANN, L.L.; FELIPE JÚNIOR, O. Estudo do efeito biológico do pH na atividade enzimática de bactérias anaeróbicas. **Revista da Faculdade de Odontologia de Bauru**. Bauru, v.2, n.4, p.31-38, out/dez. 1994

ESTRELA, C.; ESTRELA, C.R.A.; BARDIN, E.L.; SPANÓ, J.C.C.; MARCHESAN, M.A.; PÉCORA, J. D. Mechanism of action of sodium hypochlorite. **Dental Foundation of Ribeirão Preto- SP.** Ribeirão Preto, v.13, n.2, p. 113 -117, 2002.

ESTRELA, C.; PÉCORA, J.D. **Mecanismo de ação do hidróxido de cálcio.** Pró-Reitorias de Graduação e Pós-Graduação da USP em 04 de novembro de 1997. Disponível em:< [www.forp.usp.br](http://www.forp.usp.br) >. Acesso em 15 de novembro de 2013.

FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C.P da. Manual prático para a compostagem de biossólidos. Universidade Estadual de Londrina, 1999. Ed. **Prosab/Finep**, p. 1-91.

FERREIRA, A.C.; ANDREOLI, C.V. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto. In : ANDREOLI, C.V (Coord.). **Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Curitiba: Prosab, 1999, Cap. III, p. 21-26.

FERREIRA, D. F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium.** Lavras, v.6, p.36-41, 2008.

FIA, R.; MATOS, A.T. de.; AGUIRRE, C.I. Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caleado. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, MG, v.13, n.4, 287-299, out/dez., 2005.

GONZÁLES, A.A. RODRÍGUEZ, J.A.; BARRIOS, J.A.C.; MAYA, C. Evaluación Del tratamiento de lodo fisicoquímico com ácido acético y peracético para producir biosólidos. Congreso Nacional Femisca. 2002. “**Uma Gestión Ambiental por el Bien Del Planeta**”, 8., 2002, Tomo I, Anais, p.251- 255.

GHINI R. Desinfestação do solo com o Uso da Energia Solar. **Solarização e coletor solar.** Jaguariúna: Embrapa- CNPMA, 29p, 1997.

GHINI R. **Solarização do solo.** Jaguariúna: Embrapa- CNPMA, 4 p., setembro de 2001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2008, 219 p.

KALIL, E.M.de.; COSTA, A.J.F. da. Desinfecção e esterilização – Artigo de revisão e atualização. **Acta Ortopédia Brasileira**, São Paulo, v 2, 4 p., out/dez, 1994.

KOWAL, N.E. Health effects of land application of municipal sludge. Pub. No.: EPA/600/1-85/015. Researc Triangle Park, NC: U.S. **EPA Health Effects Research Laboratory**, 1985.

LIMA, M. R. P. ; CUNHA, E. R. Q. ; PRETTI, M. C. ; ALEM SOBRINHO, P. . Lodo de Esgoto - Melhoria das suas Características para Disposição na Agricultura. In: **24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2007, Belo Horizonte. ABES, Rio de Janeiro, 2007.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** 2010, 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MATOS, A. T. de.; MATOS, M. P. de. Dose de Cal Hidratada e Características Químicas de um Lodo de Esgoto Doméstico Submetido à Caleação. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v. 20, n. 4, p. 357-363, jul./agost.2012.

MACEDO, J.A.B. Águas e Águas. 2 ed. São Paulo: Varela, 2004.

MENDES, P.C. **Gênese e estrutura espacial das chuvas na cidade de Uberlândia – MG.** 2001, 250 f. Dissertação (Mestrado em geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

MENDEZ, J.M.C. **Estabilizacion alcalina de lodos com um elevado contenido de patógenos.** 2003, 150 f. Tese (Doutorado em Ingeniera Ambiental)- DEPFI-UNAM, México, 2003.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto com fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.) **Impacto Ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 109-141.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. O uso agrícola do bioassólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P.; HESPAÑHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (ed.). **Bioassólidos na agricultura.** São Paulo: SABESP, p.289-363, 2001.

MELO, W. J. de.; MELO, G. M. P. de.; MELO, V. P. de.; BERTIPAGLIA, L. M. A. A resolução Conama n. 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 n. 375 do Conama.** Botucatu, Fepaf, p. 113- 136, 2010.

MIYAGI, F.; TIMENESTSKY, J.; ALBERTHUM, F. Avaliação da contaminação bacteriana em desinfectantes de uso domiciliar. **Revista de saúde pública**, São Paulo, v. 34, n.5, p.444-448, 2000

NELSON, K.L. Concentrations and inactivation of Ascaris eggs and pathogen indicator organisms in wastewater stabilization pond sludge. **Water Sci. Technology**, Berkeley v. 48, p. 89- 95, 2003.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J. C. L. Fertilidade do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.** 1017 p. Viçosa, MG. 2007.

OLIVEIRA, D.D.; SILVA, E.N. Salmonela em ovos comerciais: Ocorrência, condições de armazenamento e desinfecção da casca. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia.** Belo Horizonte, v. 52, n.6, p.655-661, dez/2000.

PEDROZA, M.M.; VIEIRA, G.E.G.; SOUSA, J.F.; PICKLER, A.C.; LEAL, E.R.M.; MILHOMEN, C.C. Produção e tratamento de lodo de esgoto. Uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.11. n-16, p.89-188, jul/dez., 2010.

PÉREZ, J.A.B.; CISNEROS, B.E.J.; RENDÓN, C.M. Tratamiento ácido de lodos residuales fisicoquímicos para reducir el contenido de microorganismos. **XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

PINTO, M.T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgoto: Tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Desa- UFMG, Cap. 6, p. 261-297, 2001

PINTO, M.P. **Avaliação da eficácia de dois protocolos de higienização em áreas de produção de alimentos de um supermercado**. 134 f. Dissertação (Mestrado em microbiologia dos alimentos). Programa de pós- graduação em microbiologia agrícola e do ambiente, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 97p.

ROCHA, A.L.C.L. **Higienização de lodo anaeróbio de esgoto por meio alcalino estudo de caso da ETES Lages – Aparecida de Goiânia-GO**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Programa de pós- graduação em engenharia do ambiente da Universidade Federal de Goiás, 2009.

ROE, A. J.; BYRNE, C.; MCLAGGAN, D.; BOOTH, I.R. Inhibition of Escherichia coli growth by acetic acid: a problem with methionine biosynthesis and homocysteine toxicity. **Microbiology**, Reino Unido, v. 148, p. 2215-2222, 2002.

RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: IAC, 2001. 285p.

SILVA, J.O.de. **Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE- Uberlândia-MG**. 66 p. Dissertação (Mestrado em Química). Programa de Pós – Graduação em Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SILVA, F. de. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Versão do programa computacional ASSISTAT para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p.71-78, 2002.

SILVA, S.M.C.P. da.; FERNANDES, F.; SOCOL, V.T.; MORITA, D.M. Principais Contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F (Ed.). **Lodos de Esgotos: Tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Desa- UFMG, Cap. 3, p. 69-121, 2001.

SIDHU, J. P. S.; TOZE, S.G. Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review. **Environment International**, v. 35, p.187-201, 2009.

SÍGOLO, J.B.; PINEHIRO, C. H. R. Lodo de Esgoto da ETE- Barueri – SP: Proveniência do Enxofre Elementar e Correlações com Metais Pesados Associados. Geologia USP, **série científica**, São Paulo, v. 10, n.1, p- 30-51, mar., 2010.

SOUZA, J.B.; DANIEL, L.A. Comparação entre hipoclorito de sódio e ácido peracético na inativação de *E. coli*, colifagos e *C. Perfringens* em água com elevada concentração de matéria orgânica. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Artigos técnicos vol. 10 – nº 2, abr- jun de 2005. p. 111- 117

SOCCOL, V.T.; PAULINO, R.C.; CASTRO, E.A. de. Metodologia para análise parasitológica em lodo de esgoto.In: ANDREOLI, C.V.; BONNET, B.R.P (Coord.). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. Curitiba: Sanepar, 2000, p. 27- 41.

SOARES, A.C.; GERBA, C.P.; JOSEPHON, K.L.; PEPPER I L. Effect of anaerobic digestion on the occurrence of enteroviruses, giárdia cysts and indicator bacteria in sewage sludge. Paper presented at IAWPRC conference, 1992. Washington DC.

SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2011**. Ministério das Cidades, Brasília, p. 432, junho de 2013.

SPERLING, M.V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, v.1, p. 452, 2005.

SPERLING, M.V.; GONÇALVES, R.F. Lodo de Esgotos: Características e Produção. In: ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: Tratamento e Disposição Final**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA- UFMG, Belo Horizonte, p 17- 67, 2001.(Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

TCHOUANOGLOUS, G. Integrated Solid Waste Management – Engeneering Principles and Management Issues.Ed. **McGrow Hill**. New York, USA; 1993

TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPAÑHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 468p. 2002.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Method 1681: Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple- Tube Fermentation using A-1 medium**. Office of Water, 45 p. EPA- 821-R-06-013, Washigton, DC 20460, july,2006.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Environmental regulations and technology. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge**. Office of research and development, 152p. EPA/625/R-92/013, Washigton, DC 20460, December, 1992. Helmintos

WHO, WORD HEALTH ORGANIZATION. **Drinking Water Quality Guidelines**, 2011, USA.

WHO, WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health Guidelines for the use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture**. Report of a WHO Scientific Group. Geneva. (WHO, Technical Report Series n. 778), 1989

YAMANE, L.H. **Avaliação da higienização do resíduo de caixa de areia de estações de tratamento de esgoto**. 2007,148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

## **APÊNDICE A**

### **RESUMO DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA DOS DADOS RELATIVOS AOS PARÂMETROS AGRÔNOMICOS**

**QUADRO 1.** Resumo da análise de variância para atributos agronômicos no lodo de esgoto

Fonte de Variação	G.I	Quadrado médio					
		pH	M.O	C	N	Na	Mg
Tratamento	4	201,73*	98660,69*	33194,65*	457,81*	26,02*	0,032*
Bloco	3	1,27 <sup>NS</sup>	407,47 <sup>NS</sup>	137,10 <sup>NS</sup>	25,70 <sup>NS</sup>	0,03 <sup>NS</sup>	0,0028 <sup>NS</sup>
Resíduo (a)	12	2,85	2691,34	905,50	25,05	0,04	0,0014
Época	2	4,37*	625,01 <sup>NS</sup>	210,27 <sup>NS</sup>	39,27 <sup>NS</sup>	0,13 <sup>NS</sup>	0,00092 <sup>NS</sup>
Tratamento*época	8	4,01 <sup>NS</sup>	1988,17 <sup>NS</sup>	668,94 <sup>NS</sup>	23,38 <sup>NS</sup>	0,05 <sup>NS</sup>	0,0018 <sup>NS</sup>
Resíduo (b)	30	9,22	3158,49	1062,69	17,06	0,03	0,0017
Fat. x testemunha	1	0,48 <sup>NS</sup>	7193,71 <sup>NS</sup>	2420,38	5,78 <sup>NS</sup>	1,97*	0,0204*
Coeficiente de variação I	5,43	9,79	9,79	16,01	12,71	11,52	12,17
Coeficiente de variação II	6,17	10,60	10,60	13,22	12,73	12,44	14,26

G.I – Grau de liberdade; NS= Não significativo; \*Significativo a 5% pelo teste F.

**QUADRO 2.** Resumo da análise de variância para atributos agronômicos no lodo de esgoto

Fonte de Variação	G.I	Quadrado médio					
		Ca	Mn	P	K	S	Fe
Tratamento	4	1823,24*	769,93 <sup>NS</sup>	1,43*	0,002 <sup>NS</sup>	1,42*	543220661,23 <sup>NS</sup>
Bloco	3	24,77 <sup>NS</sup>	341,30 <sup>NS</sup>	0,002 <sup>NS</sup>	0,001 <sup>NS</sup>	0,69 <sup>NS</sup>	94539214,72 <sup>NS</sup>
Resíduo (a)	12	21,62	237,44	0,044	0,0009	0,21	58706867,92
Época	2	4,07 <sup>NS</sup>	850,21 <sup>NS</sup>	0,0732 <sup>NS</sup>	0,00008 <sup>NS</sup>	0,95*	45428369,81 <sup>NS</sup>
Tratamento*época	8	36,52 <sup>NS</sup>	195,13*	0,083 <sup>NS</sup>	0,0011 <sup>NS</sup>	0,49 <sup>NS</sup>	78813966,17 <sup>NS</sup>
Resíduo (b)	30	28,86	191,55	0,040	0,000545	0,24	84061434,50
Fat. x testemunha	1	157,02*	75,37 <sup>NS</sup>	0,145 <sup>NS</sup>	0,00098 <sup>NS</sup>	2,07*	76706122,67 <sup>NS</sup>
Coeficiente de variação I		56,70	11,81	27,30	34,48	26,71	46,38
Coeficiente de variação II		65,52	10,61	26,20	26,28	29,03	55,50

G.I – Grau de liberdade; NS= Não significativo; \*Significativo a 5% pelo teste F.