

FERNANDA RIVELLI DE PAIVA

**RESÍDUOS ALCALINOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE PARA HIGIENIZAÇÃO  
DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2015

T

P149r  
2015 Paiva, Fernanda Rivelli de, 1988-  
Resíduos alcalinos da indústria de celulose para higienização do  
lodo de esgoto sanitário / Fernanda Rivelli de Paiva. - Viçosa, MG,  
2015.  
xii, 56f. : il. ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Ana Augusta Passos Rezende.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.50-55.

1. Lodo residual. 2. Higienização. 3. Resíduos industriais  
- Reaproveitamento. 4. Indústria de celulose. I. Universidade Federal  
de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Civil. II. Título.

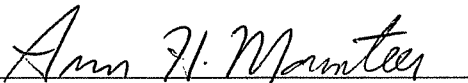
CDD 22. ed. 628


FERNANDA RIVELLI DE PAIVA

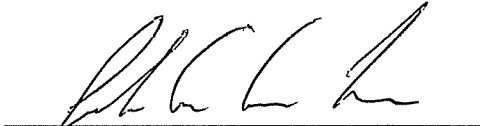
**RESÍDUOS ALCALINOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE PARA HIGIENIZAÇÃO  
DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de novembro de 2015.

  
Ann H. Mounteer  
(Coorientadora)

  
Cláudio Mudadu Silva  
(Coorientador)

  
Júlio César Lima Neves

  
Ana Augusta Passos Rezende  
(Orientadora)

*“Antes do compromisso, há hesitação, a oportunidade de recuar, a ineficácia permanente.*

*Em todo ato de iniciativa (e de criação), há uma verdade elementar cujo desconhecido destrói muitas ideias e planos esplêndidos: no momento em que nos comprometemos de fato, a Providência também age.*

*Ocorre toda espécie de coisas para nos ajudar, coisas que de outro modo nunca ocorreriam.*

*Toda uma cadeia de eventos emana da decisão, fazendo vir em nosso favor todo tipo de encontros, de incidentes e de apoio material imprevisto que ninguém poderia sonhar que surgiria em seu caminho.*

*Começa tudo o que possas fazer, ou que sonhas poder fazer.*

*A ousadia traz em si o gênio, o poder e a magia.” GOETHE*

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos aqueles que acreditaram em mim e ajudaram a transformar meus sonhos em realidade, sem vocês não seria possível chegar até aqui.

Agradeço a Deus pelas experiências conquistadas.

Aos meus pais Luis e Maria do Carmo, pela boa educação e ensinamentos.

Aos meus irmãos, Alan e Amanda pelo incentivo e torcida.

À professora Ana Augusta, pela oportunidade, amizade, confiança e orientação.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar este curso.

Aos professores Cláudio Mudadu Silva e Ann H. Mounteer pela ajuda e pelos aconselhamentos durante a realização deste trabalho.

Ao professor Júlio César Lima Neves e ao meu amigo Mateus Rodrigues pelo auxílio nos estudos estatísticos.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

À equipe do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), que disponibilizou parte do seu tempo e sua experiência na área.

Aos amigos, Rafles da Mata, Nayara Avelar e Benício Ribeiro, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao químico responsável pelo laboratório de Celulose e Papel/Meio Ambiente Luís Eduardo do Nascimento pela gentileza e apoio.

Ao laboratorista responsável pelo laboratório de Mineralogia do Departamento de Solos da UFV José Francisco Dias (Chico) e à doutoranda Rafaella Campos pela ajuda com as análises mineralógicas para caracterização do biossólido.

A todos os amigos pelo companheirismo e a certeza de que as conquistas não são frutos apenas dos esforços individuais.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo Geral .....	3
2.2. Objetivos Específicos .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Processo de fabricação de polpa celulósica e geração de resíduos.....	4
3.1.1. Classificação e caracterização dos resíduos .....	7
3.1.2. Disposição final e possíveis usos dos resíduos alcalinos .....	8
3.2. Esgoto sanitário .....	11
3.2.1. Processos de tratamento de esgotos sanitários .....	11
3.2.2. Produção de lodo em processos de tratamento de esgotos .....	14
3.2.3. Classificação e caracterização do lodo biológico .....	15
3.2.4. Microrganismos patogênicos.....	16
3.2.5. Processos de tratamento do lodo biológico .....	17
3.2.6. Processo de higienização química do lodo de biológico mediante caleação.....	21
3.2.7. Disposição final do lodo biológico.....	24
3.2.8. Aspectos legais da utilização agrícola do lodo .....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1. Descrição e preparo dos materiais.....	31
4.1.1. Resíduos alcalinos gerados no processo de fabricação de polpa celulósica (processo kraft) .....	31
4.1.2. Lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário.....	33
4.1.3. Cal hidratada.....	34
4.2. Desenvolvimento e monitoramento do experimento.....	35
4.3. Delineamento experimental.....	38

4.4.	Análises laboratoriais .....	39
4.4.1.	Análises físicas e químicas .....	39
4.4.2.	Análises microbiológicas.....	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
5.1.	Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos monitorados durante o processo de higienização química do lodo com a utilização de dregs, grits e cal.....	40
5.1.1.	Temperatura.....	40
5.1.2.	pH .....	42
5.1.3.	Coliformes Totais e <i>E. coli</i> .....	44
5.2.	Avaliação dos aspectos referentes a caracterização do potencial agrônomo do biossólido higienizado com os resíduos de dregs e grits.....	45
6.	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS .....	50
	ANEXO: RESULTADOS PARA O TESTE F E SCOTT KNOTT.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma do ciclo de recuperação do licor e geração dos resíduos sólidos.....	5
Figura 2- Ilustração esquemática de um reator UASB.....	13
Figura 3- Resíduo grits sem triturar (a), grits triturado (b), dregs sem triturar (c) e dregs triturado (d). ....	33
Figura 4- Lodo no leito de secagem após 18 dias.....	34
Figura 5- Estufa agrícola (a), mistura (resíduo+lodo) (b) e unidades experimentais (c).....	36
Figura 6- Variação da temperatura com a utilização de dregs, grits, cal e lodo.....	38
Figura 7- Monitoramento da temperatura.....	41
Figura 8- Monitoramento da temperatura.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Geração de resíduos sólidos (base seca) na fabricação de polpa celulósica.....	6
Tabela 2- Caracterização química do dregs.....	7
Tabela 3- Caracterização química do grits.....	8
Tabela 4- Teores de sólidos totais, carbono e nutrientes encontrados em lodos gerados em diferentes processos de tratamento (% matéria seca).....	16
Tabela 5- Comparação entre a quantidade de nutrientes em fertilizantes comerciais e lodos biológicos.....	25
Tabela 6- Caracterização agrônômica de lodo tratado por caleação.....	25
Tabela 7- Tipo de lodo ou produto derivado segundo a patogenicidade.....	26
Tabela 8- Especificações das garantias nas classes de composto orgânico.....	28
Tabela 9- Limites de metais pesados para aplicação de biossólido e seus derivados no solo.....	29
Tabela 10- Teores permissíveis de metais pesados ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) no composto orgânico em alguns países, base seca à 65 °C.....	29
Tabela 11- Caracterização química da amostra de grits utilizada no experimento.....	31
Tabela 12- Caracterização química da amostra de dregs utilizada no experimento.....	32
Tabela 13- Caracterização da cal.....	34
Tabela 14- Resultados do monitoramento de <i>E. coli</i> coliformes totais (CT).....	44
Tabela 15- Caracterização química dos biossólidos produzidos após a mistura com resíduo alcalino (dregs ou grits) ou mistura com a cal.....	46
Tabela 16- Caracterização química dos biossólidos produzidos após a mistura com resíduo alcalino (dregs ou grits) ou mistura com a cal.....	46
Tabela 17- Concentrações de metais encontradas nas amostras dos biossólidos.....	47
Tabela 18- Concentrações de metais encontradas nas amostras dos biossólidos.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CENIBRA	Celulose Nipo-Brasileira S.A
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CT	Coliformes totais
CTC	Capacidade de troca catiônica
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
USEPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
LESA	Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental
MgO	Óxido de magnésio
M.O	Matéria Orgânica
NMP	Número mais provável
pH	Potencial Hidrogeniônico
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
ST	Sólidos Totais
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>
UFF	Unidade formadora de floco
UFV	Universidade Federal de Viçosa

## RESUMO

PAIVA, Fernanda Rivelli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2015. **Resíduos alcalinos da indústria de celulose para higienização de lodo de esgoto sanitário.** Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende. Coorientadores: Cláudio Mudadu Silva e Ann H. Mounteer.

O gerenciamento ambiental adequado dos resíduos sólidos industriais pode permitir sua utilização como matéria-prima para outros processos, como por exemplo, na higienização química de lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário. Este trabalho envolveu a utilização de resíduos alcalinos, dregs e grits, gerados no processo kraft de produção de polpa celulósica, na higienização química de lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário. O objetivo foi atingir os padrões para lodo Classe A (Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375/2006), que possibilita o uso do material na agricultura. Inicialmente, os resíduos alcalinos foram caracterizados de modo a permitir visualizar possíveis usos e avaliar a eficiência destes no processo de higienização química do lodo biológico em substituição à cal. As eficiências obtidas para a redução de patógenos sob o efeito de diferentes doses de dregs, grits e cal, objetivando futura aplicação no solo, foram avaliadas conforme disposto na Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375/2006. Foi realizado experimento constituído por doses de dregs, grits e cal misturadas ao lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário em reatores UASB, nas proporções de 0%, 30%, 40% e 50% (em massa seca de lodo), e ainda para a cal foram utilizadas as proporções de 10% e 60%. O processo de higienização foi montado em 36 unidades experimentais constituídas por sacos plásticos com capacidade para 40 L e monitorados durante 31 dias em estufa agrícola revestida em lona plástica translúcida para impedir a penetração de água e possibilitar a penetração da radiação solar. Durante esse tempo, foram monitorados os parâmetros pH e temperatura e realizadas análises de coliformes totais e *E.coli*. Ao final do processo de higienização química do lodo, foram realizadas análises para determinação do seu potencial agronômico. A utilização dos resíduos alcalinos foi eficiente na higienização química do lodo biológico, houve eliminação de *E.coli* em 5 dias após a mistura (resíduo+lodo), atingindo valores menores ao estipulado pela Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375/2006 para lodo de esgoto tipo A, de 10<sup>3</sup> NMP/g de ST. O aumento da concentração de resíduos alcalinos e cal provocaram redução do teor de carbono orgânico, de macro (N e K) e de micronutrientes (Mn, Zn e Cu) e perdas de

nitrogênio por volatilização da amônia. Obteve-se um lodo higienizado com qualidade que atende aos requisitos para seu uso agrícola, quanto aos limites de metais pesados definidos pela padrões Resolução CONAMA n<sup>o</sup>375/2006.

## ABSTRACT

PAIVA, Fernanda Rivelli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2015. **Alkaline waste from the pulp industry for sewage sludge cleaning.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende. Co-advisers: Cláudio Mudadu Silva and Ann H. Mounteer.

The appropriate environmental management of industrial solid waste may allow its use as feedstock to other processes, such as sludge chemical cleaning in biological waste water treatment of sewage. This study involved the use of alkaline wastes, dregs and grits, generated in the Kraft pulp production process, for the sludge chemical cleaning from biological treatment of sewage. The intention was to meet the standards for Class A sludge, according to the Resolution n<sup>o</sup> 375/2006 CONAMA. Initially, alkaline wastes were characterized allowing to find possible uses and to evaluate the efficiency of the chemical cleaning process of the biological sludge in place to the lime. The efficiencies obtained for the reduction of pathogens under the effect of different doses of dregs, grits and lime, aiming future application on the ground were assessed as provided in Resolution n<sup>o</sup> 375/2006 CONAMA. Experiment was conducted of doses of dregs, grits and lime mixed with biological sludge from sewage treatment in UASB reactors, in proportions of 0%, 30%, 40% and 50% (by mass dry sludge), and for the lime were used the proportions of 10% and 60%. The cleaning process was set up on 36 experimental units consisting of plastic bags with a capacity of 40 L and monitored during 31 days in a greenhouse. During that time, were monitored pH and temperature and performed analyzes total coliforms and *E. coli*. At the end of sludge chemical cleaning process, analyzes were performed to determine their agronomic potential. The use of alkaline wastes in chemical cleaning is efficient biological sludge disposal of *E. coli* was in 5 days after the mixture (sludge + residue) reaching lower values stipulated by the Resolution n<sup>o</sup> 375/2006 CONAMA for sewage sludge type A, 10<sup>3</sup> MPN/g ST. Increasing the concentration of alkali and lime residues decreased the organic carbon content macro (C and K) and micronutrients (Mn, Zn and Cu) and nitrogen losses by volatilization of ammonia. This yields a sludge sanitized with quality that meets the requirements for its agricultural use.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se verificado o crescimento na produção das indústrias de polpa celulósica, acarretando conseqüentemente aumento no volume de resíduos gerados. Diante desta questão preocupante, o adequado gerenciamento ambiental destes resíduos se torna cada vez mais importante, garantindo uma disposição sustentável, além da minimização dos impactos ambientais.

Os principais resíduos sólidos gerados no processo de produção de polpa celulósica correspondem aos lodos primário e biológico, advindos do tratamento de efluentes, às cascas sujas de eucalipto, lama de cal, às cinzas das caldeiras de biomassa e recuperação e aos resíduos alcalinos de sua da planta de caustificação (dregs e grits), além dos rejeitos da depuração da polpa marrom e branqueada, resíduos provenientes dos escritórios, restaurantes, oficinas e obras civis.

As indústrias estão dando atenção a três pontos considerados relevantes no que se refere à geração de resíduos: a fonte geradora, a transformação em novos produtos e a utilização dos seus resíduos como matéria-prima para outros processos ou tipologias industriais.

Os aterros industriais são as alternativas mais utilizadas pelas empresas para disposição dos seus resíduos, no entanto, esta opção é indesejável em função dos altos custos para a sua implantação e manutenção, além da exigência de cuidados especiais no manuseio, tendo em vista os riscos de contaminação ambiental.

Diante da necessidade de aproveitamento destes resíduos, idéias interessantes de utilização dos resíduos gerados pelas indústrias de polpa celulósica, mais especificamente dos resíduos alcalinos dregs e grits, têm sido pesquisadas e muitas se mostram viáveis e eficientes, podendo constituir em benefício econômico e ambiental.

Uma possível alternativa para o uso dos resíduos alcalinos, dregs e grits, gerados no processo kraft da indústria de celulose, é a sua utilização no processo de higienização química de lodo gerado no tratamento biológico de esgoto sanitário, em função da similaridade de sua composição química com a cal utilizada no processo denominado caleação do lodo.

O lodo biológico, resultante do tratamento biológico de esgoto sanitário, é rico em matéria orgânica e nutrientes, e necessita de tratamento e disposição final adequada. Embora represente apenas de 1% a 2% do volume de esgoto tratado, a produção de lodo já se tornou um problema que, além de acumular passivos ambientais, pode representar de 20% a 60% dos custos operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001).

Uma alternativa ambientalmente viável para o problema da disposição do lodo é a sua utilização na agricultura. Para isso, é necessário que o lodo atenda os parâmetros de qualidade dispostos na Resolução CONAMA nº 375 (CONAMA, 2006).

O risco sanitário do uso do lodo pode ser minimizado por meio da adoção de técnicas de higienização, que proporcionem a eliminação dos organismos patogênicos presentes. Dentre os processos de higienização do lodo, a caleação é um dos mais difundidos, o que é decorrente, principalmente, do seu baixo custo e facilidade de aplicação.

A caleação é um tratamento químico, em que se adiciona cal ao lodo, de forma a elevar seu pH até valores superiores a 12, condição na qual ocorre a inativação ou destruição de grande parte dos agentes patogênicos, além de proporcionar a estabilização química e redução do odor do lodo (SANEPAR, 1997).

Diante da necessidade de se possibilitar melhores formas para a disposição dos resíduos gerados pelas indústrias de polpa celulósica, e tendo em vista ainda, a necessidade de se promover a higienização do lodo biológico, esta pesquisa pretende estudar a utilização de resíduos alcalinos, dregs e grits, no processo de higienização química de lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Estudar a utilização de resíduos alcalinos da indústria de polpa celulósica para o processo de higienização química de lodo gerado no tratamento biológico de esgoto sanitário.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar os resíduos alcalinos da indústria de polpa celulósica: dregs e grits;
- Monitorar parâmetros físicos, químicos e microbiológicos durante o processo de higienização química do lodo com a utilização de dregs, grits e cal;
- Comparar o efeito de diferentes doses de dregs e grits no processo de higienização química do lodo biológico em substituição à cal hidratada;
- Avaliar a qualidade nutricional e microbiológica do lodo higienizado com dregs e grits para aplicação no solo, conforme disposto na Resolução CONAMA nº 375/2006.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Processo de fabricação de polpa celulósica e geração de resíduos

O processo industrial de produção da polpa celulósica, como outro qualquer, é uma atividade geradora de resíduos de diversas características. De acordo com Morris e Nutter (1996), as indústrias de polpa celulósica que utilizam o processo kraft apresentam os mesmos estágios de produção e geram sete tipos distintos de resíduos: lodos primário e secundário, rejeitos de madeira, lama de cal, dregs, grits, e cinza de forno.

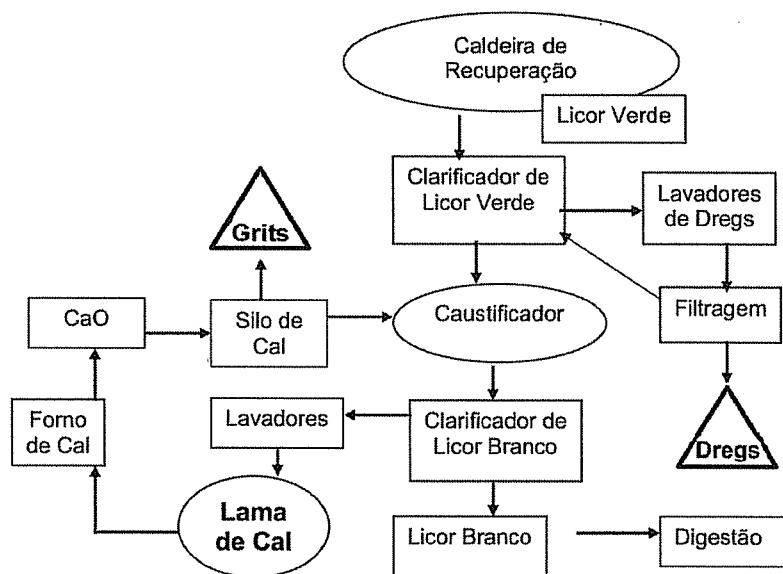
Atualmente, quase a totalidade da produção da polpa celulósica baseia-se no processo kraft, também conhecido como processo “Sulfato” em função da utilização do sulfato de sódio, sendo utilizados compostos químicos de sulfetos e hidróxido de sódio.

Segundo Piotto (2003), o processo de produção de polpa celulósica pode ser entendido em quatro partes principais: (i) preparação de matérias-primas; (ii) deslignificação química em circuito fechado, recuperando-se energia; (iii) branqueamento com circuito aberto; (iv) sistema de tratamento de águas residuárias.

No processo de produção de polpa celulósica, o sistema de recuperação química visa à recuperação dos compostos químicos inorgânicos, queima dos compostos orgânicos para a geração de energia e, ainda, a recuperação de subprodutos orgânicos vendáveis (PIOTTO, 2003). Segundo a descrição do sistema por este autor, as principais unidades que compõe a recuperação química são: evaporação do licor negro, incineração do licor na caldeira de recuperação, caustificação e regeneração de cal.

Nas indústrias que utilizam o processo kraft para extração de celulose, os resíduos recebem as denominações técnicas de dregs, grits, além da lama de cal e lodo da estação de tratamento de efluentes líquidos.

A Figura 1 demonstra o fluxograma do ciclo de recuperação do licor e geração dos resíduos sólidos.



**Figura 1-** Fluxograma do ciclo de recuperação do licor e geração dos resíduos sólidos.  
**Fonte:** adaptado de Maltz *et al.* 1999.

O processo kraft se inicia no pátio de madeira, onde a matéria- prima é recebida na forma de toras de madeiras. As toras são processadas em descascadores e depois encaminhadas aos picadores, onde são transformadas em cavacos com dimensões adequadas para o processo de polpação. Nessa etapa, há a geração de resíduos lenhosos como: as cascas de madeira no descascamento, a serragem e os cavacos super dimensionados, rejeitados no peneiramento após os picadores, e que podem retornar a etapa de picagem (GUERRA, 2007).

Os cavacos provenientes dos picadores são, então, enviados para o processo de separação das fibras conhecido por polpação ou cozimento, sendo efetuado por meios químicos. Nesse processo, os cavacos de madeira são aquecidos em um digestor juntamente com licor de cozimento (licor branco), solução aquosa constituída de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, que sob o efeito de pressão e temperaturas entre 160 e 180 °C levam a despolimerização e dissolução das moléculas de lignina (MORAIS, 2006).

Durante o cozimento ocorre separação das fibras de celulose e hemicelulose de outros componentes presentes na madeira, como lignina e os extrativos. A polpa marrom é separada do licor de cozimento, agora chamado de licor negro, através de lavagens nos depuradores, e enviada para a etapa de branqueamento.

Na etapa de branqueamento, a lignina e outros compostos causadores de cor são removidos e, ou, alterados por meio da ação de agentes de branqueamento, normalmente oxidantes químicos e/ou enzimas.

Nesta etapa, é gerado o maior volume de efluentes líquidos com alta carga orgânica, devido à presença de materiais oriundos da própria matéria-prima, a madeira. Os resíduos produzidos em maior quantidade são: cinza de caldeira, resíduos de celulose e lama de cal.

Após a etapa de branqueamento, a polpa branqueada segue para as torres de estocagem de alta consistência, localizadas nas áreas de branqueamento. Daí, a polpa branqueada é conduzida para o tanque intermediário de pasta, de onde é bombeada para os tanques das máquinas de secagem, seguindo para as caixas de entrada das máquinas de secagem, onde é obtida uma folha contínua de celulose com teor seco de 90% (MENELI, 2013).

O licor negro, extraído da etapa de cozimento e pré-branqueamento é enviado para o sistema de recuperação dos químicos, com a finalidade de reaproveitar estes produtos e utilizar os sólidos orgânicos dissolvidos da madeira como fonte de energia nas caldeiras de recuperação. Durante o processo de recuperação química são gerados três resíduos sólidos, o dregs, o grits e a lama de cal (GUERRA, 2007).

A Tabela 1 mostra a geração de alguns resíduos sólidos em uma indústria de polpa celulósica.

**Tabela 1-** Geração de resíduos sólidos (base seca) na fabricação de polpa celulósica.

<b>Resíduo</b>	<b>Geração específica kg/tSA*</b>	<b>t. ano<sup>-1</sup></b>
Fibras (tratamento primário)	12,7	14.802
Fibras (depurações UKP** e BKP***)	13,8	16.086
Cinzas dos precipitadores (caldeira de biomassa)	4,7	5.438
Moinha de carvão (caldeira de biomassa)	8,5	9.898
Lama de cal	3,8	4.411
Dregs	31,1	36.182
Grits	8,9	10.389
<b>Total</b>	<b>83,7</b>	<b>97.206</b>

**Nota:** \* kg/tSA: tonelada seca ao ar, \*\* UKP: Unbleach Kraft Pulp; \*\*\* BKP: Bleach Kraft Pulp

**Fonte:** Cenibra (2009).

A partir dos dados apresentados na Tabela 1, pode-se verificar a grande quantidade de resíduos produzidos em indústrias de produção de polpa celulósica. Os resíduos, em

relação ao processo de produção são caracterizados como rejeitos, ou seja, sub-produtos do processo que não se tem aplicações dentro do fluxograma produtivo. Dessa forma, torna-se necessário um gerenciamento dos resíduos gerados, por meio de reutilização ou simplesmente disposição final.

Vislumbra-se, portanto, a necessidade de estudos que visem o aprimoramento das formas de destinação, bem como a busca de novas formas de disposição e reusos destes resíduos, a fim de promover um gerenciamento mais adequado e garantindo uma disposição sustentável, além da minimização dos impactos ambientais.

### 3.1.1. Classificação e caracterização dos resíduos

Os principais resíduos sólidos gerados no processo de produção de polpa celulósica correspondem ao lodo biológico advindo do tratamento de efluentes, às cascas de eucalipto, à lama de cal ( $\text{CaCO}_3$ ) e os materiais alcalinos de sua da planta de caustificação (dregs e grits), além dos rejeitos da depuração da polpa marrom e branqueada, entulhos de obras civis, lixo institucional. Todos estes resíduos são considerados como de Classe II- A (não perigoso e não-inertes) pela NBR 10004 (ABNT,2004a).

Os resíduos de interesse desta pesquisa são advindos da planta de caustificação, denominados, dregs e grits. Na seqüência é apresentada a caracterização química de dregs e grits, tabelas 2 e 3, respectivamente, encontrada por diferentes autores em diferentes indústrias de polpa celulósica.

**Tabela 2-** Caracterização química do dregs.

Parâmetros	Almeida <i>et al.</i> 2007	Zambrano <i>et al.</i> 2007	Cabral <i>et al.</i> 2008	Martins <i>et al.</i> 2007
pH	---	12,78	12,8	---
Ca (%)	35,41	23	24,95	32,39
Al (%)	---	---	0,25	0,38
Mg (%)	0,92	2,95	3,54	1,41
Fe (%)	0,3	0,98	0,41	1,01
Mn (%)	0,48	0,82	0,472	0,86
P (%)	---	0,28	0,16	0,14
Na (%)	0,1	3,55	7,08	1,16
S (%)	---	2,4	---	0,98
Cu (%)	0,00548	0,035	0,0081	---
Zn (%)	0,02355	0,14	0,016	---
K (%)	0,12	0,33	---	0,15

**Tabela 3-** Caracterização química do grits.

Parâmetros	Zambrano <i>et al.</i> 2007	Cabral <i>et al.</i> 2008	Martins <i>et al.</i> 2007
pH	12,73	12,6	---
Ca (%)	30	41,72	34,62
Al (%)	0,26	0,17	1,72
Mg (%)	0,33	0,36	0,92
Fe (%)	0,11	0,22	1,03
Mn (%)	0,015	0,015	0,36
P (%)	0,3	0,17	0,47
Na (%)	0,92	1,04	6,44
S (%)	0,41	---	1,62
Cu (%)	0,0005	0,00046	---
Zn (%)	0,0004	0,0015	---
K (%)	0,11	0,08	0,43

Nota: (---) não informado.

Nas tabelas 2 e 3 apresentadas, percebe-se que as concentrações de elementos químicos presentes nos resíduos não apresentam grandes variações de um autor para outro. Denota-se também, considerável presença de cálcio (Ca), motivo pelo qual oportuna-se sua possível utilização no processamento da higienização química do lodo biológico, em termos de substituição da cal, um procedimento chamado caleação do lodo.

### 3.1.2. Disposição final e possíveis usos dos resíduos alcalinos

As empresas de produção de polpa celulósica vêm buscando desenvolver estratégias para a gestão de seus resíduos sólidos, basicamente desenvolvendo ações pautadas nos pilares sustentabilidade ambiental no que diz respeito à redução, à reutilização e à reciclagem. Trabalhos desenvolvidos mostram que na maioria das vezes os resíduos alcalinos derivado da indústria de polpa celulósica são utilizados como corretivo de solo, em alguns casos utilizados para estabilização de estradas em florestas das próprias empresas, e ainda a considerável disposição destes resíduos em aterros industriais.

Acredita-se que a utilização e/ou reutilização destes resíduos como insumos de outros processos produtivos ou mesmo como insumos agrícolas, garante uma forma de destinação mais nobre, e potencialmente rentável, além do ganho ambiental, pelo aumento da vida útil do aterro industrial.

Algumas alternativas de destinação já foram estudadas e vem mostrando como uma opção viável e possível de utilização.

Neste contexto, Trigueiro (2006) realizou um trabalho com o objetivo de estudar o uso dos resíduos alcalinos, dregs e grits, como insumo agrícola na cultura do eucalipto. O trabalho foi desenvolvido com aplicações de doses dos resíduos e de adubo mineral convencional (NPK+ micronutrientes) de modo a avaliar seus efeitos nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, e no crescimento, nutrição e produção do eucalipto. De acordo com o autor, os resultados obtidos, possibilitaram concluir que os resíduos dregs e grits possuem alto poder de neutralização da acidez do solo, com isso a elevação do pH do solo proporcionou o aumento da disponibilização de alguns nutrientes, (N e S) e a redução de outros (micronutrientes). O autor aborda ainda que, devido ao alto teor de sódio e cálcio na composição do dregs e grits, sua aplicação em solos arenosos pode causar contaminação das águas subterrâneas pela lixiviação de sódio no perfil do solo e menciona que a atividade microbiana do solo diminuiu inicialmente com o uso de dregs e grits, mas aumentou significativamente após 17 meses da sua aplicação.

Trigueiro (2006) expõe que as doses de resíduos usadas nesse ensaio foram elevadas e causaram fitotoxidez nas folhas de eucalipto na fase inicial de seu desenvolvimento, porém, as maiores produtividades em volume de madeira com casca foram alcançadas com a aplicação da mistura dregs e grits em combinação com a adubação mineral. Diante desse fato e das observações feitas durante experimento, o autor recomenda que a dose para aplicação desses resíduos (dregs e grits) não ultrapassem  $4 \text{ t ha}^{-1}$ .

Medeiros (2008) realizou um experimento com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação do resíduo alcalino do processo de celulose (dregs) na calagem de um cambissolo para correção de acidez, para realização do plantio da cultura de feijão e trigo. O resultado obtido foi que a aplicação do resíduo alcalino aumentou os valores de pH, o teor e saturação por bases trocáveis, a capacidade de troca catiônica e a relação Ca/Mg e reduziu os teores e saturação por Al. A incorporação de resíduo reduziu o grau de flocculação, mas não modificou a distribuição do tamanho de poros do solo.

Outro trabalho, desenvolvido por Barretto (2008), o qual também utilizou resíduos do processo de produção de polpa celulósica, objetivou-se na avaliação do efeito de doses de composto dos resíduos, lodo biológico e não decomposto, dregs e grits, na fertilidade do

solo, no desenvolvimento, na produção de matéria seca e na concentração e acúmulo de nutrientes nas folhas de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*. Segundo o autor, a aplicação de composto de resíduos de indústria de polpa celulósica propiciou ganhos em altura aos 60 dias após o plantio, em diâmetro e em produção de biomassa das plantas de eucalipto aos 120 dias. Também resultou em aumento no valor de pH, Ca, Mg, P, K e Na no solo.

O trabalho desenvolvido por Teixeira (2003), que também visa à aplicação dos resíduos alcalinos da indústria de polpa celulósica, como corretivo de acidez do solo, revela que tais resíduos (dregs e grits) podem ser utilizados para este devido fim, correção de acidez, uma vez que o mesmo não apresenta efeitos significativos em atributos de solo, planta e água relacionados à qualidade ambiental.

Zambrano *et al.* (2007) utilizaram os resíduos alcalinos (dregs e grits) para estudar as influências quando incorporados na coluna de solos ácidos. Para esta verificação foi realizada a investigação das características físicas, químicas, da toxicidade, bem como das propriedades potenciais de lixiviação, periculosidade (inflamabilidade, reatividade, corrosividade) e toxicidade (devido aos compostos inorgânicos). Segundo os autores, os ensaios sobre os resíduos (dregs e grits) indicaram que os valores estão abaixo do padrão US EPA (US Environmental Protection Agency). Além disso, a caracterização físico-química, pH ( 12,76 ), Ca ( 26,5 % ), Mg ( 1,5 % ), P ( 0,28 % ) e K ( 0,20 % ), confirmou a sua potencial utilização em solos degradados. De acordo com os autores, o comportamento de uma série de colunas com solos ácidos e resíduos (proporção de 1:1) em doses de 2 e 6 g kg<sup>-1</sup> avaliada por um período 86 dias, mostraram que as características físico-químicas dos solos foram melhorados após a incorporação dos resíduos.

Zambrano *et al.* (2008) apresentam em sua pesquisa que a utilização dos resíduos do processo kraft para compostagem é viável. Segundo os autores, a adição dos resíduos de dregs não teve efeito significativo positivo sobre as atividades biológicas durante a compostagem. No entanto, uma quantidade moderada de escória (5 - 8%) seria a melhor proporção para otimizar o processo e obter composto de alta qualidade em 60-70 dias de operação .

Segundo Medeiros *et al.* (2009), a utilização dos dregs como corretivo de acidez em um cambissolo húmico alumínico, verificada por meio da resposta da cultura de trigo, se

mostrou correspondente à utilização do corretivo convencional (Calcário dolomítico). A aplicação superficial do resíduo alcalino melhorou os atributos químicos do solo, principalmente na camada superficial, com aumento do pH e dos teores de Ca e Mg, da relação molar entre Ca e Mg e do teor de Na, sem, entretanto, atingir o valor crítico de saturação da CTC por Na. A calagem superficial com resíduo ou calcário reduziu linearmente o grau de floculação das argilas na camada superficial do solo. Os teores de nutrientes nas plantas e a produtividade de grãos foram semelhantes entre os tratamentos com calcário ou resíduo, com respostas crescentes às doses dos corretivos.

### **3.2. Esgoto sanitário**

Os esgotos sanitários, também designados por diversos autores pelo termo “águas residuárias”, possuem características bem definidas, sendo constituídos basicamente de despejos domésticos e pequenas quantidades de águas pluviais, águas de infiltração, e, eventualmente, despejos industriais (JORDÃO e PESSOA, 2011).

O tratamento e a disposição adequada dos esgotos sanitários são de essencial importância no sentido em que estes podem contribuir para a proliferação de inúmeras doenças parasitárias e infecciosas. A importância do tratamento dos esgotos se dá não somente do ponto de vista epidemiológico, mas também pela preservação do meio ambiente, uma vez que, as substâncias presentes no esgoto podem exercer ação deletéria nos corpos d'água onde são lançados os esgotos sem o devido tratamento.

#### **3.2.1. Processos de Tratamento de Esgotos Sanitários**

Todo sistema de esgotamento sanitário encaminha seus efluentes, direta ou indiretamente, para corpos d'água receptores, formados pelas águas de superfície ou de subsolo. Um processo de tratamento de esgotos é constituído de um conjunto de operações unitárias capazes de estabelecer um grau de condicionamento aos esgotos compatível com os parâmetros de qualidade fixados para o corpo receptor. Numa Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), essas operações unitárias são empregadas para a remoção ou transformação das substâncias indesejáveis em outras aceitáveis (JORDÃO e PESSOA, 2011).

De acordo com Aisse *et al.* (2001), existem duas vias principais de biodegradação na natureza: a via aeróbia e a via anaeróbia:

- A biodegradação aeróbia é aquela realizada na presença de oxigênio, pelos organismos aeróbios ou facultativos. Os tratamentos aeróbios mais utilizados são as lagoas de estabilização aeróbias e facultativas e sistemas com injeção de ar (lodos ativados convencional, valos de oxidação, lodos ativados por aeração prolongada, etc.)
- A biodegradação anaeróbia é aquela realizada na ausência de oxigênio, pelos microorganismos anaeróbios ou facultativos. O processo de biodegradação anaeróbia começa a ocorrer quando o oxigênio dissolvido no esgoto já foi consumido pelos microorganismos aeróbios.

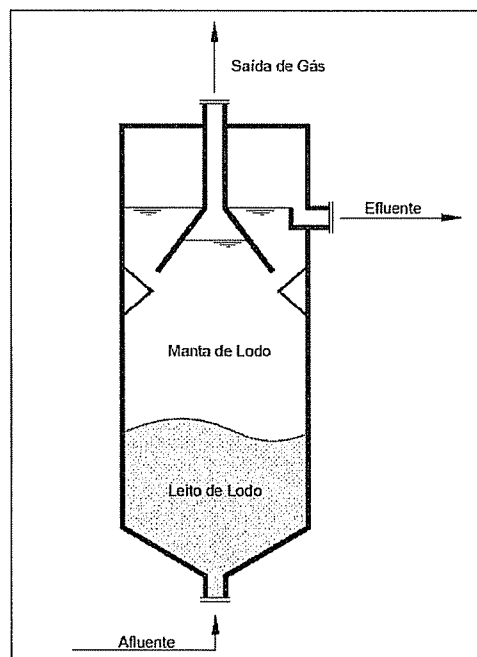
Segundo von Sperling (2005), o tratamento dos esgotos é usualmente classificado em níveis de tratamento associados às substâncias que são removidas. Os níveis de tratamento de esgotos são:

- Tratamento preliminar: remove os sólidos grosseiros;
- Tratamento primário: visa a remoção dos sólidos sedimentáveis, e conseqüentemente da matéria orgânica;
- Tratamento secundário: o objetivo desse nível de tratamento, onde ocorrem os mecanismos biológicos, é a redução da matéria orgânica e, eventualmente, de alguns nutrientes (nitrogênio e fósforo);
- Tratamento terciário: tem o objetivo de remover poluentes específicos, tóxicos ou compostos não biodegradáveis ou, ainda, a remoção complementar dos poluentes não removidos suficientemente no tratamento secundário.

Os tratamentos denominados convencionais usualmente incluem decantadores primários (onde é gerado o lodo primário), reatores biológicos (por exemplo, lodos ativados e filtros percoladores) e decantadores secundários, onde é removido o lodo secundário, constituído, essencialmente, pela biomassa formada nos reatores biológicos. Nesses tipos de sistema, o lodo gerado é removido de forma praticamente contínua e, por conseguinte, é pouco adensado (1-4% de sólidos secos) e necessita passar por processo de estabilização. Nesses sistemas, o lodo primário e o secundário são geralmente tratados, conjuntamente, em digestores. Esses processos de tratamento geram em torno de 1,5 a 8 litros de lodo por

habitante por dia ou, em termos de massa, 60-80 gramas de sólidos suspensos (SS) por habitante por dia (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001).

Outras técnicas de tratamento, denominadas simplificadas (ou não mecanizadas), tais como as lagoas de estabilização e os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (ou reatores UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket*) (Figura 2), encontram grande aplicação no Brasil devido à simplicidade e baixo custo operacional e adequação a climas quentes (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001).



**Figura 2-** Ilustração esquemática de um reator UASB  
**Fonte:** adaptado de Chernicharo (2007).

Nos reatores UASB o fluxo é ascendente, com um sistema de separação trifásico na parte superior que possibilita a separação do gás (que pode ser captado e aproveitado) da fase líquida (efluente tratado) e a sedimentação dos sólidos no interior do reator. Os sólidos acumulados formarão a manta de lodo e, na parte inferior, o leito de lodo, mais concentrado. O fluxo ascendente promove agitação das partículas do meio e contato entre a biomassa e o substrato do lodo, favorecido ainda pela mistura provocada pelas bolhas de gás (CHERNICHARO, 2007).

Periodicamente, deve ser feito o descarte do lodo do reator de forma a manter o adequado equilíbrio entre a biomassa e o aporte de substrato e isso é realizado em intervalos de semanas. Apesar do período de permanência do lodo nos reatores UASB ser bem inferior ao das lagoas de estabilização, o lodo descartado já é digerido (3-6% de sólidos secos) e bem adensado, requerendo apenas o desaguamento, por exemplo, em leitos de secagem. Cabe também registrar que processos anaeróbios geram quantidades bem menores de lodo do que os processos aeróbios. No caso dos reatores UASB, a produção de lodo gira em torno de 0,2-0,6 L.hab<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> e 12-18 g SS hab<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001).

Nos processos de tratamento de esgotos por reatores UASB, assim como em qualquer outro processo, existem vantagens e desvantagens. Devido às condições climáticas favoráveis do Brasil, essa alternativa de tratamentos de esgotos assume uma posição de vanguarda. As principais limitações do processo estão relacionadas à remoção insatisfatória de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e patógenos, além da carga residual de DBO/DQO ser elevada, para atender aos limites de lançamentos dos efluentes em corpos hídricos preconizados pela legislação ambiental (CHERNICHARO, 2007).

### **3.2.2. Produção de lodo em processos de tratamento de esgotos**

O lodo é o resíduo que se obtém a partir do tratamento de esgotos, com a finalidade de permitir seu retorno ao ambiente sem que sejam agentes de poluição (SANEPAR, 1997). O lodo pode ser definido como primário, proveniente do tratamento primário; secundário ou biológico, proveniente do tratamento secundário; e terciário, proveniente do tratamento terciário.

A geração de lodo é função do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida. Em princípio, todos os processos de tratamento biológico geram lodo. Os processos que recebem o esgoto bruto em decantadores primários geram o lodo primário, composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. A concentração de sólidos totais do lodo nesta fase do processo deve estar em torno de 1% a 6%. Este lodo pode ser adensado e desidratado com relativa facilidade, desde que este não se torne séptico. O lodo primário é altamente putrescível, gera maus odores e contém alta concentração de patógenos, que podem causar vários tipos de doença se em contato humano (MIKI, 1998).

Na etapa biológica de tratamento, é gerado o lodo biológico, ou lodo secundário. Este lodo é a própria biomassa que cresceu à custa do alimento fornecido pelo esgoto afluente. Caso a biomassa não seja removida, ela tende a se acumular no sistema, podendo, eventualmente, sair com o efluente final, deteriorando sua qualidade, em termos de sólidos em suspensão e matéria orgânica (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001). O lodo biológico é gerado nos processos de tratamento de lodos ativados, filtro biológico, etc. Este lodo é difícil de adensar e desidratar.

Em sistemas de tratamento que incorporam uma etapa físico-química, quer para melhorar o desempenho do decantador primário, quer para dar um polimento ao efluente secundário, tem-se o lodo químico (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001).

Em todos estes casos, é necessário o descarte do lodo, ou seja, sua retirada da fase líquida. No entanto, nem todos os sistemas de tratamento de esgotos necessitam do descarte contínuo desta biomassa. Alguns conseguem armazenar o lodo por todo o horizonte de operação da estação (ex.: lagoas facultativas); outros permitem um descarte apenas eventual (ex.: reatores anaeróbios) e outros ainda requerem uma retirada contínua ou bastante frequente (ex.: lodos ativados). O lodo biológico descartado é também denominado lodo excedente (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001).

A quantidade de lodo produzido em uma estação de tratamento de efluentes pode variar bastante, dependendo das características iniciais do esgoto a ser tratado e do processo de tratamento empregado.

### **3.2.3. Classificação e caracterização do lodo biológico**

A classificação do lodo biológico é atribuída segundo sua origem e natureza. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR-10.004/04 classifica o lodo de biológico como resíduo sólido, Classe IIA – não perigoso e não inertes, isto é, resíduos que podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004a).

Segundo Bettiol (1989), o lodo biológico apresenta uma composição variável, pois depende da origem e do processo de tratamento do esgoto. Um lodo típico apresenta em

torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo e os demais macro (Mg, K, S e Ca) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Zn, Mo, Cl, Co, Si, Mn e Na).

A Tabela 4 apresenta teores de sólidos, carbono e nutrientes encontrados em lodos gerados em diferentes processos de tratamento.

**Tabela 4-** Teores de sólidos totais, carbono e nutrientes encontrados em lodos gerados em diferentes processos de tratamento (% matéria seca).

<b>Tipo de lodo</b>	<b>ST</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
Lodo primário de ETE de lodos ativados	2-6	33	4,5	3,1	-	-	-
Lodo secundário de ETE de lodos ativados	0,6-1	20-30	2-9	1,5-3,7	0,01-0,36	1,5-7	0,6
Lodo digerido (primário+secundário) de ETE de lodos ativados	3-6	25	3,1	5,6	-	-	-
Lodo de reatores UASB	3-6	20	2,3	0,7-0,9	0,9	0,8	0,3
Lodo de lagoas de estabilização	7-12	27	2-3	0,2-0,6	0,05	-	-

**Fonte:** adaptado de von Sperling e Andreoli (2001).

Percebe-se pela Tabela 4 que o lodo biológico advindo de lagoas de estabilização apresenta maiores concentrações de sólidos totais. O lodo primário de ETE de lodos ativados é o que apresenta maiores concentrações de carbono. Já o lodo gerado pelo tratamento em reatores UASB apresenta baixas concentrações de carbono quando comparado ao lodo gerado nos outros processos de tratamento apresentados.

### **3.2.4. Microrganismos patogênicos**

A origem da contaminação microbiológica de lodo biológico apresenta grande variabilidade e pode estar relacionada, principalmente, às condições sanitárias; à região geográfica; à presença de agroindústrias; e do tipo de tratamento ao qual o lodo foi submetido (PINTO, 2001).

Os microrganismos patogênicos presentes no lodo, além de variar de uma região para outra, dependem do processo de tratamento do esgoto. Os microrganismos encontrados no lodo podem ser saprófitas, comensais, simbioses ou parasitas, sendo apenas a última categoria patogênica e capaz de causar doenças ao homem e animais. Dentre os parasitas

estão presentes os fungos, vírus, bactérias, helmintos e protozoários. O principal indicador de patógenos é o coliforme termotolerante e os principais patógenos são: *Salmonella*, vírus entéricos e os ovos viáveis de helmintos (TSUTIYA, 2001).

### 3.2.5. Processos de tratamento do lodo biológico

O lodo biológico, devido aos seus constituintes, deve ser submetido a tratamento, manejo e disposição final, sendo que esse gerenciamento constitui atividade de relativa complexidade e alto custo. Conforme Andreoli *et al.* (2001), o lodo representa de 1 a 2% do volume do esgoto tratado, enquanto seu gerenciamento responde por 20 a 60% dos gastos totais de uma ETE.

O principal objetivo do tratamento do lodo é gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, conseqüentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes. Esse tratamento se dá por meio de processos físicos, químicos e biológicos (PEDROZA *et al.*, 2010). Geralmente, o tratamento do lodo é realizado por meio das seguintes etapas:

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

A incorporação dessas etapas no tratamento do lodo dependerá do tipo de tratamento de esgotos empregado e, por conseguinte, das características do lodo gerado, bem como do destino final pretendido para o lodo (BARONY, 2011).

Antes de tomar uma decisão a respeito de qual tratamento deve ser aplicado ao lodo, é de grande interesse conhecer a quantidade de lodo produzido, suas características químicas e microbiológicas e os custos de implantação, de operação e de gerenciamento do tratamento. Só dessa forma é que se pode assegurar o êxito do método de tratamento a ser utilizado (CHÁVEZ, TOSCANO e MÁRQUEZ, 2000).

### **3.2.5.1. Adensamento**

O adensamento do lodo proveniente das unidades de tratamento da fase líquida consiste no aumento da concentração de sólidos nele contidos, por meio da remoção parcial da quantidade de água que caracteriza o seu grau de umidade. Portanto, o adensamento visa à redução do volume do lodo para o manuseio e o consequente processamento e destino final. Normalmente, o líquido removido é retornado para o tratamento primário da estação de tratamento de efluentes (ETE); em alguns casos, pode ser lançado a montante do tratamento biológico (JORDÃO e PÊSSOA, 2011).

O objetivo do adensamento é reduzir a água dos resíduos através de meios físicos. Dessa forma, consegue-se reduzir a capacidade volumétrica das unidades subsequentes de tratamento, como volume dos digestores, tamanho das bombas, etc.

Ainda como benefício, pode-se citar a redução do consumo de produtos químicos no desaguamento e do consumo de energia do aquecimento dos digestores (MIKI, ALÉM SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006).

O adensamento é mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros biológicos percoladores, tendo importantes implicações no dimensionamento e na operação dos digestores (GONÇALVES, LUDUVICE e VON SPERLING, 2001).

### **3.2.5.2. Estabilização**

A estabilização significa biodegradação de parte da matéria orgânica e redução de odores e do nível de microrganismos patogênicos (MALTA, 2001). Segundo Metcalf e Eddy (2004), os processos de estabilização do lodo de esgoto objetivam a redução de organismos patogênicos, a eliminação de odores e a inibição, a redução ou a eliminação do potencial de putrefação.

A importância da estabilização está vinculada ao tipo de destino final do lodo. Na reciclagem agrícola, a estabilização está ligada diretamente a odores, à atração de moscas e ao conteúdo de patogênicos, portanto, à acessibilidade do produto. Na disposição em aterro sanitário, o grau de estabilização tem importância média, sendo, principalmente, ligado à facilidade de desidratação do lodo e, em menor escala, aos odores. Na incineração, o grau de

estabilização também é importante, porém, de forma inversa ao uso agrícola: um lodo muito estabilizado, que perdeu muito de sua fração orgânica, também perdeu muito de seu potencial calorífico (MALTA, 2001).

### **3.2.5.3. Condicionamento**

O condicionamento é um processo para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo, seja por meios físicos ou químicos.

O principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas no lodo, envolvendo as pequenas partículas em agregados de partículas maiores. Isto é realizado por meio de uma etapa de coagulação seguida de outra de floculação. A coagulação diminui a intensidade das forças eletrostáticas de repulsão entre as partículas, desestabilizando-as. A compressão da dupla camada elétrica que envolve superficialmente cada partícula é o mecanismo que facilita a sua aproximação. A floculação permite a aglomeração dos colóides e dos sólidos finos por meio de baixos gradientes de agitação (GONÇALVES *et al.*, 2001).

O tipo de condicionamento influencia diretamente a eficiência dos processos de desaguamento. Por isso, a seleção de um determinado processo deve se basear em critérios de custo de capital, operação e manutenção do sistema como um todo. Custos relativos ao impacto da recirculação do sobrenadante nas outras etapas que compõem a planta, na qualidade do efluente e nas emissões atmosféricas, devem ser integrados à análise (GONÇALVES *et al.*, 2001).

O condicionamento pode ser realizado por meio da utilização de produtos químicos inorgânicos, de produtos químicos orgânicos ou de tratamento térmico (VASQUES, 2008). Os orgânicos normalmente utilizados incluem o extenso grupo de polieletrólitos orgânicos (polímeros) e os inorgânicos frequentemente utilizados são os sais férrico, ferrosos, de alumínio e óxido ou hidróxido de cálcio (DAVID, 2002).

### **3.2.5.4. Desaguamento**

O desaguamento, também conhecido (erroneamente) como desidratação, é uma operação unitária física (mecânica) que reduz o volume do lodo por meio da redução do seu teor de água (MIKI, ALÉM SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006). A capacidade de desaguamento varia de acordo com o tipo de lodo. Um lodo ativado, por exemplo, é mais fácil de ser desaguado do que um lodo primário digerido anaerobiamente. Essa variação na capacidade de desaguamento está diretamente relacionada com o tipo de sólido e a forma como a água está ligada às partículas do lodo (MALTA, 2001).

Conforme von Sperling (2005), o desaguamento, realizado com o lodo digerido, tem impacto importante nos custos de transporte e destino final do lodo. As principais razões para se realizar o desaguamento são: redução do custo de transporte para o local de disposição final; melhoria nas condições de manejo do lodo, já que o lodo desaguado é mais facilmente processado e transportado; aumento do poder calorífico do lodo, por meio da redução da umidade com vistas à preparação para incineração; redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura e diminuição da produção de lixiviados, quando da sua disposição em aterros sanitários.

Os processos de desaguamento podem ser naturais ou mecânicos, sendo a escolha do processo dependente do tipo de lodo e da área disponível. Dentre os processos naturais, destacam-se os leitos de secagem e as lagoas de secagem. Já dentre os processos mecânicos, encontram-se as centrífugas, as prensas desaguadoras e os filtros prensas.

A escolha do processo de desaguamento é função do porte da estação de tratamento de efluentes (ETE), do tipo de lodo, da área, dos recursos financeiros e da mão de obra disponíveis. Para ETEs de pequeno porte, geralmente localizadas em regiões com disponibilidade de área e mão de obra pouco especializada, geralmente são utilizados sistemas naturais, tais como lagoas e leitos de secagem. Para ETEs de médio e grande porte, a maior parte das plantas emprega sistemas mecânicos, que têm a capacidade de tratar grandes quantidades de lodo em uma área reduzida, demandando, no entanto, mão de obra especializada, dada a complexidades destes processos.

#### **3.2.5.5. Higienização**

A etapa de higienização visa reduzir a concentração de microrganismos patogênicos para não causar riscos à saúde da população, aos trabalhadores que vão manusear o material, bem como impedir impactos ambientais negativos (ANDREOLI *et al.* 2001). Visa ainda reduzir ou eliminar a emissão de sólidos voláteis e, conseqüentemente, seu potencial de produção de odores que, por sua vez, pode levar à atração de vetores (FERNANDES, 2000).

Estudos epidemiológicos têm demonstrado que vírus, ovos de helminto e cistos de patógenos representam o maior risco para a saúde humana e animal pela utilização do lodo (LELIS *et al.*, 2003), demonstrando dessa forma, a necessidade da higienização do lodo.

Existem vários processos que podem ser utilizados para promover a higienização do lodo. Os principais processos são a compostagem, que elimina os agentes patogênicos através da temperatura; a calagem, que associa a ação de altos níveis de pH ao calor gerado pelas reações químicas de hidratação da cal; a secagem, que reduz os patógenos pela exposição aos raios solares ou ao calor; o uso da radiação gama e a pasteurização (US EPA, 2003).

### **3.2.6. Processo de higienização química do lodo biológico mediante caleação**

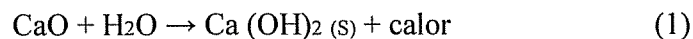
Dentre as formas de se obter a higienização de lodo, destaca-se o tratamento alcalino com a utilização da cal virgem ou hidratada (caleação), pelo baixo custo e simplicidade operacional.

Em resumo, a adição de cal promove os seguintes efeitos: (i) redução de sólidos voláteis para a atmosfera; (ii) aumento de sólidos totais, resultantes da adição de sólidos da cal e da precipitação de sólidos dissolvidos; (iii) redução nos níveis de fósforo solúvel devido a reação com ortofosfatos para formar precipitados de fosfato de cálcio; (iv) fixação de metais pesados; e (v) perdas de nitrogênio por volatilização da amônia (TSUTIYA *et al.*, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001).

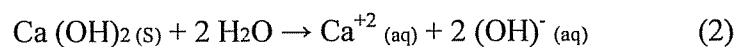
A adição de produtos químicos alcalinos tem efeito estabilizante e desinfetante sobre o lodo. Das três substâncias químicas usualmente utilizadas para a estabilização alcalina (CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> e cinza), somente a cal virgem (CaO) sofre reação de hidratação, que produz calor (reação exotérmica) e elevação da temperatura do lodo, promovendo a higienização (GIROVICH, 1996). Contudo, a inativação de organismos patogênicos, além

do efeito da temperatura, é também resultado, conjunto, da elevação do pH e dos efeitos da amônia (PECSON *et al.*, 2007). Segundo os mesmos autores, a química da estabilização alcalina utilizando-se a cal virgem obedece as seguintes reações, representadas pelas equações (1) e (2), sendo o aumento do pH determinado pela equação (2):

Extinção da cal virgem formando cal hidratada:



Aumento do pH pela reação da cal extinta com a água livre do lodo:



Segundo pesquisadores, citados por Lima (2010), o calor obtido é suficiente para elevar a temperatura a valores acima de 50 °C, que é uma faixa de temperatura suficiente para a completa destruição de alguns microrganismos, dependendo do tempo a que ficarem expostos.

De acordo com Andreoli *et al.* (2001), a cal virgem é o produto mais indicado para a aplicação em lodo na fase sólida pela sua capacidade de reagir com a umidade e liberar calor. No entanto, conforme descrito por Rocha (2009), a opção pelo uso da cal virgem ou hidratada vai depender das condições de disponibilidades locais, sendo que a cal hidratada possui melhores condições de manuseio, considerando o tratamento de pequenas produções de lodo com aplicação manual.

A caleação tem a propriedade de elevar o pH, produzindo NH<sub>3</sub>, que penetra na membrana dos organismos patogênicos, desnaturando as enzimas responsáveis pelo metabolismo do organismo, ocasionando a sua morte (MENDES, 2003). Todavia, vale destacar que, com a variação do pH conseguida com a adição da cal ao lodo, atenção especial deve ser dada às bactérias, pois algumas são capazes de crescer novamente mesmo depois de sua inativação, principalmente em temperaturas amenas (DUMONTET *et al.*, 2001; STRAUB *et al.*, 1993; US EPA 2003).

A homogeneização da mistura de cal com o lodo, aliada às condições de umidade do lodo, são condições básicas para se obter a higienização adequada. A experiência brasileira indica que a adição de cal virgem (CaO) ou cal hidratada [Ca(OH)<sub>2</sub>] deve ser realizada em

lodo com teor de umidade entre 60% e 75%, em proporções que variam de 30% a 50% do peso seco do lodo (ANDREOLI *et al.*,2001).

Após a mistura com a cal, segundo Pinto (2001), o lodo deve permanecer coberto por 60-90 dias para que se complete a higienização. Esse procedimento tem por finalidade evitar o contato com águas de chuva e reduzir a perda de calor; nesse período o pH deve ser mantido em valores próximos de 12.

Fernandes *et al.* (1996) encontraram excelentes resultados com lodo caleado a 50% do peso seco, obtendo após 20 dias de contato com pH 12 remoção de coliformes totais, coliformes termotolerantes, *Salmonella*, estreptococos, larvas de helmintos e cistos de protozoários, além de remoção de 77,3% dos ovos de helmintos, sendo que os remanescentes eram inviáveis.

Godinho (2003) verificou a sobrevivência e viabilidade de ovos de *Ascaris sp.* em lodos higienizados por caleação e por tratamento térmico. Para o experimento de caleação, o lodo foi obtido de um reator UASB em escala de demonstração, após etapa de desaguamento em leito de secagem, tendo sido testadas três dosagens de cal hidratada (30, 40 e 50%). A caleação mostrou-se 100% eficiente na inviabilização de ovos de *Ascaris sp.* após 30 dias de contato, para as três dosagens testadas.

Bastos *et al.* (2007) realizaram experimentos de caleação com o mesmo lodo de reator UASB utilizado no presente estudo sob diferentes condições de mistura lodo / cal (30, 40 e 50% do peso seco de lodo). Com teor de umidade em torno de 70% e aplicação de cal a 50% do peso seco, em 40 dias de estocagem após a caleação foi alcançado o padrão lodo Classe A estabelecido pela legislação brasileira.

Rocha (2009) avaliou a eficiência da higienização alcalina do lodo de reator UASB utilizando cal hidratada e cal virgem nas concentrações de 12,6%, 21% e 29,4% em 120 dias. Considerando o atendimento à resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375 para lodos tipo A, com relação aos parâmetros de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos, ambas as cales, virgem e hidratada, se mostraram eficientes.

Barony (2011) estudou a produção de biossólidos a partir do tratamento de lodo de reator UASB por meio de caleação e secagem em estufa para produção de mudas de *Eucalyptus urophylla*. Foram produzidos três lotes de biossólidos visando à obtenção de padrão de qualidade Classes A e B (Resolução CONAMA n<sup>o</sup>375/2006). Cada lote é o

descarte do lodo do reator UASB ao longo dos seguintes períodos: (i) Lote 1, de 05/06/2009 a 27/10/2009; (ii) Lote 2, de 25/06/2009 a 27/10/2009; (iii) Lote 3, de 14/07/2009 a 27/10/2009. Com base nos resultados de ovos de helmintos e *E.coli*, o biossólido caleado (adição de 50% de CaO em relação ao peso do lodo em base seca) atingiu padrão Classe B com 12 dias no Lote 1 e sete dias nos lotes 2 e 3; a condição de biossólido Classe A foi alcançada aos 70, 62 e 29 dias, respectivamente, nos lotes 1, 2 e 3.

### **3.2.7. Disposição final do lodo biológico**

O tratamento e disposição final do lodo biológico devem ser geridos para minimizar os impactos ambientais como odor e lançamento de contaminantes e patógenos no ambiente.

A busca de alternativas viáveis para disposição final do lodo é uma preocupação mundial. As alternativas mais usuais, segundo Tsutiya (2001), têm sido as seguintes: uso agrícola; aplicação em plantações florestais; disposição em aterro sanitário; reuso industrial e na construção civil; incineração; recuperação de solos; disposição oceânica; conversão em óleo combustível e landfarming.

No Brasil, a disposição final do lodo geralmente é o aterro sanitário. A grande quantidade produzida, principalmente nas capitais e grandes cidades brasileiras, acarreta dificuldades econômicas e ambientais em sua disposição final, que chega a representar até 50% dos custos operacionais da ETE (BETTIOL e CAMARGO, 2000).

A utilização do lodo na agricultura é uma das alternativas de disposição final, é considerada interessante por combinar disposição com reciclagem (BETTIOL e CAMARGO, 2000). Sob o ponto de vista econômico, esta alternativa pode proporcionar economias no uso de fertilizantes químicos e sob o ponto de vista ambiental esta alternativa pode ser considerada a de menor impacto para disposição final (TSUTIYA, 2001).

A utilização do lodo na agricultura possui outras vantagens, pois é fonte de matéria orgânica, macro e micronutrientes, e pode conferir ao solo maior capacidade de retenção de água e maior resistência à erosão.

A aplicabilidade de lodo na agricultura está relacionada às suas características físicas, químicas e biológicas, as quais determinarão, por um lado, o potencial de uso como fertilizante ou condicionador de solo e, por outro, limitações decorrentes da presença de

contaminantes químicos e de microrganismos patogênicos. A Tabela 5 compara a quantidade de nutrientes em fertilizantes comerciais e lodos biológicos. Por sua vez, as características do lodo serão determinadas pela composição do esgoto que lhe dá origem e dos processos de tratamento de esgotos, como apresentado na Tabela 4.

**Tabela 5-** Comparação entre a quantidade de nutrientes em fertilizantes comerciais e lodos biológicos.

Produto	Nutrientes (%)		
	N	P	K
Fertilizantes para uso agrícola- típico <sup>(*)</sup>	5	10	10
Lodo biológico estabilizados- valores típico	3,3	2,3	0,3

**Nota:** <sup>(\*)</sup> A concentração de nutrientes pode variar largamente dependendo do solo e necessidade da planta.

**Fonte:** Metcalf e Eddy (1991).

A Tabela 6 mostra a caracterização agrônômica de lodo tratado por caleação. Conforme descrito por Bastos *et al.* (2007), quanto maior a dose de cal, menores os teores de N, P, S e carbono orgânico e, naturalmente, maiores os teores de Ca (Tabela 6).

**Tabela 6-** Caracterização agrônômica de lodo tratado por caleação.

Lodo	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)	CO (%)	C/N (%)
Lodo cal 30%	1,54	0,59	1,2	9,11	0,23	1,43	7,02	4,55
Lodo cal 40%	1,96	0,56	0,06	10,93	0,19	1,34	7,02	3,58
Lodo cal 50%	1,26	0,39	0,12	24,4	0,34	0,89	5,25	4,22

**Fonte:** adaptado de Bastos *et al.* (2007).

### 3.2.8. Aspectos legais da utilização agrícola do lodo

No Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Ambiental), órgão vinculado à Secretaria do Meio Ambiente, estabeleceu em 1999 normas provisórias estaduais (Norma Técnica P 4.230), regulamentando o uso agrícola de lodos resultantes de tratamentos biológicos. Os limites indicados nesta norma são os mesmos adotados pela USEPA, nos EUA.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA,2006), através de sua Resolução n<sup>o</sup> 375/2006, regulamenta a disposição de resíduo no solo. Os principais aspectos

definidos na resolução nº 375 são relacionados aos critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de esgotos sanitários, sendo os mais relevantes os seguintes:

- Relacionados à caracterização do lodo quanto ao potencial agrônômico (parâmetros carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, pH em água 1:10, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade e sólidos voláteis e totais);
- Relacionados à caracterização química quanto à presença de substâncias inorgânicas (os metais pesados: arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco);
- Relacionados à caracterização do lodo quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus entéricos).

A redução do risco de contaminação do lodo por microrganismos patogênicos é obtida pela associação das diversas etapas de gerenciamento do lodo, visando sua utilização na agricultura (MATOS e BRASIL, 2003). O Anexo I da resolução CONAMA nº 375 faz referência aos processos para redução de agentes patógenos e atratividade de vetores, onde a estabilização com cal é citada como um dos processos de redução significativa de patógenos e da atratividade de vetores.

Os requisitos mínimos de qualidade microbiológica que o lodo destinado à agricultura deve respeitar são os apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7-** Tipo de lodo ou produto derivado segundo a patogenicidade.

<b>Tipo de lodo ou produto derivado</b>	<b>Concentrações de patógenos</b>
Classe - A	Coliformes termotolerantes < 10 <sup>3</sup> NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g ST
	<i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST
	Vírus entéricos < 0,25 UFP ou UFF/g de ST
Classe - B	Coliformes termotolerantes < 10 <sup>6</sup> NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g ST

**Fonte:** Resolução CONAMA nº 375 (CONAMA, 2006).

**Nota:** NMP- Número mais provável;UFF- Unidade formadora de floco.

O lodo Classe A permite o uso do lodo de modo irrestrito, sendo produzido através de processos que garantam uma concentração de microrganismos abaixo do limite de detecção, ou seja, lodos que tenham passado por um processo de higienização. Já o lodo de Classe B, produzido através de processos convencionais de estabilização, possui algumas restrições e recomendações para sua utilização agrícola. Conforme descrito no Art. 14 da Resolução CONAMA nº 375, a utilização de lodo de esgoto ou produto derivado enquadrado como classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação.

#### **3.2.8.1. Metais Pesados**

De acordo com Silva *et al.* (2001), metais pesados podem ser entendidos que em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferecem risco à saúde humana e ao meio ambiente, prejudicando a atividade dos organismos vivos. Em concentrações superiores às legalmente recomendadas, têm sido responsabilizados por causar agravos à saúde humana, além de uma série de doenças carcinogênicas (GOUVEA, 1996).

Os metais pesados que contaminam o ambiente derivam de inúmeras fontes, que podem ser classificadas em aerossóis urbano-industriais, rejeitos líquidos e sólidos de animais e homens, mineração e indústrias, e pesticidas agrícolas (SOUZA, 1998).

Conforme a Instrução Normativa nº 23 de 31/08/2005, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o composto orgânico proveniente dos resíduos industriais, urbanos e rurais, são classificados em quatro classe de acordo com as matérias utilizadas na sua produção como (BRASIL, 2005):

- Classe “A”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamentos da agroindústria, onde não sejam utilizados no processo o sódio (Na<sup>+</sup>), metais pesados, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos;
- Classe “B”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima oriunda de processamento da atividade industrial ou da agroindústria, onde o sódio (Na<sup>+</sup>), metais pesados, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos são utilizados no processo;

- Classe “C”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura;
- Classe “D”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura.

De acordo com a mesma Instrução Normativa, para a utilização do composto orgânico na agricultura deverão ser atendidas as características descritas conforme a Tabela 8. Em relação aos níveis de metais pesados, esta legislação não apresenta os limites máximos para as classes de composto orgânico.

A Resolução do CONAMA nº 375, estabelece os limites máximos de metais pesados presentes no biossólido (lodo estabilizado proveniente de tratamento de esgoto) e seus derivados (destinado à produção de composto orgânico) para aplicação no solo, conforme apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8-** Especificações das garantias nas classes de composto orgânico.

<b>Garantia</b>	<b>Classes A</b>	<b>Classe B</b>	<b>Classe C</b>	<b>Classe D</b>
Umidade (% máx.)	50	50	50	70
N total (% min.)	1	1	1	1
*Carbono orgânico (% min.)	15	15	15	15
*CTC	Conforme declarado			
pH (min.)	6,0	6,0	6,5	6,0
Relação C:N (máx.)	18	18	18	18
*Relação CTC:C (min.)	20	20	20	30
Soma NPK, NP,NK,PK	Conforme declarado			

**Nota:** (\*) valores expressos em base seca, umidade determinada a 65°C.

**Fonte:** Instrução Normativa nº 23 de 31/08/2005, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

**Tabela 9-** Limites de metais pesados para aplicação de bioossólido e seus derivados no solo.

Metais pesados	mg kg <sup>-1</sup> , base seca
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromio	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

**Fonte:** Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375 (CONAMA, 2006).

De acordo, com o Ministério da Agricultura, existem limites máximos de metais pesados (Tabela 10) para o composto orgânico proveniente de lixo urbano em países como: Brasil, Alemanha, Estados Unidos, França, Áustria, Itália, Suíça e Holanda (BRASIL, 2002).

**Tabela 10-** Teores permissíveis de metais pesados (mg.kg<sup>-1</sup>) no composto orgânico em alguns países, base seca à 65 °C.

País	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Hg
Brasil	500	500	1500	300	100	5	2
Alemanha	150	100	400	100	50	15	1
Estados Unidos	500	500	1000	1000	100	10	5
França	800	---	---	---	200	8	8
Áustria	900	1000	1500	300	200	6	4
Itália	500	600	2500	500	200	10	10
Suíça	150	150	500	500	---	3	3
Holanda	20	300	900	50	50	2	2

**Fonte:** BRASIL (2002).

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (USEPA), regulamenta as doses máximas de metais em lodo de esgoto, e é baseada no conceito de rotas de exposição, o mesmo empregado pelo Brasil. Esse conceito permite o acúmulo de metais pesados no solo, até um limite máximo previamente estabelecido pela legislação (BRASIL, 2002). É importante ressaltar no entanto, que esses limites são dinâmicos e podem ser reajustados à medida que as pesquisas nacionais evoluam.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos de higienização química do lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental- LESA da Universidade Federal de Viçosa- UFV.

### 4.1. Descrição e preparo dos materiais

Os materiais utilizados compreendem resíduos alcalinos, lodo biológico e cal hidratada, sendo coletados e amostrados conforme a NBR 10.007 (ABNT, 2004b).

#### 4.1.1. Resíduos alcalinos gerados no processo de fabricação de polpa celulósica (processo kraft)

Os resíduos alcalinos, dregs e grits, foram obtidos do processo de produção kraft de polpa celulósica da Indústria Cenibra, localizada no Município de Belo Oriente- MG.

As tabelas 11 e 12 apresentam a caracterização química das amostras de grits e dregs, respectivamente, que foram utilizadas no experimento de higienização química do lodo biológico.

**Tabela 11-** Caracterização química da amostra de grits utilizada no experimento.

Parâmetros	Resultados (%)*
SiO <sub>2</sub>	0,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,1
CaO	95,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22
K <sub>2</sub> O	0,08
Na <sub>2</sub> O	0,76
MgO	0,85
MnO	0,01
TiO <sub>2</sub>	0,05
PF**	41,67

**Nota:** \* Os resultados obtidos foram calculados tendo como base a amostra seca, \*\* PF: Ponto de fogo.

**Fonte:** Cenibra (2009).

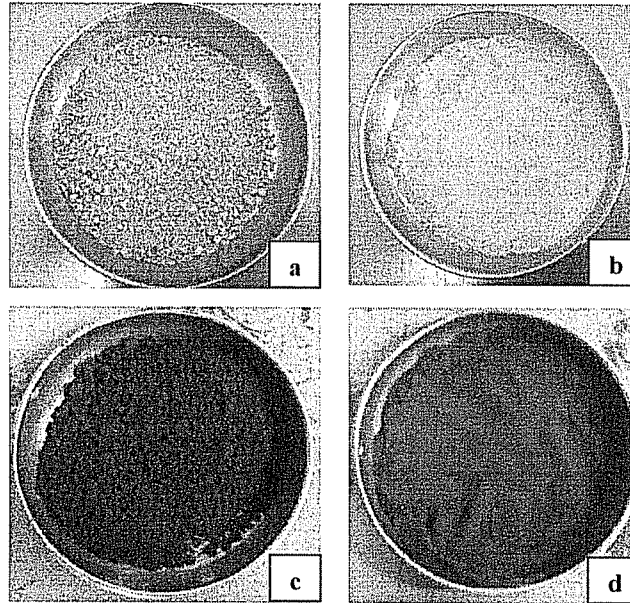
**Tabela 12-** Caracterização química da amostra de dregs utilizada no experimento.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados (%)*</b>
Umidade	56,4
Perda por calcinação- PPC 900 °C	40,86
Carbonato de Cálcio- CaCO <sub>3</sub>	73,6
Álcali Residual	4,37
Insolúveis totais em ácidos (HCl+HNO <sub>3</sub> )	3,98
Al	0,43
Fe	0,71
Mn	0,55
Cu	0,02
Zn	0,03
CaO	37
MgO	2,92
K <sub>2</sub> O	0,75
Na <sub>2</sub> O	12,64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,62

**Nota:** \*Os resultados obtidos foram calculados tendo como base a amostra seca.

**Fonte:** Cenibra (2009).

Foram realizadas análises de pH em água, e os valores encontrados respectivamente para os resíduos de dregs e grits foram 12,76 e 12,80. Os resíduos dregs e grits (Figura 3) foram processados no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da UFV, triturados em "moinho de bola" e peneirados em peneira de 200 mesh, de forma a obter uma granulometria próxima a da cal.



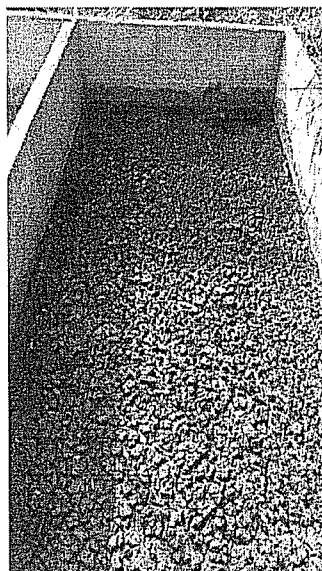
**Figura 3-** Resíduo grits sem triturar (a), grits triturado (b), dregs sem triturar (c) e dregs triturado (d).

#### **4.1.2. Lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário**

O lodo biológico utilizado para a montagem do experimento foi coletado no leito de secagem da Unidade Integrada de Tratamento e Utilização de Esgotos da Violeira (ETE Violeira), situada no bairro Violeira, Município de Viçosa- MG.

A estação é composta por reator UASB e é operada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa- SAAE, tratando o esgoto proveniente do bairro Violeira, com população aproximadamente de 1.000 habitantes, contribuindo com vazão cerca de 120 m<sup>3</sup>/dia.

O lodo foi coletado após 18 dias do descarte, com umidade de 65% e pH de 8,5. A Figura 4 mostra o lodo após 18 dias do descarte no leito de secagem.



**Figura 4-** Lodo no leito de secagem após 18 dias.

#### 4.1.3. Cal hidratada

A cal utilizada no processo de higienização química foi a cal hidratada calcítica, comercializada pela Empresa Quallical, disponibilizada em sacos de 20 Kg.

A escolha por se utilizar a cal hidratada e não a cal virgem baseou-se nos resultados apresentados por diversos autores que comprovaram que a elevação do pH é fator suficiente para higienização alcalina do lodo (PEGORINI *et al.*, 2006). Além disso, o fato de a cal hidratada não promover a elevação da temperatura representa uma maior simplicidade e segurança no seu manuseio.

O valor do pH em água encontrado para a cal foi de 12,6. A Tabela 13 expõe a caracterização típica da cal a ser utilizada no experimento.

**Tabela 13-** Caracterização da cal.

Parâmetros	Resultados (%)
CaO total	94%
MgO	0,4%
Ca(OH) <sub>2</sub>	2,0
Umidade	2,0
Granulometria em 200 mesh	5,0

**Fonte:** Quallical (<http://www.quallical.com.br/>).

#### **4.2. Desenvolvimento e monitoramento do experimento**

O experimento foi desenvolvido em escala laboratorial. As unidades experimentais foram compostas por doses de dregs, grits e cal misturadas ao lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário em reatores UASB, nas proporções de 30%, 40% e 50% (em massa seca de lodo).

Além das doses de resíduos e da cal, também foi realizado um tratamento sem adição de substância alcalina, ou seja, sem adição de cal, dregs ou grits. Ainda para a cal foram utilizadas as proporções de 10% e 60%. Para cada tratamento, foram realizadas 3 repetições, totalizando dessa forma, 36 unidades experimentais. A Figura 5 ilustra como foram realizado os tratamentos.

Tratamentos	Concentrações	Repetições	Amostra
<b>DREGS + LODO</b>	T1 (30%)	3Kg de LODO + 0,743 Kg de DREGS	T1(1) 1
		3Kg de LODO + 0,743 Kg de DREGS	T1(2) 2
		3Kg de LODO + 0,743 Kg de DREGS	T1(3) 3
	T2(40%)	3Kg de LODO + 0,991 Kg de DREGS	T2(1) 4
		3Kg de LODO + 0,991 Kg de DREGS	T2(2) 5
		3Kg de LODO + 0,991 Kg de DREGS	T2(3) 6
	T3(50%)	3Kg de LODO + 1,239 kg de DREGS	T3(1) 7
		3Kg de LODO + 1,239 kg de DREGS	T3(2) 8
		3Kg de LODO + 1,239 kg de DREGS	T3(3) 9
<b>GRITS + LODO</b>	T4(30%)	3Kg de LODO + 0,309 Kg de GRITS	T4(1) 10
		3Kg de LODO + 0,309 Kg de GRITS	T4(2) 11
		3Kg de LODO + 0,309 Kg de GRITS	T4(3) 12
	T5(40%)	3Kg de LODO + 0,412 Kg de GRITS	T5(1) 13
		3Kg de LODO + 0,412 Kg de GRITS	T5(2) 14
		3Kg de LODO + 0,412 Kg de GRITS	T5(3) 15
	T6(50%)	3Kg de LODO + 0,515 Kg de GRITS	T6(1) 16
		3Kg de LODO + 0,515 Kg de GRITS	T6(2) 17
		3Kg de LODO + 0,515 Kg de GRITS	T6(3) 18
<b>CAL + LODO</b>	T7(10%)	3Kg de LODO + 0,099 Kg de CAL	T7(1) 19
		3Kg de LODO + 0,099 Kg de CAL	T7(2) 20
		3Kg de LODO + 0,099 Kg de CAL	T7(3) 21
	T8(30%)	3Kg de LODO + 0,297 Kg de CAL	T8(1) 22
		3Kg de LODO + 0,297 Kg de CAL	T8(2) 23
		3Kg de LODO + 0,297 Kg de CAL	T8(3) 24
	T9(40%)	3Kg de LODO + 0,396 Kg de CAL	T9(1) 25
		3Kg de LODO + 0,396 Kg de CAL	T9(2) 26
		3Kg de LODO + 0,396 Kg de CAL	T9(3) 27
	T10(50%)	3Kg de LODO + 0,495 Kg de CAL	T10(1) 28
		3Kg de LODO + 0,495 Kg de CAL	T10(2) 29
3Kg de LODO + 0,495 Kg de CAL		T10(3) 30	
T11(60%)	3Kg de LODO + 0,594 Kg de CAL	T11(1) 31	
	3Kg de LODO + 0,594 Kg de CAL	T11(2) 32	
	3Kg de LODO + 0,594 Kg de CAL	T11(3) 33	
<b>LODO</b>	Apenas lodo	T12(1)	34
		T12(2)	35
		T12(3)	36

Figura 5- Tratamentos realizados.

Cada unidade experimental foi constituída por um saco plástico com capacidade para 40 L na combinação de lodo biológico, resíduo alcalino e cal.

As quantidades de resíduo dregs e grits aplicados ao lodo foram calculadas com base no teor do composto CaO + MgO de 94,4%, correspondente a 94% de CaO e 0,4% de MgO presentes na cal hidratada.

Os cálculos das doses de resíduo acrescentados ao lodo foram feitos conforme o exemplo a seguir:

Ex: 30% de dregs

- 1Kg de cal contém 944 gramas do composto CaO + MgO
- 1 Kg de dregs contém 399,2 gramas do composto CaO + MgO, então, o equivalente do resíduo dregs em cal é:

$$\begin{array}{r} 1 \text{ kg de dregs} \text{ ----- } 399,2 \text{ g (CaO + MgO)} \\ X \text{ ----- } 944 \text{ g (CaO + MgO)} \\ X=2,36 \text{ kg de dregs} \end{array}$$

Logo, para cada quilo de cal serão necessários 2,36 quilos de dregs para se obter a mesma quantidade de composto CaO + MgO.

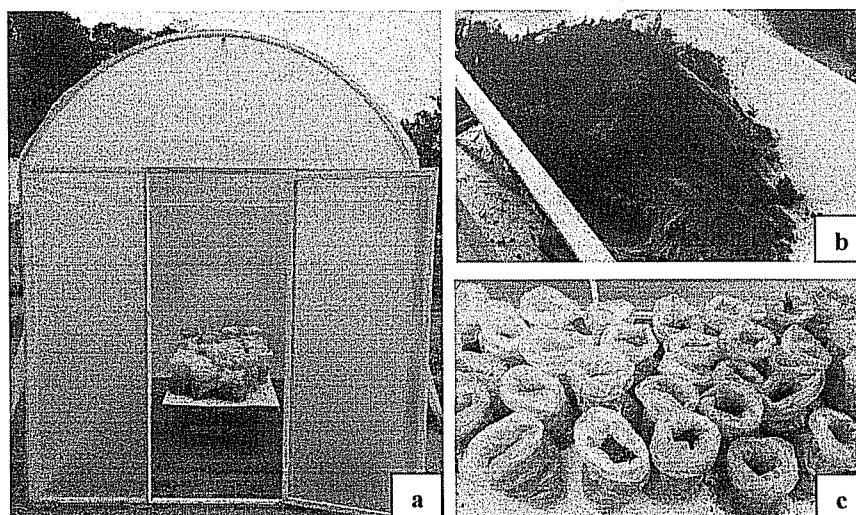
- Considerando os cálculos em massa seca (MS) de 3 Kg de lodo na concentração de 35% de sólidos tem-se:

$$\begin{array}{r} 3000 \times 0,35 = 1,05 \text{ g MS} \\ 1,05 \times 0,3 = 0,315 \text{ Kg (CaO + MgO)} \\ 1 \text{ kg (CaO + MgO)} \text{ ----- } 2,36 \text{ kg de dregs} \\ 0,315 \text{ Kg (CaO + MgO)} \text{ ----- } X \\ X = 0,743 \text{ kg de dregs} \end{array}$$

As unidades experimentais foram monitoradas em estufa agrícola, com dimensões de 2,5 metros de comprimento, 2,0 metros de largura e 1,5 metros de altura. A estufa possuía cobertura e revestimento lateral em lona plástica translúcida para impedir a penetração de água e possibilitar a penetração da radiação solar.

As unidades experimentais foram monitoradas durante 31 dias, compreendidos entre outubro/2014 a novembro/2014. Durante esse período foram monitorados o pH, temperatura, coliformes totais e *E. coli*.

A Figura 6 mostra as unidades experimentais, a mistura do lodo com os resíduos e a estufa agrícola utilizada.



**Figura 6-** Estufa agrícola (a), mistura (resíduo+lodo) (b) e unidades experimentais (c).

O pH e a temperatura foram medidos após 2 horas da mistura (resíduo+lodo), em todas as unidades experimentais, conforme descrito na Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375/2006, e diariamente até o nono dia. Após o nono dia, foram medidos de 2 em 2 dias até 31 dias.

A presença de coliformes totais e *E. coli* foi monitorada após 1, 5 e 21 dias da mistura (resíduo+lodo). Após o período de 31 dias, foram coletadas amostras para realização das análises de metais pesados e referentes à caracterização do potencial agronômico do bio sólido.

Para a determinação dos parâmetros de pH, temperatura, coliformes totais e *E. coli*, foram coletadas amostras compostas de 3 pontos distintos de cada unidade experimental. Para análises de metais pesados e às referentes a caracterização do potencial agronômico do bio sólido, foram coletadas amostras de 20 gramas e secas em estufa por 24 horas.

### 4.3. Delineamento experimental

Os dados foram analisados estatisticamente, por meio da comparação entre a variância de duas amostras, pelo teste F. O teste de Scottt Knott também foi utilizado a 5% probabilidade para os tempos de 2 horas e 24 horas conforme descrito pela Resolução CONAMA nº 375 (CONAMA/2006).

As análises estatísticas foram feitas utilizando-se os *softwares* SAEG - UFV e Statistica. Os resultados para o teste F e Scottt Knott encontram-se no ANEXO 1.

#### **4.4. Análises laboratoriais**

##### **4.4.1. Análises físicas e químicas**

O teor de umidade do lodo foi determinado conforme descrito pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA *et al.*, 2012).

Para determinação do pH em água foi utilizado o procedimento descrito pelo método EPA 9045 D (US EPA, 2004). A temperatura foi medida por meio de termômetro analógico.

Após o processo de higienização química do lodo para a análise do potencial agronômico, foram determinados os parâmetros: Nitrogênio total; carbono orgânico; potássio total; cálcio total; magnésio total; sódio total; ferro total; alumínio total; pH em água; cádmio; chumbo; cobre; cromo; níquel; zinco; silício; manganês.

As análises de carbono orgânico, nitrogênio total, potássio total, cálcio total, magnésio total e sódio total foram realizadas de acordo com os procedimentos adotados pela U.S. EPA SW-846 (US EPA, 2004).

As análises para determinação dos metais pesados seguiu os métodos 3050 e 3051, estabelecidos no U.S.EPA SW-846 (US EPA, 2004).

##### **4.4.2. Análises microbiológicas**

As análises de coliforme total e *E.coli* foram realizadas por meio da técnica do substrato cromogênico Colilert® em cartela, conforme APHA *et al.* (2012).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Análise da variação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos monitorados durante o processo de higienização química do lodo com a utilização de dregs, grits e cal.**

#### **5.1.1. Temperatura**

Nos gráficos da Figura 7 são apresentados os resultados médios de três repetições do monitoramento da temperatura para cada tratamento.

Coforme pode ser verificado nos gráficos da Figura 7, de maneira geral percebe-se aumento da temperatura até o décimo dia após a mistura do lodo com os resíduos alcalinos ou com a cal, atingindo valores elevados acima de 45 °C. Após o décimo dia, nota-se que não houve variação expressiva da temperatura, manteve-se estável próximo aos 45 °C até o final do experimento.

Conforme Andreoli *et al.* (2001), o aumento da temperatura pode promover a desnaturação proteica e/ou a inativação de enzimas fundamentais ao desenvolvimento dos organismos patógenos. Sendo, portanto, importante para o processo de higienização do lodo.

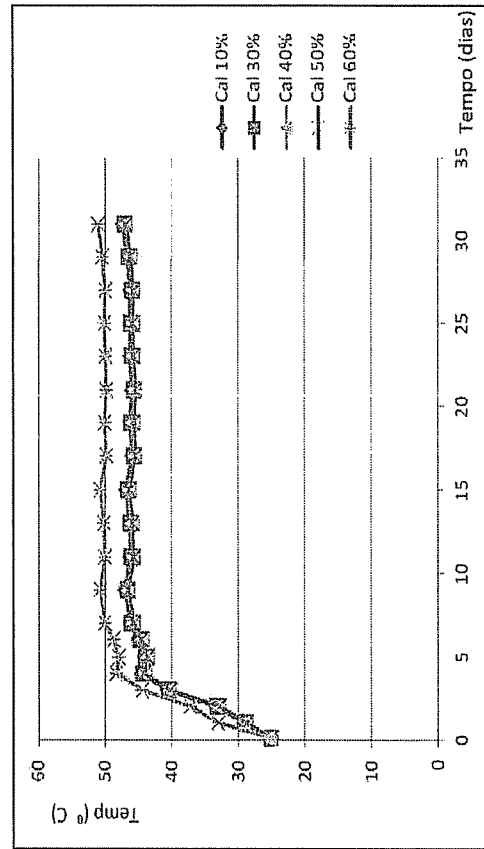
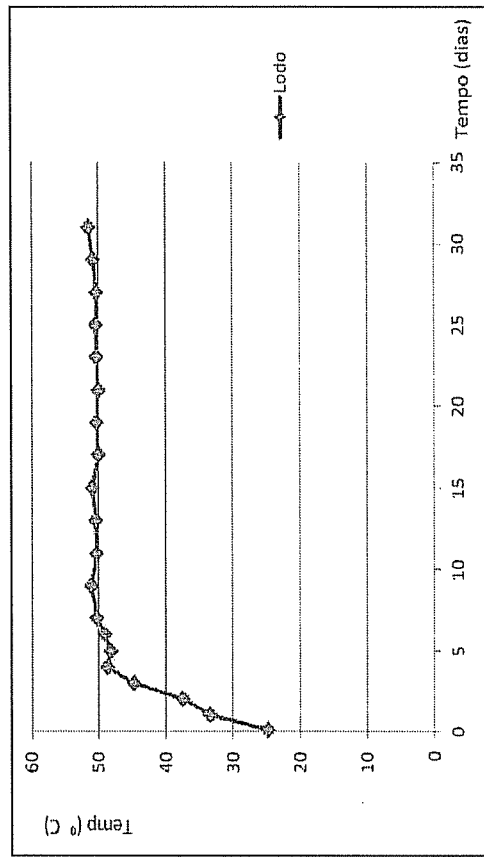
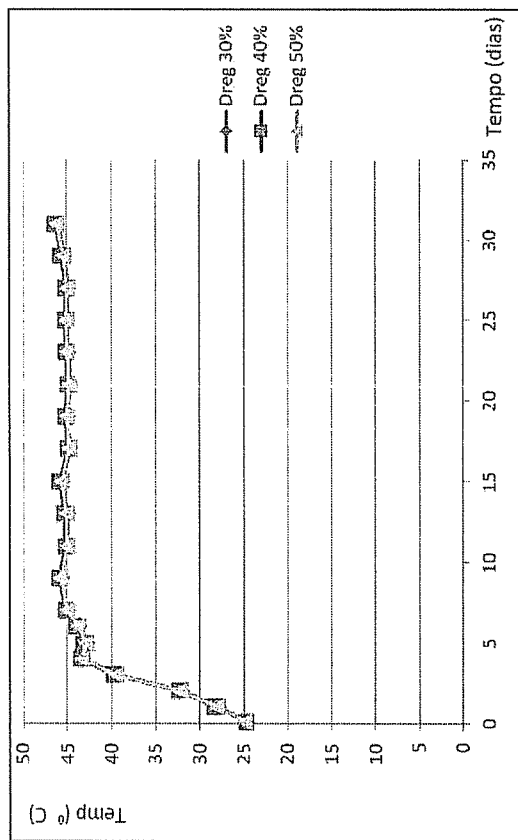
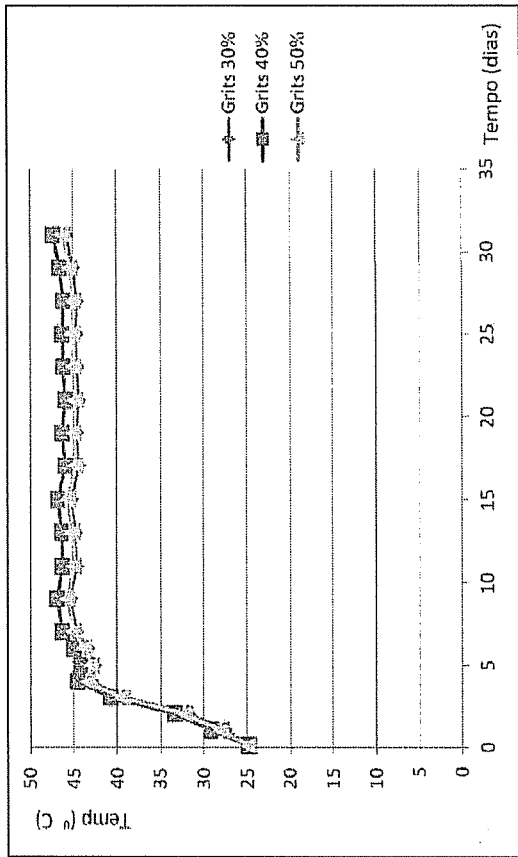


Figura 7- Monitoramento da temperatura

### 5.1.2. pH

Segundo a Resolução CONAMA nº 375 (CONAMA, 2006), a quantidade de álcali misturada com o lodo deve ser suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas, sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali. Os registros de pH da mistura (lodo+resíduo) são referenciados à temperatura de 25<sup>0</sup>C.

Os gráficos da Figura 8 apresentam as variações de pH verificadas para os tratamentos com dregs (30%,40% e 50%), grits (30%,40% e 50%), cal (10%,30%,40%, 50% e 60%) e lodo durante o período de monitoramento de 31 dias.

Conforme análise da Figura 8, observou-se que todos os tratamentos, exceto para o tratamento de cal 60%, não atenderam à condição de pH próximo de 12 nas primeiras duas horas após a mistura e acima de 11,5, após 22 horas, conforme descrito pela Resolução CONAMA nº 375 (CONAMA, 2006).

Nota-se que o tratamento com a cal hidratada na concentração de 60% obteve maior eficiência na elevação e manutenção de valores mais altos de pH, comparados aos tratamentos com a cal hidratada nas concentrações de 10%, 30%, 40%, 50%, e com os resíduos alcalinos durante todo o período de monitoramento.

Observou-se que, para o tratamento com dregs 30% o pH atingiu os maiores valores entre 5 a 20 dias após a mistura (lodo+resíduo) quando comparado com os tratamentos de dregs 40% e dregs 50% no mesmo período. Esse comportamento pode ser resultante da coleta de amostras em áreas com maiores concentrações do resíduo. A formação de torrões, comum em lodos de leito de secagem, são de difícil quebra, isso dificulta a mistura do lodo com o resíduo, podendo, dessa forma, ser mantidas áreas onde há maior contato do lodo com o resíduo, e assim, ter influenciado na análise de pH.

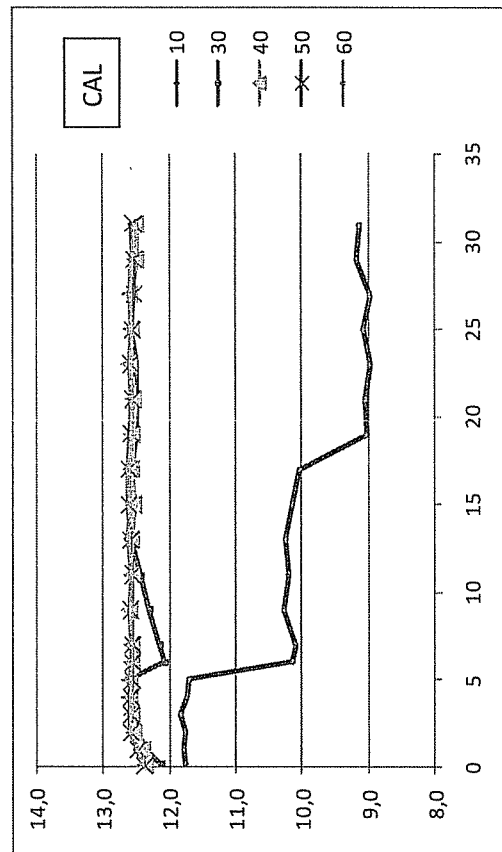
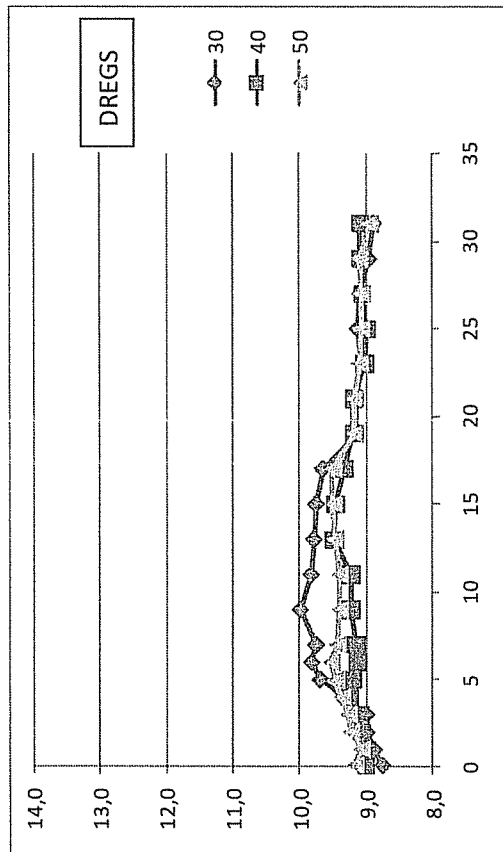
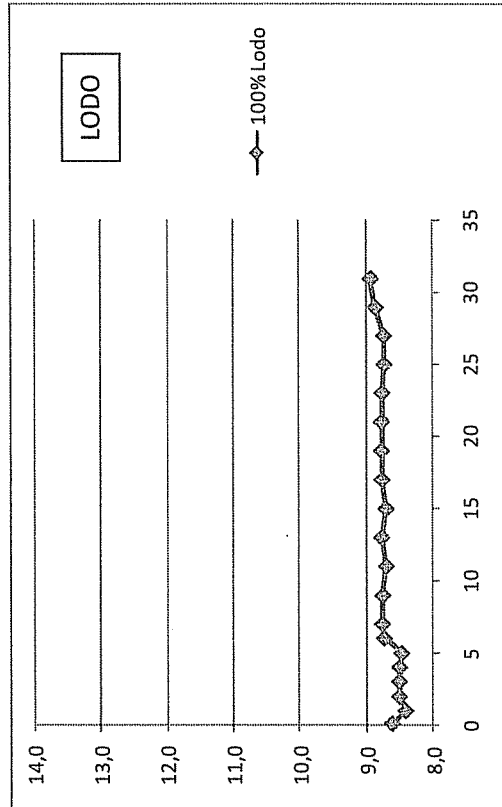
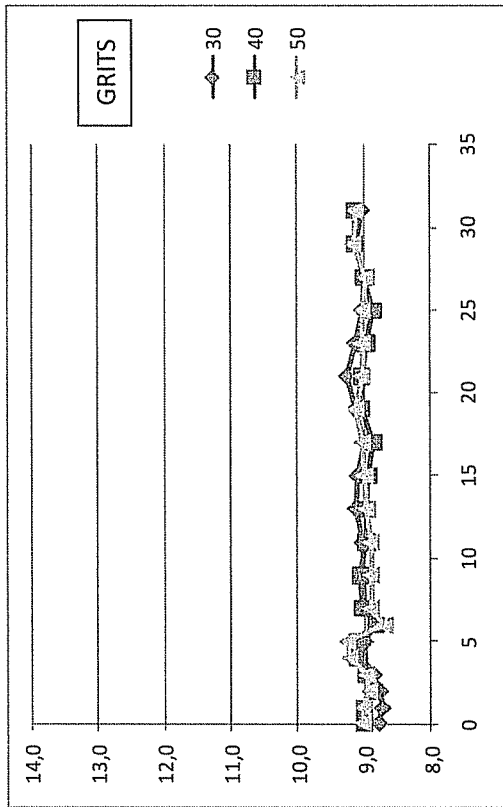


Figura 8- Monitoramento do pH.

### 5.1.3. Coliformes Totais e *E.coli*

A Tabela 14 apresenta os resultados do monitoramento de coliformes totais (CT) e *E.coli*. Coliformes totais não é um parâmetro de controle estabelecido pela resolução CONAMA nº375/2006, mas foram incluídos como informações adicionais.

As análises de CT e *E.coli* foram realizadas em três fases do experimento (1 dia, 5 dias e 21 dias após o início do experimento), nas quais foram possíveis verificar o tempo de ação dos tratamentos em termos da inibição microbiológica para cada tipo de tratamento utilizado.

**Tabela 14-** Resultados do monitoramento de *E. coli* coliformes totais (CT).

<i>E. coli</i> e Coliformes totais (CT) (NMP/g de ST)						
Amostra	1 dia		5 dias		21 dias	
	<i>E.coli</i>	CT	<i>E.coli</i>	CT	<i>E.coli</i>	CT
DREG 30%	$>2,43 \times 10^3$	$>6,0 \times 10^4$	$< 1$	$9,13 \times 10^2$	$< 1$	$1,56 \times 10$
DREG 40%	$>2,43 \times 10^3$	$>6,0 \times 10^4$	$< 1$	$1,94 \times 10^2$	$< 1$	$< 1$
DREG 50%	$>2,43 \times 10^3$	$>6,0 \times 10^4$	$< 1$	$3,94 \times 10^2$	$< 1$	$< 1$
GRITS 30%	$>2,43 \times 10^3$	$>6,0 \times 10^4$	$< 1$	$6,25 \times 10^2$	$< 1$	$< 1$
GRITS 40%	$>2,43 \times 10^3$	$>6,0 \times 10^4$	$< 1$	$6,81 \times 10^2$	$< 1$	$< 1$
GRITS 50%	$>2,43 \times 10^3$	$7,75 \times 10^2$	$< 1$	$1,25 \times 10^2$	$< 1$	$< 1$
CAL 10%	$>2,43 \times 10^3$	$5,25 \times 10^3$	$< 1$	$3,25 \times 10^2$	$< 1$	$< 1$
CAL 30%	$>2,43 \times 10^3$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$
CAL 40%	$>2,43 \times 10^3$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$
CAL 50%	$>2,43 \times 10^3$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$
CAL 60%	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 1$
LODO	$5,6 \times 10^4$	$2,12 \times 10^5$	$3 \times 10^3$	$2,83 \times 10^4$	$< 1$	$3,13 \times 10^3$

Conforme pode ser verificado na Tabela 14, os valores encontrados para *E. coli* em todos os tratamentos, atingiram em 5 dias, valores menores ao estipulado pela Resolução CONAMA nº 375/2006 para lodo de esgoto tipo A, de  $10^3$  NMP/g de ST. Ocorreu eliminação muito rápida das populações de coliformes totais e *E.coli*, evidenciando a eficácia do processo de higienização utilizando cal e resíduos alcalinos, para obtenção de lodo classe A (em termos de qualidade bacteriológica) em curto espaço de tempo.

De acordo com Pinto (2001), a atividade microbiana se desenvolve em ambientes com pH entre 6,5 e 9,0. Quando se eleva o pH do lodo, ocorre alteração da natureza coloidal

do protoplasma celular dos patógenos de forma letal, produzindo um ambiente inóspito para a sua sobrevivência. A dissociação iônica do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em íons cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) e íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), explicam as propriedades biológicas e antimicrobianas desta substância.

Como já referido anteriormente na revisão bibliográfica, a inativação de organismos patogênicos em processos de caleação utilizando-se a cal hidratada é resultado conjunto dos efeitos da elevação do pH e da liberação de amônia (PECSON *et al.*, 2007). Destaca-se que os teores de amônia não foram monitorados e os experimentos de caleação foram conduzidos em período de verão e com alta incidência solar no decorrer do dia. Aspectos que podem ter contribuído para a eficiência verificada.

Bastos *et al.* (2007), trabalhando com o mesmo tipo de lodo do presente estudo, observaram decaimento mais lento de coliformes totais e *E. coli*. Com aplicação de cal a 30% do peso seco em lodo com 74% de umidade, ao final de 90 dias as populações remanescentes eram de  $1,49 \times 10^4$  CT / g ST e  $9 \times 10$  *E.coli* / g ST; com aplicação de cal a 40% do peso seco em lodo com 72% de umidade, ao final de 90 dias ainda restavam  $1,8 \times 10^2$  CT / g ST e  $9 \times 10$  *E.coli* / g ST; com aplicação de cal a 50% do peso seco em lodo com 73% de umidade, ao final de 60 dias foram encontrados  $3,2 \times 10$  CT / g ST e  $0,9$  *E.coli* / g ST.

Barony (2011), também trabalhando com o mesmo tipo de lodo do presente estudo, observou decaimento mais lento de *E.coli*. O biossólido caleado com a adição de 50% de CaO (em relação ao peso do lodo em base seca) atingiu padrão Classe A com 29 dias.

Rocha (2009), também avaliando a eficiência da caleação do lodo de reator UASB, utilizando cal hidratada nas concentrações de 12,6%, 21% e 29,4%, observou que com a aplicação de cal hidratada nas concentrações de 21% e 29,4% o limite estipulado pela Resolução CONAMA nº 375/2006 de  $10^3$  NMP/g de ST, para lodos tipo A, foi atingido em 15 dias, e para a concentração de 12,6% esse limite foi atingido em 90 dias.

## **5.2. Avaliação dos aspectos referentes a caracterização do potencial agrônômico do biossólido higienizado com os resíduos de dregs e grits**

As tabelas 15 e 16 apresentam os resultados obtidos das análises químicas realizadas de forma a caracterizar os biossólidos produzidos tendo em vista seu potencial agrônomo.

**Tabela 15-** Caracterização química dos biossólidos produzidos após a mistura com resíduo alcalino (dregs ou grits) ou mistura com a cal.

	N (g/Kg)	K (mg/kg)	Na (mg/kg)	Ca (mg/L)	Al (mg/L)
CAL 10%	30,45	5.500	1.100	90.850	17.770,75
CAL 30%	27,50	5.500	1.200	107.100	18.390
CAL 40%	20,30	5.000	2.000	131.900	16.233
CAL 50%	17,46	4.500	2.200	141.300	15.487,5
CAL 60%	15,02	4.000	2.280	150.100	14.301,5
GRITS 30%	19,63	5.500	33.000	150.850	14.321
GRITS 40%	16,54	4.400	38.500	155.000	15.583,75
GRITS 50%	14,99	4.400	40.700	156.050	18.400,5
DREGS 30%	13,75	20.900	143.000	143.150	9.199,5
DREGS 40%	12,70	22.000	144.100	201.800	9.437,5
DREGS 50%	10,00	22.000	148.500	206.700	14.183,25
LODO	42,81	22.000	141.900	6.137,5	20.970

**Tabela 16-** Caracterização química dos biossólidos produzidos após a mistura com resíduo alcalino (dregs ou grits) ou mistura com a cal.

	Mg (mg/L)	C.O (dag/Kg)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
CAL 10%	42,00	27,40	---	884,00
CAL 30%	52	22,37	---	764,25
CAL 40%	65,50	21,02	---	758,25
CAL 50%	69,75	16,44	---	745,25
CAL 60%	82	10,25	---	709,75
GRITS 30%	48,25	17,08	---	891,50
GRITS 40%	90,50	16,12	---	852,75
GRITS 50%	90,75	13,54	---	837,25
DREGS 30%	11.212,50	18,69	---	21.765
DREGS 40%	14.425	17,08	---	19.020
DREGS 50%	17.237,50	12,25	18.309	14.922
LODO	103,25	27,72	268.285,50	1.190,75

De acordo com os resultados das tabelas 15 e 16, o aumento da concentração de resíduos alcalinos e cal provocaram redução do teor carbono orgânico e perdas de nitrogênio por volatilização da amônia, conforme encontrado por Tsutiya *et al.*(2001) e Andreoli *et al.* (2001). De acordo com os autores, a conversão de NH<sub>4</sub> em amônia (NH<sub>3</sub>) é de 50%, quando o pH atinge o valor de 9,4, e 100% para o pH acima de 11,4. Embora represente uma perda expressiva de nitrogênio, esse processo auxilia na inativação dos patógenos presentes no lodo (BURNHAM *et al.*, 1992 apud PEGORINI *et al.*, 2006).

Teores mais elevados de sódio (Na), cálcio (Ca), alumínio (Al) e magnésio (Mg) foram encontrados nas amostras nas quais foram adicionadas maiores quantidades de resíduos alcalinos e cal. O aumento da concentração de resíduos alcalinos e cal provocaram redução do teor potássio (K) e manganês (Mn). As tabelas 17 e 18 apresentam resultados médios de três repetições para concentrações de metais encontradas nas amostras dos biossólidos em comparação a concentração máxima permitida de acordo com a Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375.

**Tabela 17-** Concentrações de metais encontradas nas amostras dos biossólidos.

Parâmetros	Tratamentos					CONAMA N <sup>o</sup> 375
	Cal 10%	Cal 30%	Cal 40%	Cal 50%	Cal 60%	
Cromio (Cr)	8,87	74,87	103,37	110,37	158,12	1000
Cobre (Cu)	204,75	204	190,75	184,50	167,50	1500
Níquel (Ni)	30,62	36,12	49,12	49,62	43,87	420
Cádmio (Cd)	7,25	8,5	8,5	9,5	10,25	39
Chumbo (Pb)	---	---	---	---	---	300
Zinco (Zn)	629,25	578,25	522,75	493,62	491,37	2800

**Tabela 18-** Concentrações de metais encontradas nas amostras dos biossólidos.

Parâmetros	Tratamentos							Lodo	CONAMA Nº 375
	Grits 30%	Grits 40%	Grits 50%	Dregs 30%	Dregs 40%	Dregs 50%			
Cromio (Cr)	114,62	89,125	95,62	23,12	162,62	215,87	100,37	1000	
Cobre (Cu)	226,25	178	171,25	200,75	165,75	161	352,75	1500	
Níquel (Ni)	33,62	29,37	26,12	61,87	48,37	47,62	20,12	420	
Cádmio (Cd)	9	8,50	7,25	11	12	10,75	3,25	39	
Chumbo (Pb)	---	---	---	---	---	---	---	300	
Zinco (Zn)	633,75	546,62	524,37	544,37	424,12	421,12	857,25	2800	

**Nota:** concentrações em mg/kg, base seca; (---) valores abaixo do nível de detecção. Valores médios de três repetições.

Os resultados de metais pesados encontrados nas amostras foram muito inferiores aos limites estipulados pela Resolução CONAMA Nº 375. Pode-se observar, que as concentrações destes metais encontram-se inferiores aos limites máximos para sua aplicação na agricultura, propostos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2002) que são de 500 mg Pb.kg<sup>-1</sup>, 500 mg Cu.kg<sup>-1</sup>, 1.500 mg Zn.kg<sup>-1</sup>, 300 mg Cr.kg<sup>-1</sup>, 100 mg Ni.kg<sup>-1</sup>. O metal Pb não foi detectado nos substratos dos tratamentos.

As baixas concentrações de metais encontradas no lodo são consistentes com a origem do esgoto sanitário local, oriundo exclusivamente de residências. As concentrações superiores de Ni e Cd verificadas nas amostras nas quais houve adição de cal ou resíduo alcalino, em comparação as amostras de lodo, podem estar associados ao efeito da elevação do pH, que conforme Andreoli (2001) promove a fixação de metais.

Destaca-se que, com a elevação do pH do lodo, possibilitado pela adição de resíduos alcalinos ou pela cal, haverá uma grande influência na absorção de metais pelo solo e pelas plantas. O lodo com baixo pH (menor que 6,5) promove a perda e a percolação de metais pesados eventualmente presentes na massa de lodo. O elevado pH (maior que 11) impede a movimentação de metais pesados através do solo (JÚNIOR, 2001).

Tendo em vista a avaliação dos aspectos referentes a caracterização do potencial agrônômico do biossólido higienizado com os resíduos de dregs e grits, o uso agrícola pode ser considerado uma opção de disposição viável do ponto de vista ambiental. No entanto, os cuidados com relação aos aspectos sanitários e de contaminação por metais devem ser objetos de controle.

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo, conduzido por meio de experimentos em ambiente controlado (estufa agrícola), teve como objetivo a investigação e análise da utilização de resíduos alcalinos da indústria de polpa celulósica para o processo de higienização química de lodo gerado no tratamento biológico de esgoto sanitário.

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que:

- A utilização de resíduos alcalinos da indústria de polpa celulósica, dregs e grits, para higienização química de lodo do tratamento biológico de esgoto sanitário, foi eficiente na eliminação de *E.coli*, atingindo em 5 dias, valores menores ao estipulado pela Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375/2006 (CONAMA, 2006) para lodo de esgoto tipo A, de 10<sup>3</sup> NMP/g de ST.
- O tratamento com a cal hidratada na concentração de 60% obteve maior eficiência na elevação e manutenção de valores mais altos de pH, comparados aos tratamentos com a cal hidratada nas concentrações de 10%, 30%, 40%, 50%, e com os resíduos alcalinos durante todo o período de monitoramento.
- O aumento da concentração de resíduos alcalinos e cal provocaram redução do teor de carbono orgânico, de macro (N e K) e de micronutrientes (Mn, Zn e Cu) e perdas de nitrogênio por volatilização da amônia.
- As concentrações de metais pesados encontrados nas amostras foram inferiores aos limites máximos, propostos pela Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 375/2006 (CONAMA, 2006).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Resíduos sólidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. NBR 10.007: **Amostragem de resíduos sólidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004b.

AISSE, M. M.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Aspectos Tecnológicos e de processos. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de Biossólidos – Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba: Finep, 2001, 2.ed., cap.2, p. 49-119.

ALMEIDA, H. C.; SILVEIRA, C. B.; ERNANI, P. R.; CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, D. Composição química de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose (dregs). **Química Nova**, v. 30, n. 7, p1669-1672. São Paulo. 2007. Disponível em < <http://www.scielo.br/scielo> > Acessado em 15 de janeiro de 2014.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 22<sup>a</sup> ed. Baltimore: APHA, 2012.

BARONY, F, A. **Biossólidos: produção, efeitos no crescimento de mudas de eucalipto e avaliação de risco à saúde humana**. 2011. 153f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2011.

BARRETTO, V. C. M. **Resíduos de indústria de celulose e papel na fertilidade do solo e no desenvolvimento de eucalipto**. Tese de doutorado apresentada a Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2008.

BASTOS, R. K. X.; ASSUNÇÃO, F. A. L.; ROSA, A. P.; HENRIQUE, C. S.; SOUZA, A. C. S. Gerenciamento do lodo em um sistema UASB + BF. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v.1, n.2. p 1-7, 2007.

BARROS, I. T.; COSTA, A. C. S.; ANDREOLI, C. V. Avaliação da higienização de lodo de esgoto anaeróbio através do tratamento ácido e alcalino. **SANARE – Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, v.24, n.24, p.61-69, 2006.

BERGAMIN, F.N.; ZINI, C.A.; GONZAGA, J.V.; BORTOLAS, E. Resíduo de fábrica de celulose e papel: lixo ou produto? In: SEMINÁRIO SOBRE USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E URBANOS EM FLORESTAS, 1994, Botucatu. [Anais]. Botucatu: UNESP. Faculdade de Ciências Econômicas, 1994. p.97-120.

BETTIOL, W., CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). **Circular Técnica nº 03 – Recomendações Técnicas para o Uso Agrícola do Composto de Lixo Urbano no Estado de São Paulo.** Campinas – SP, Novembro, 2002.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 23, de 31/08/2005. Aprova as Definições e 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. **Diário Oficial da União.** 2005.

CABRAL, F.; RIBEIRO, H. M.; HILÁRIO, L.; MACHADO, L.; VASCONCELOS, E. Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials. **Bioresource Technology**, n. 99, p. 8294–8298, 2008.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. cap. 9, p.173-180.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001 b. cap. 19, p.270-276.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Norma P4.230:** Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação. 32pp. São Paulo, 1999.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2007, 2.ed. 380 p.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 375: Ministério do Meio Ambiente, 2006, 32 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Silva, F. C. (org.). Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 1999. 203p.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Methods for the isolation and enumeration of *Escherichia coli*, including verocytotoxigenic *Escherichia coli*. UK, 2003. In: The Microbiology of Sewage Sludge (2003) - Part 3.

FERNANDES, F.; ANDRAUS, S.; ANDREOLI, C.V. BONNET, B. R. P.; BORGES, J. C.; CANTO, L.A.; MEDEIROS, M. L. B. Eficiência dos processos de desinfecção do lodo da ETE-Belém com vista a seu uso agrícola. *Sanare*, v.5, n.5, p. 46-58, 1996.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: BETTIOL, W., CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 45-68.

GODINHO, V. M.. **Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de *Ascaris sp.* em lodos anaeróbios in natura e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 122 p. 2003.

GOUVEA, I. C. **Estudo e avaliação da distribuição química de metais pesados na compostagem de lodo de esgoto**. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa. 256p. 1996.

GUERRA, M. A. S. L. **Avaliação de indicadores biológicos e físico químicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose**. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, 2007. 61p.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 1050 p.

LELIS, M. N.; BRASIL, M. S.; MOUNTEER, A. H. Reciclagem de biossólidos: gerenciamento, tratamento e normatização. In: III Encontro de Preservação de Mananciais da Zona da Mata Mineira. *Anais...* Viçosa: Universidade Federal de Viçosa- UFV, 392p. 2003.

LIMA, M. R. P. **Uso da estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. 2010. 284 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Disponível em: <w.teses.usp.br/.../3/.../Tese\_Marcia\_Regina\_Pereira\_Lima.pdf>. Acessado em: 01 de maio de 2014.

MACDONALD, R. G. **Papermaking and paper board making**. New York: McGraw-Hill, 1970.

MALTZ,R; TEIXEIRA, J.R; MORAIS, S.P. **Destinação final dos resíduos sólidos da Riocell S. A.** Guaíba: Vida Desenvolvimento Ecológico, 1999. 85 p.

MARTINS, F. M.,MARTINS, J.M.,FERRACIN,L.C.,CUNHA,C.J., Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a kraft pulp and paper Mill. **Science Direct**, n. 147, p. 610–617, 2007.

MATOS, A. T.; BRASIL, M. S. Aproveitamento agrícola de biossólidos. In: III Encontro de Preservação de Mananciais da Zona da Mata Mineira. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2003. 392p.

MEDEIROS, J. C. **Resíduo alcalino da indústria de papel e celulose na correção da acidez de um cambissolo húmico álico .** 2008. 79 p.

MEDEIROS, J.C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; BATISTELLA, F.; GRAH, J. Calagem superficial com resíduo alcalino da indústria de papel e celulose em um solo altamente tamponado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1657-1665, 2009.

MENELI, J. C. **Gestão sistêmica dos processos industriais de uma fábrica de celulose.** Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, 2013. 57p.

METCALF; EDDY, INC. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse.** New York: Ed. McGraw-Hill, 2002. 1334 p.

MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas.** 1998. 405 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MORAIS, A. A. **Uso de ozônio como pré e pós- tratamento de efluentes da indústria de celulose kraft braqueada.** Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2006. 97p.

MORRIS, L.A.; NUTTER, W.L. Pinus taeda seedling growth following application of ash and sludge residues from kraft pulp mills: glasshouse and first year field trial. In: **Polglase, P.J.; Tunnigley (eds.). land treatment collective meeting - land application of wastes in australia and new zealand research and practice proceedings.** Camberra: 1994, p. 56-66.

PECSON, B. M.; BARRIOS, J. A.; JIMÉNEZ, B. E.; NELSON, K. L. The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of Ascaris eggs in sewage sludge. **Water Research**. v. 41, n.13, p. 2893 – 2902, 2007.

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

PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; ANDRADE, F. L.; TORREZAN, H. T. Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: I potencial de alcalinização prolongada. In: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 8., 2006, Fortaleza. **Anais...**Rio de Janeiro: Abes, 2006.

PHILIP, P. **Celulose e Papel- Tecnologia da fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: IPT, 1988.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento Básico do Paraná- SANEPAR, v.6.1.ed.2001.

PIOTTO, Z. C. Eco-eficiência na indústria de celulose e papel. 357 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

QUALLICAL. Empresa em qualidade de cal. Disponível em < <http://quallical.com.br> > Acesso em 10 de maio de 2014.

ROCHA, A.L.C.L. **Higienização de lodo anaeróbico de esgoto por meio alcalino estudo de caso da ETE Lages – Aparecida de Goiânia – GO**. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, 2009. 118p.

SANEPAR. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. Curitiba, 1997. 96p.

SILVA, S. M. C. P. FERANDES, F. SOCCOL, V. T. MORITA, D. M. Principais contaminantes do lodo. In: **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. v.6. 1.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG; Companhia de Saneamento Básico do Paraná - SANEPAR, 2001.

SOUZA, H. A.. **Estudo da contaminação ambiental na área do aterro sanitário da BR-40, da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte - MG**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 1998. 145p.

TEIXEIRA, J. R. **Utilização de resíduos sólidos alcalinos de indústria de celulose na correção de acidez do solo.** Dissertação de mestrado em ciências do solo. Programa de pós-graduação em ciências do solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS. Porto Alegre. 2003.

TRIGUEIRO, R. M. **Efeito de “dregs e grits” nos atributos de um neossolo Quartzarênico e na produção volumétrica de eucalipto.** Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura. UNESP. 2006.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: **Biossólidos na Agricultura.** Editores M. T. TSUTIYA, J. B. COMPARINI, P. A. SOBRINHO, I. HESPANHOL, P. C. T. CARVALHO, A. J. MELO, e M. O. MARQUES – 1ª edição São Paulo: SABESP, 2001. x – 468p.

US EPA: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Test methods for evaluating solid waste: physical/chemical methods.** 3ª ed. Washington, DC: EPA, 910 p. 2004.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001, p.17-68. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 6).

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: UFMG, SANEPAR, 2001. p. 13-16.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade da água e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 452 p. 2005. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias, 1).

ZAMBRANO, M.; PARODI, V.; BAEZA, J.; VIDAL, G.; Acids soils' ph and nutrient improvement when amended with inorganic solid wastes from kraft mill of the Chilean **Chemical Society**, v. 52, n.2, p.1169-1172, 2007.

ZAMBRANO, M.; PICHÚN, C.; ALVEAR, M.; VILLARROEL, M.; VELÁSQUEZ, I.; BAEZA, J.; VIDAL, G. Green liquor dregs effect on kraft mill secondary sludge composting. **Bioresource Technology**, v.52, n. 101, p. 1028–1035, 2008.

**ANEXO 1**  
**RESULTADOS PARA O TESTE F E SCOTT KNOTT**

**1. DREGS**

FV	GL	TEMP_SQ	TEMP_QM	TEMP_F	TEMP_p	PH_SQ	PH_QM	PH_F	PH_p
REP	2	8,965	4,482	0,0463	0,955	0,000	0,000	0,003	0,997
PercMat	2	24,041	12,021	0,124	0,886	0,910	0,450	2,542	0,194
PercMat*REP (Erro_A)	4	387,060	96,765			0,710	0,180		
TEMPO	19	6748,571	355,188	22591	0,000	8,790	0,460	23	0,000
REP*TEMPO (Erro_B)	38	0,597	0,016			0,780	0,020		
PercMat*TEMPO	38	1,1670	0,031	0,1246	1,000000	3,50	0,09	2,6404	0,000
Erro C	76	18,7380	0,247			2,65	0,03		
Total	179	7189,1000				17,34			

**2. GRITS**

FV	GL	TEMP_SQ	TEMP_QM	TEMP_F	TEMP_p	PH_SQ	PH_QM	PH_F	PH_p
REP	2	114,627	57,314	1,7876	0,278822	0,01	0,01	0,8495	0,4926
PercMat	2	71,168	35,584	1,1099	0,413594	0,02	0,01	0,9514	0,4592
PercMat*REP (Erro_A)	4	128,245	32,061			0,03	0,01		
TEMPO	19	6699,244	352,592	2141	0,000000	1,54	0,08	9	0,0000
REP*TEMPO (Erro_B)	38	6,257	0,165			0,33	0,01		
PercMat*TEMPO	38	4,123	0,109	1,1138	0,338982	0,99	0,03	2,6995	0,0001
Erro C	76	7,404	0,097			0,73	0,01		
Total	179	7031,1				3,66			

**CAL**

FV	GL	TEMP_SQ	TEMP_QM	TEMP_F	TEMP_p	PH_SQ	PH_QM	PH_F	PH_p
REP	2	261,2661	130,633	2,6300	0,132491	0,030101	0,01505	2,0780	0,1875
PercMat	4	730,7089	182,6772	3,6778	0,055287	250,1115	62,52788	8633,0687	0,0000
PercMat*REP (Erro_A)	8	397,3639	49,67049			0,057943	0,007243		
TEMPO	19	11806,27	621,3826	1654	0,000000	13,52715	0,711955	50	0,0000
REP*TEMPO (Erro_B)	38	14,2766	0,3757			0,545086	0,014344		
PercMat*TEMPO	76	37,61113	0,494883	3,8615	0,000000	60,29752	0,793388	71,0775	0,0000
Erro C	152	19,48007	0,128158			1,696671	0,011162		
Total	299	13267,0				326,27			

**3. LODO**

FV	GL	TEMP_SQ	TEMP_QM	TEMP_F	TEMP_p	PH_SQ	PH_QM	PH_F	PH_p
REP	2	943,8	471,9	32,349	0,000000	0,005	0,002	0,3	0,772412
TEMPO	19	2329,1	122,6	8,403	0,000000	1,139	0,060	6,4	0,000001
Erro	38	554,3	14,6			0,354	0,009		