

Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB

Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas



Coordenação

Ricardo Franci Gonçalves

Departamento de Hidráulica e Saneamento
Centro Tecnológico
Universidade Federal do Espírito Santo

Dezembro de 1999

AUTORES

COORDENADOR

Ricardo Franci Gonçalves

Engenheiro Civil e Sanitarista - UERJ (1984), Pós-Graduado em Eng^a de Saúde Pública - ENSP/RJ (1985), DEA Ciências do Meio Ambiente - Universidade Paris XII, ENGREF, ENPC, Paris (1990), Doutor em Engenharia do Tratamento e Depuração de Águas - INSA de Toulouse, França (1993), Prof. Adjunto do Departamento de Hidráulica e Saneamento e do Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

AUTORES

Aureliano Nogueira da Costa

Pesquisador do CPDN – Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária e extensão Rural (EMCAPER), Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Bruno Krohling

Engenheiro agrônomo – UFES (1995), Mestrando em Engenharia Ambiental - UFES

Celson Rodrigues

Engenheiro agrônomo, Mestre em fitopatologia pela Universidade Federal de Viçosa, Professor adjunto do Centro Agropecuário da UFES.

Claudia Rodrigues Teles

Engenheira Florestal – UFLA (1995), Mestre em Engenharia Ambiental – UFES (1999), Pesquisadora bolsista DTI do CNPq / RHAE /PROSAB na SANEPAR.

Claudio Gomes do Nascimento

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa; mestrando em Engenharia Ambiental - UFES, engenheiro da Divisão de Saneamento da Cidade – Prefeitura Municipal de Vitória (ES)

Fabiana Reinis Franca Passamani

Bióloga graduada pela UFES (1992), Pesquisadora bolsista DTI / CNPq/RHAE – UFES – DHS (Programa de Saneamento Básico/PROSAB).

Fabírcia Fafá de Oliveira

Engenheira Civil - UFES (1988), Mestre em Engenharia Ambiental - UFES (1996), Professora Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFES.

Márcia Regina Pereira Lima

Engenheira civil - UFES (1989); pós graduada em Saneamento - CEFET - MG (1995); Mestre em Engenharia Ambiental - UFES (1996) Professora da Escola Técnica Federal do Espírito Santo.

Ricardo Franci Gonçalves

AGRADECIMENTOS

Essa obra faz uma síntese do conhecimento adquirido pelo grupo de pesquisadores do Laboratório de Saneamento, do Departamento de Hidráulica e Saneamento – Centro Tecnológico, da Universidade Federal do Espírito Santo, sobre o gerenciamento de lodo em lagoas de estabilização não mecanizadas. Trata-se de um problema que atinge ou atingirá a grande maioria das estações de tratamento de esgotos com lagoas no Brasil, e que muito se assemelha às doenças assintomáticas que manifestam suas verdadeiras proporções em situações próximas do colapso do sistema. Depois de mais de dois anos estudando o assunto, podemos afirmar sem dúvidas que não há convergência no país sobre os procedimentos para gerenciar lodos de lagoas.

A oportunidade do nosso grupo concentrar atenções sobre o assunto foi viabilizada através do Edital 01/96 do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB. Tendo em vista a complexidade do tema, buscamos realizar uma pesquisa ampla, que abordasse as diferentes etapas que compõem o gerenciamento racional do lodo deste tipo de processo, envolvendo profissionais de várias instituições e de diferentes formações. Inicialmente, procuramos entender os mecanismos que resultam na formação do lodo em lagoas, e que exercem influência direta nas suas características, para, em uma segunda etapa, avaliar procedimentos e técnicas de engenharia para soluções estruturadas para o problema.

Os resultados aqui resumidos são fruto do trabalho coletivo envolvendo pessoas e instituições, sem dúvida a mais enriquecedora experiência que vivemos nesse período. Agradecemos às diretorias da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) e da Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural (EMCAPER) pelo apoio direto em todas as etapas do estudo. Aos colegas da SANEPAR, sob a coordenação dos Engenheiros Cleverson Andreoli e Fernando Fernandes, agradecemos pela constante troca de informações no âmbito da Rede 4 do PROSAB, e por aceitarem em nos tutorear durante nossa infância científica e tecnológica sobre o assunto. O delineamento do panorama nacional referente aos lodos de lagoas só foi possível devido à colaboração das empresas operadoras que nos concederam a gentileza de responder o questionário sobre detalhes operacionais. Todas encontram-se citadas na tabela 1.1 do primeiro capítulo do livro.

Aos demais profissionais que, direta ou indiretamente, participaram dos trabalhos de pesquisa, registramos nosso agradecimentos, e em especial a: José Maria Motta Filho, José Aires Ventura, Jacimar Luiz de Souza, Ary Bartholomeu Pereira Jr., Elsa Maria da Silva Barreto, Carla Maria da Silva Vianna, Paulo Sérgio Muller, Vanicleide Soeiro Bof, Elias Júnior, Marilza Alves de Faria, Jeane de Souza Oliveira, Rodrigo Santos Thompson, Giovana Fanti Ferrari, Ibanês Lurdes Pereira, Márcio Pacheco e Elza de Abreu Costa, Katy Francis Figueiredo e Juciane Motta.

Agradecemos também aos colaboradores anônimos, sem os quais a pesquisa não teria sido realizada, dentre os quais citamos: os funcionários do setor de transporte e do setor administrativo da UFES, os funcionários do setor operacional da CESAN e os empregados contratados para montagem e operacionalização dos experimentos de reciclagem agrícola na EMCAPER.

E, finalmente, agradecemos ao grupo coordenador do PROSAB, e em especial a Elisabeth Guedes e Célia Poppe, pelo apoio constante e pelo paciente incentivo no sentido da concretização desse livro.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Remoção de lodo em lagoas de estabilização no país (informações obtidas entre novembro e dezembro de 1996)	4
Tabela 1.2 - Processamento do lodo nos principais sistemas de tratamento de esgotos utilizados no Brasil (Fonte : Von Sperling (1998))	5
Tabela 3.1 - Taxas de acumulação de lodo em lagoas anaeróbias e facultativas primárias	15
Tabela 3.2 - Resultados das batimetrias e estimativa da produção de lodo em lagoas de estabilização no ES	16
Tabela 3.3 - Estimativas de produção de lodos em diferentes processos de tratamento de esgotos sanitários	16
Tabela 3.4 - Resumo de estimativas de lodos acumulados na lagoa através da taxa volumétrica “per capita” e do modelo Saqqar e Pescod (1995)	22
Tabela 4.1- Teores de sólidos totais e de sólidos voláteis em diferentes tipos de lagoas de estabilização operando no ES	25
Tabela 4.2 - Teores de nutrientes nos lodos de lagoas operando no ES e valores típicos de lodo de esgoto digerido e de fertilizantes agrícolas	26
Tabela 4.3 - Concentrações de metais pesados nas lagoas estudadas comparados com outros sistemas.	27
Tabela 4.4 - Padrões referentes a metais em lodo de esgoto utilizados na agricultura e nos solos agrícolas (Normas dos EUA e da Comunidade Européia)	28
Tabela 4.5 - Resultados comparativos de coliformes fecais e ovos de helmintos no lodo de ETE's de Brasília e Espírito Santo	30
Tabela 4.6 - Principais patógenos presentes em águas residuárias municipais e lodos	33
Tabela 4.7 - Limites estabelecidos para patógenos pela legislação do Paraná e dos Estados Unidos.	34
Tabela 5.1 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias apresentadas para remoção de lodo de lagoas	42
Tabela 5.2 - Avaliação comparativa entre as tecnologias apresentadas para remoção de lodo de lagoas	43
Tabela 6.1 - Principais soluções operacionais para a manutenção dos leitos de secagem	54
Tabela 7.1 - Processos de higienização do lodo.	56
Tabela 8.1 - Características médias das mudas de tamboril submetidas aos tratamentos com lodo calado.	63
Tabela 8.2 - Características médias das mudas de tamboril submetidas aos tratamentos com lodo pasteurizado.	63
Tabela 8.3 - Teores médios de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de mudas de cafeeiros (substrato: lodo de esgoto calado + doses de cloreto de potássio)	66

LISTA DE SÍMBOLOS

t_v	= Taxa volumétrica “per capita” de acumulação de lodo
V	= Volume de lodo acumulado no período considerado
P	= N° de habitantes com ligação à rede coletora que contribui p/ a ETE
T	= Tempo de operação da lagoa, decorrido desde a última batimetria
t_L	= Taxa linear de acumulação de lodos
h	= Altura média da camada de lodos
F_L	= Taxa de acumulação de lodo na lagoa
$F_{XSS,0}$	= Carga de sólidos suspensos na entrada da lagoa
$F_{XSS,1}$	= Carga de sólidos suspensos na saída da lagoa
ΔF_X	= Taxa de produção de sólidos por ação biológica
Y	= Coeficiente de rendimento (crescimento do lodo)
$F_{CDBO,0}$	= Carga de DBO ₅ na entrada da lagoa
$F_{CDBO,1}$	= Carga de DBO ₅ na saída da lagoa
Q_{AS}	= Volume de lodo acumulado diariamente na lagoa
SG_s	= Massa específica do lodo
ρ_w	= Densidade da água
w_s	= Teor de umidade do lodo
f_1	= Fração de $F_{XVSS,0}$ removida na lagoa
f_2	= Fração de $F_{XFSS,0}$ removida na lagoa
f_3	= Fração de $F_{CDBO,0}$ removida na lagoa
j_1	= Fração de F_{XSSV} não destruída por digestão anaeróbia na lagoa
j_2	= Fração de F_{XSSF} não destruída por digestão anaeróbia na lagoa
j_3	= Fração de sólidos biológicos produzidos e não destruída por digestão anaeróbia na lagoa
V_{AS}	= Volume acumulado de lodo (modelo Saqqar e Pescod, 1995)
K_{AS}	= Coeficiente de acumulação de lodo
C_{DBO}^d	= Carga diária de DBO ₅ afluyente à lagoa anaeróbia
S_o	= Concentração de DBO ₅ no esgoto bruto
L_v	= Taxa de aplicação volumétrica
H	= Altura da lâmina líquida
θ	= Tempo de detenção hidráulica
F	= Fluxo de massa
C	= Concentração do substrato considerado
Q	= Vazão média de esgoto bruto

SUMÁRIO

	Página
Agradecimentos	i
Lista de tabelas	ii
Lista de figuras	iii
Lista de símbolos	v
Sumário	vi
1 . Introdução ao gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização	1
2 . Formação de lodos em lagoas de estabilização anaeróbias ou facultativas primárias	6
2.1 - Formação de lodo em lagoas de estabilização facultativas e anaeróbias	6
2.2 - Distribuição do lodo em lagoas anaeróbias	7
2.2.1 - Distribuição espacial da camada de lodos	7
2.2.2 - Evolução no tempo da camada de lodos	11
2.3 - Procedimentos para determinação da camada de lodo em lagoas de estabilização em operação	11
3. Estimativa da formação de lodo em lagoas anaeróbias e facultativas primárias	14
3.1 . Estimativa da formação de lodo em lagoas anaeróbias e em lagoas facultativas primárias	14
3.1.1. Estimativa da acumulação de lodos através de taxas empíricas	14
3.1.2. Estimativa através do modelo proposto por Saqqar e Pescod (1995)	17
4. Características físico-químicas e microbiológicas do lodo de lagoas	23
4.1- Opções de disposição final em função da composição dos lodos	23
4.2 - Composição físico-química típica do lodo de lagoas	23
4.3 - Características microbiológicas dos lodos produzidos por lagoas	28
4.3.1- Principais grupos de microrganismos patogênicos em lodos de esgoto	32
4.3.2- Normas técnicas para uso do lodo	34
5. Remoção do lodo das lagoas	35
5.1 – Introdução	35
5.2 - Informações sobre o volume de lodo a ser removido	35
5.3 - Técnicas aplicáveis na remoção do lodo	35
5.4 - Remoção de lodos com desativação temporária da lagoa	36
5.5 - Remoção de lodos com manutenção da lagoa em funcionamento	38
5.6 - Vantagens e desvantagens das técnicas apresentadas	41
6. Desidratação do lodo de lagoas	44
6.1 – Introdução	44
6.2 - Remoção da umidade	44
6.3 - Leitos de secagem	48
6.4 - Aspectos gerais da desidratação de lodos em leitos de secagem	50

6.5 - Dimensionamento do leito de secagem	50
6.6 - Detalhes operacionais	53
7 . Higienização	55
7.1 - Processos de higienização de lodos de esgotos	55
7.1.1.- Calagem	55
7.1.2. Pasteurização	57
7.1.3 – Compostagem	58
8. Reciclagem do lodo de lagoas na agricultura	60
8.1 - Disposição do lodo na agricultura	60
8.2 - Potencial do lodo para uso na agricultura	60
8.3 - Pesquisas com o uso de lodo na agricultura no Espírito Santo	61
8.3.1 – Compostagem	61
8.3.2 - Manejo da adubação e recomendação para uso do lodo	61
8.3.3 - Uso do lodo como substrato na produção de mudas de espécies florestais	63
8.3.4 - Uso do lodo higienizado com cal virgem no plantio do cafeeiro <i>Coffea Canephora</i>	64
8.3.5 - Aplicação de lodo calado de lagoa anaeróbia na formação de mudas de cafeeiros	65
Referências bibliográficas	68

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AO GERENCIAMENTO DO LODO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Ricardo Franci Gonçalves

Dentre os processos de tratamento biológico de esgoto sanitário mais utilizados no Brasil, as lagoas de estabilização assumem posição de destaque. Esta ampla aceitação decorre do seu baixo custo de implantação e, principalmente, da grande simplicidade operacional. Outros fatores favoráveis, tais como o clima e a disponibilidade de área no país, credenciam esses processos como ideais para utilização em cidades brasileiras de pequeno e médio porte. Considerando o enorme esforço a ser feito no sentido da ampliação da abrangência dos sistemas de esgotamento completos, lagoas de estabilização possuem um futuro próspero no Brasil.

Entretanto, importância secundária tem sido tradicionalmente atribuída ao problema do lodo produzido em lagoas de estabilização. Tal fato emerge como a principal constatação da enquete nacional realizada pela UFES em 1997, referente às práticas mais comuns de remoção e disposição de lodo de lagoas de estabilização no Brasil (tabela 1.1). Cerca de 90% das lagoas de um total de 36 estações de tratamento de esgotos (ETEs) brasileiras sobre as quais as informações foram fornecidas (15 sistemas australianos, 11 facultativas primárias, 11 outras combinações) nunca sofreram remoção do lodo. Em apenas quatro lagoas foram realizadas remoções, uma por dragagem e as outras através de remoção manual. Nesses casos, o lodo removido foi disposto no solo ou em córregos próximos às áreas das ETEs. Várias lagoas estão em operação por períodos de funcionamento superiores a 15 anos, e há registros de lagoas com mais de 50% do seu volume útil tomado por lodo, conforme ilustra a batimetria realizada na lagoa de Eldorado e a foto da entrada da lagoa de Camburi, no ES (figuras 1.1 e 1.2).

Fatos recentes acontecidos no Estado do Espírito Santo confirmam as observações realizadas sob a experiência a nível nacional. A Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) é responsável pela operação de um conjunto de estações de tratamento de esgotos (ETEs) com lagoas de estabilização dos mais variados tipos, formatos e períodos de funcionamento, concentrado basicamente na região da grande Vitória. A remoção do lodo das lagoas de Camburi (400 l/s) e de Valparaíso (25 l/s) obedeceu a complicadas operações de engenharia, marcadas pela necessidade do esvaziamento dos reatores em questão. Em ambos os casos o lodo foi removido com desidratação prévia, requerendo a parada completa dos reatores por algumas semanas. No caso de Valparaíso foi necessária a ruptura do talude da primeira lagoa para remoção do lodo ainda com teores de umidade relativamente elevados.

A destinação do lodo representou principal problema a ser resolvido, tendo em vista sua quantidade e, sobretudo, as exigências realizadas pela Secretaria Estadual para Assuntos de Meio Ambiente (SEAMA) quanto à segurança sanitária e ambiental da solução adotada. Em nenhuma das ETEs com lagoas operadas pela CESAN, como em grande parte das lagoas operando no Brasil hoje em

dia, foi prevista por ocasião da concepção do sistema uma destinação adequada ao lodo a ser removido.

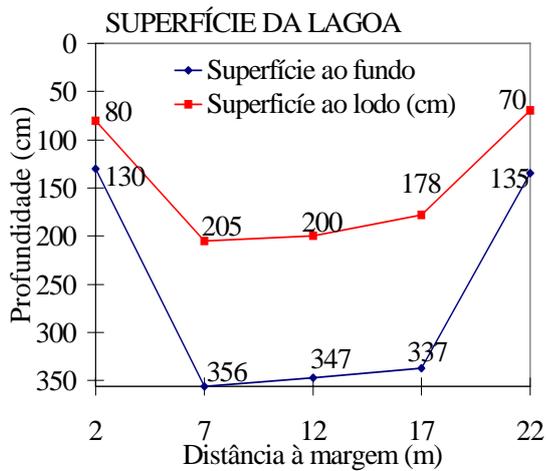


Figura 1.1 - Camada de lodo em seção batimétrica da lagoa anaeróbia de Eldorado, Serra (ES) (Fonte: Nascimento et al., 1999)



Figura 1.2 – Entrada de uma lagoa facultativa em operação no Espírito Santo

Certamente, os prazos bastante dilatados previstos para que se realize a remoção do lodo de dentro do reator (geralmente de 5 a 10 anos) contribuem para que se trate o gerenciamento do lodo em ETEs com lagoas com uma certa negligência. A maioria dos processos de tratamento biológico de uso mais frequente no Brasil exige o gerenciamento do lodo com frequência variando entre diária e mensal, conforme resume von Sperling (1998) na tabela 1.2. Ademais, os processos que produzem mais lodos, além de exigirem remoção frequente, demandam sucessivas etapas de tratamento desse material antes da sua disposição final. No caso dos lodos ativados convencionais, por exemplo, as etapas de adensamento, digestão, desidratação se fazem obrigatórias para viabilizar técnica e economicamente a disposição do lodo produzido na ETE. Essa reconhecida complexidade gera um problema de curtíssimo prazo e grandes proporções, exigindo que a solução seja planejada através de tarefas a serem cumpridas diariamente, muitas vezes por equipes especializadas somente no tratamento da fase sólida (nas ETEs de grande porte).

Ocorre que esta não é a realidade das lagoas de estabilização, em que a produção de lodos acontece quase que secretamente ao longo dos anos, longe da sensibilidade dos operadores da ETE menos avisados. A esse respeito, com base em relatos sobre experiências na França e na Alemanha, Vassel e Borgh (1987) fazem a seguinte citação:

Como todo o sistema de tratamento que funciona corretamente, lagoas de estabilização produzem lodo aos quais deverá se assegurar gestão conveniente, isto é, deverá ser prevista uma remoção regular desde a concepção do sistema. Deve se estar consciente de que a solução adaptada para a remoção deste lodo terá implicações importantes sobre o custo global do sistema de saneamento em questão. Uma má escolha nesse sentido poderá resultar em custo de remoção do lodo extremamente elevado, que, quando não programado ou mal concebido, pode representar uma parte importante do orçamento comunitário.

Portanto, do ponto de vista da gestão do lodo em ETEs com lagoas, não há como duvidar de que um dia o lodo deverá ser removido dos reatores e disposto adequadamente a um custo não desprezível.

Trata-se de um difícil exercício de futurologia que se exige dos projetistas, uma vez que as etapas que compõem o gerenciamento do problema deverão ser planejadas para um intervalo de tempo que pode superar 5 anos. Sucede que muitos parâmetros a serem considerados são dinâmicos, tal como o sistema viário por onde será transportado o lodo e as áreas disponíveis para a disposição, e que deverão ser revistos por ocasião da remoção do lodo das lagoas. Em que pese essas dificuldades, o exercício deve ser praticado por ocasião do projeto, para que os custos referentes ao gerenciamento de milhares de metros cúbicos de lodo em um curto período de tempo não sejam omitidos do empreendimento.

Dentre as opções para destino do lodo, a reciclagem agrícola do lodo de ETEs apresenta-se como uma alternativa promissora, tanto do ponto de vista ambiental como econômico. As pesquisas realizadas pela UFES confirmam que, dentro de determinados critérios agrônômicos, sanitários e ambientais, este rejeito pode perfeitamente se transformar em um importante insumo agrícola. Os teores de nitrogênio e fósforo do lodo permitem uma diminuição significativa da necessidade de fertilizantes nitrogenados e fosfatados, enquanto que matéria orgânica aumenta a resistência do solo à erosão. A utilização do lodo na agricultura ou na silvicultura pode se constituir em ótima alternativa para a melhoria das características do solo em várias regiões de agricultura intensiva ou necessitando de reflorestamento.

Tabela 1.1 - Remoção de lodo em lagoas de estabilização no país (informações obtidas entre novembro e dezembro de 1996)

Instituição	Cidade/ Estado	Tipo de Sistema	Tipo de Efluente	Início de Operação	Ano de remoção do lodo / Método	Volume/ Dest. lodo
CASAL	Maceió - AL	3 lagoas aeradas	Residencial	1987	1986 - dragagem	não especificado
CAGECE	Fortaleza - CE	2 anaeróbias + 2 facultativas + 2 maturação	Misto	1994	Ano não espec. / manual	Terreno próximo
CAGEPA	Cidade de Souza-PB	1 facultativa primaria	Residencial	1978	Não Realizado	x
	Patos- João Pessoa - PB	1 lagoa aerada	X	1976	x	x
	Cidade de Cajazeiras - PB	1 facultativa primaria	Residencial	1978	x	x
	Itaporanga - PB	1 facultativa primaria	Resid. e comerc	1976	x	x
	Campina Grande -PB	2 lagoas aeradas	Misto	1976	x	x
	Conj. Mangabeira - PB	2 anaeróbias + 1 facultativa	Resid. e comerc	1983	1989 - Dragagem	60 m ³ - terren. próx.
	Monteiro - PB	2 anaeróbias + 2 facultativas	Resid. e comerc	1989	x	x
	Guarabira - PB	2 anaeróbias + 2 facultativas	Resid. e comerc	1989	x	x
	Alagoa Grande -PB	1 facultativa primaria	Resid. e comerc	1978	x	x
Sapé- PB	1 facultativa primaria	Resid. e comerc	1977	x	x	
CAERN	Currais Novos - RN	1 facultativa + 1 maturação	Residencial	1983	x	x
	Currais Novos - RN	1 facultativa primaria	Residencial	1986	x	x
	Currais Novos - RN	1 facultativa primaria	Residencial	1986	x	x
	Currais Novos - RN	1 facultativa primaria	Residencial	1984	x	x
	Currais Novos - RN	1 facultativa + 1 maturação	Residencial	1989	x	x
	Currais Novos - RN	1 facultativa + 2 maturação	Residencial	1987	x	x
	Currais Novos - RN	1 anaeróbia+ 1 facultativa + 1 maturação	Industrial	1985	x	x
COPASA	Santa Luzia / BH - MG	2 lagoas aeradas	Residencial	1983	x	x
	Rib. das Neves / BH - MG	1 facultativa primaria	Residencial	1987	x	x
	Lagoa Santa / BH - MG	1 facultativa + 1 maturação	Residencial	1984	x	x
CASAN	Joinvile - SC	1 anaeróbia + 1 facultativa	Mista	1987	x	x
	Baln. de Comburiú - SC	2 anaeróbias + 2 facultativas	Mista	1984	x	x
	Florianópolis - SC	4 facultativas / Fluxo pistão	Mista	1994	x	x
SAMAE	Mogi - Guaçu - SP	1 facultativa primaria	Mista	1988	x	x
SEMAE	Piracicaba - SP	2 anaeróbias + 2 facultativas	Rural	1993	x	x
DAERP	Ribeirão Preto - SP	1 anaeróbia+ 1 facultativa	Mista	1992	x	x
SAMAE	Jaguariaiva - PR	2 anaeróbias+ 1 facultativa	Comercial	x	x	x
SAAE	Cach. Itapemirim - ES	1 facultativa primaria	Residencial	1995	x	x
SIMAE	Herval d'Oeste - SC	3 LAn	Mista	1994	x	x

Tabela 1.2 - Processamento do lodo nos principais sistemas de tratamento de esgotos utilizados no Brasil (FONTE : Von Sperling (1998))

SISTEMAS DE TRATAMENTO	LODO PRIMÁRIO					LODO BIOLÓGICO				
	Processamento usual do lodo	Processamento usual do lodo				Processamento usual do lodo				
	Frequência de remoção	Adensamento	Digestão	Desidrata- ção	Disposi-ção final	Frequência de remoção	Adensamento	Digestão	Desidrata- ção	Disposi-ção final
TECNOLOGIAS TRADICIONAIS										
<i>Tratamento primário (convencional)</i>	~ contínua	X	X	X	X					
<i>Tratamento primário (tanques sépticos)</i>	< 1 ano			X	X					
<i>Lagoa facultativa</i>						> 20 anos				
<i>Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa</i>						< 20 anos				X
<i>Lagoa aerada facultativa</i>						< 10 anos				X
<i>Lagoa aer. mist. Completa. - lagoa decant.</i>						< 5 anos	X (a)		X (a)	X
<i>Lodos ativados convencional</i>	< 4 h		X	X	X	~ contínua	X	X	X	X
<i>Lodos ativados (aeração prolongada)</i>						~ contínua	X		X	X
<i>Filtro biológico (baixa carga)</i>	< 4 h		X	X	X	~ contínua	X		X	X
<i>Filtro biológico (alta carga)</i>	< 4 h		X	X	X	~ contínua	X	X	X	X
<i>Tanque séptico – filtro anaeróbio</i>	< 1 ano			X	X	< 1 ano			X	X
<i>Tanque séptico – infiltração subsuperficial</i>	< 1 ano			X	X					
TECNOLOGIAS RECENTES										
<i>UASB</i>						< 3 meses			X	X
<i>UASB – lagoa facultativa</i>						< 3 meses			X (b)	X (b)
<i>UASB – lagoa de maturação</i>						< 3 meses			X	X
<i>UASB – escoamento superficial</i>						< 3 meses			X	X
<i>UASB – lodos ativados</i>						< 1 mês			X (c)	X (c)
<i>UASB – biofiltros aerados submersos</i>						< 1 mês			X	X
<i>Infiltração lenta</i>						(d)				
<i>Infiltração rápida</i>						(d)				
<i>Escoamento superficial</i>						(d)				

(a) Opcional

(b) Em reatores UASB incorporados e submersos nas lagoas facultativas (sistema CAESB-Samambaia), o lodo anaeróbio acumula-se na lagoa facultativa, não necessitando de remoção periódica

(c) Pressupõe retorno do lodo excedente aeróbio para o UASB, onde sofre adensamento e digestão

(d) Em sistemas de aplicação controlada no solo, há a necessidade de remoção periódica da biomassa vegetal formada em decorrência da irrigação

CAPÍTULO 2

FORMAÇÃO DE LODOS EM LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO ANAERÓBIAS OU FACULTATIVAS PRIMÁRIAS

Ricardo Franci Gonçalves

2.1 - Formação de lodo em lagoas de estabilização facultativas e anaeróbias

Denomina-se lodo ao material que se deposita no fundo das lagoas de estabilização ao longo dos anos de funcionamento, sendo constituído por compostos inorgânicos, compostos orgânicos aportados pelo esgoto, microrganismos, e sub-produtos da atividade dos microrganismos. Tomando-se por base os mecanismos que resultam no tratamento de esgotos em lagoas de estabilização do tipo facultativas, o lodo ocupa o compartimento anaeróbio do processo, cumprindo importante tarefa no tratamento conforme a descrição a seguir:

1. Compartimento anaeróbio – Região do fundo da lagoa, onde ocorrem a deposição do material sedimentável presente no esgoto, ou que foram gerados como sub-produtos nos compartimentos superiores, e a sua subsequente degradação pela via anaeróbia. Este é o compartimento de maior interesse no tocante à gestão de lodos neste tipo de processo.
2. Compartimento facultativo – Situado acima do compartimento anaeróbio, nele ocorrem mecanismos de degradação tanto pela via anaeróbia quanto pela via aeróbia. Predominam nesta região bactérias heterotróficas facultativas.
3. Compartimento aeróbio – Este compartimento é caracterizado pela grande atividade fotossintética das algas, que se situam na superfície da lâmina líquida da lagoa. Nele observa-se uma farta disponibilidade de oxigênio dissolvido e a maior parte da degradação da matéria orgânica solúvel no esgoto, ocorre através da respiração aeróbia das bactérias.

Nas lagoas anaeróbias co-existem somente os compartimentos facultativo e anaeróbio, com uma predominância nítida para a via anaeróbia de degradação da matéria orgânica (figura 2.1). No tocante ao sólidos presentes no esgoto e que sedimentam na lagoa, sua fração orgânica é decomposta pelos microrganismos anaeróbios, sendo transformada em biogás (CH_4 e CO_2 , principalmente), produtos solúveis intermediários da decomposição e material sólido mineralizado. Nos períodos de temperatura elevada, os subprodutos intermediários são reintroduzidos na massa líquida, sendo responsáveis por uma nova carga de DBO na lagoa. Portanto, a parte orgânica do lodo é composta por matéria orgânica em decomposição e por microrganismos.

A fração inorgânica que se acumula é constituída por material inerte que sobrou da atividade microbiana, bem como por partículas sólidas não biodegradáveis carreadas pelo esgoto e pela erosão dos taludes. Por isso, o acúmulo do lodo no fundo da lagoa depende diretamente das características do esgoto, do estado de conservação e operação da rede coletora e da eficiência da etapa de pré-tratamento na ETE. Uma rede mal construída ou com estado de conservação deficiente poderá carrear grandes quantidades de material inerte para as ETES.

Se não houver uma boa remoção nos desarenadores, esse material será direcionado para o fundo das lagoas, influenciando na frequência de remoção do lodo.

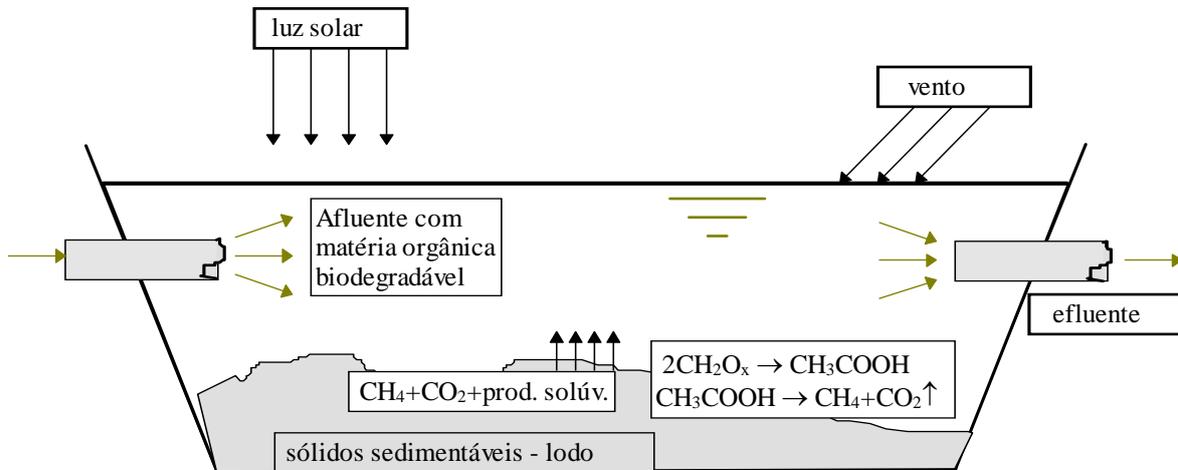


Figura 2.1 - Esquema de funcionamento (mecanismos principais) de uma LAn de um sistema australiano

Portanto, a origem da formação de lodo em lagoas de estabilização está na deposição do material sedimentável do esgoto e na reprodução de bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia no fundo do reator. Nas lagoas primárias são retidos quase 100 % dos sólidos sedimentáveis, enquanto nas secundárias não ocorre uma sedimentação significativa. Isto faz com que a acumulação de lodos nas lagoas secundárias seja desprezível para fins práticos. Consequentemente, maior atenção será dada à formação de lodo nas lagoas primárias, especialmente as do tipo anaeróbias.

2.2 - Distribuição do lodo em lagoas anaeróbias

A acumulação de lodo em lagoas facultativas primárias ou anaeróbias não ocorre de forma homogênea no tempo e no espaço. A taxa de acumulação de lodos é influenciada por fatores tais como as características do esgoto, o período de tempo em operação, a eficiência do pré-tratamento, o posicionamento dos dispositivos de entrada e saída, as características geométricas da lagoa, as taxas de carregamento orgânico e hidráulico, entre outros.

2.2.1 - Distribuição espacial da camada de lodos

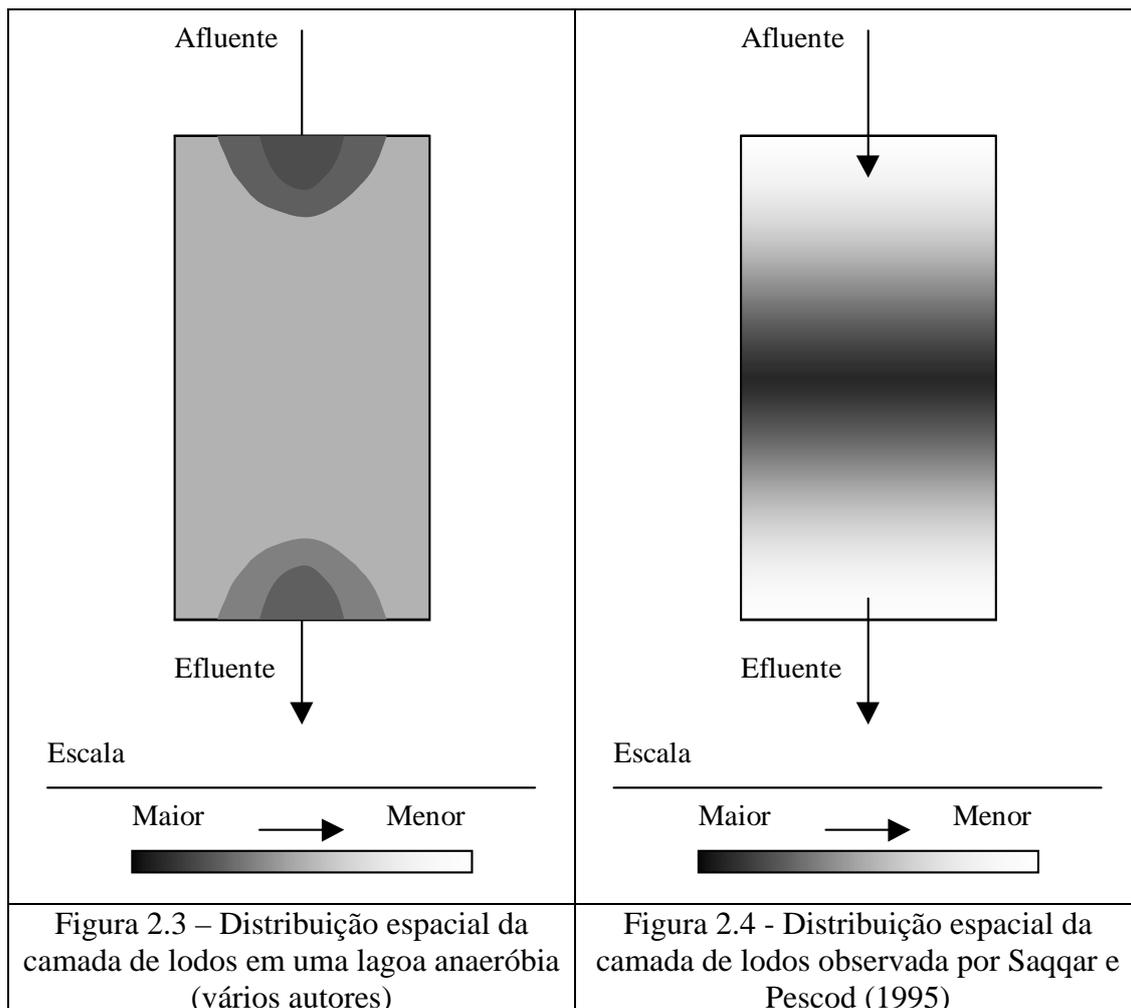
A maioria dos relatos sobre a distribuição espacial da camada de lodos em lagoas anaeróbias ou facultativas primárias indica uma acumulação maior nas proximidades dos dispositivos de entrada e saída da lagoa (figuras 2.2 e 2.3). A exceção dessas regiões da lagoa, a camada geralmente apresenta-se homogênea, com a interface sólido – líquido quase que com a mesma cota. A maior acumulação nas imediações da entrada é atribuída à grande quantidade de sólidos sedimentáveis orgânicos e inorgânicos no afluente (Silva, 1983; Da-Rin e Nascimento, 1988; Schneiter et al., 1993, Nascimento et al., 1998).

Entretanto, a ação dos ventos, a inversão de temperatura e o comportamento hidrodinâmico do reator irão opor a essa tendência. Nos casos em que a entrada do esgoto na lagoa ocorre com muita turbulência (jatos), a camada de lodos pode inclusive apresentar espessura inferior

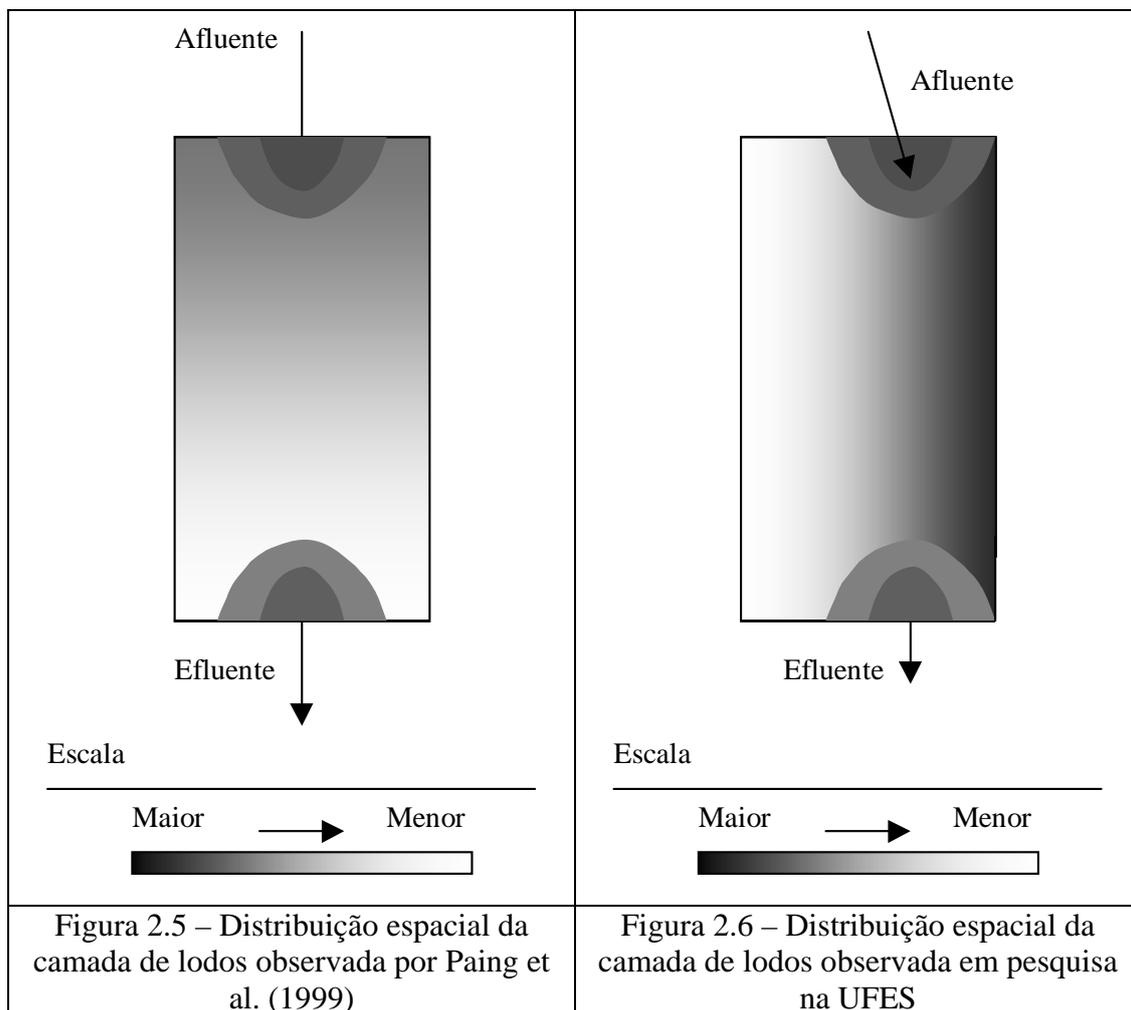
a de outras regiões da lagoa. Esse é o caso descrito por Saqqar e Pescod (1995), sobre uma lagoa anaeróbia em operação em Alsamra (Jordânia), em que as maiores alturas da camada de lodos foram observadas na região central da lagoa (figura 2.4).



Figura 2.2 – Lagoa facultativa com acúmulo de lodo na entrada



Outro tipo de distribuição espacial é descrita por Paing et al. (1999), em uma lagoa com volume de 5083 m³ e 3,1 m de profundidade no sul da França. Os experimentos realizados por esses pesquisadores indicaram um decréscimo da camada de lodos da entrada (70 cm) para a saída (15 cm) (figura 2.5). O gradiente da camada de lodos coincidiu com o das concentrações de ácidos graxos voláteis no lodo, que também diminuíram da entrada (> 1500 mg HAc⁻/l) para saída (< 150 mg HAc⁻/l). Por outro lado, os autores observaram um gradiente inverso na distribuição espacial da atividade metanogênica do lodo, que apresentou valores da ordem de 1 mg CH₄/gSV.dia na região da entrada e superiores a 51 mg CH₄/gSV.dia nas imediações da saída. Estes resultados indicam que os diferentes estágios que compõem a digestão anaeróbia ocorrem em diferentes regiões da lagoa, com as etapas de hidrólise e acidificação nas proximidades da entrada e a metanização mais intensamente na saída da lagoa. A produção de metano por unidade de área foi muito heterogênea em toda a lagoa, apresentando um valor médio de 25 l/ m².dia a 20 °C.



Finalmente, lagoas construídas com formatos obedecendo a geometria indefinida, ou então com posicionamento dos dispositivos de entrada e saída induzindo a formação de zonas mortas e curtos circuitos, apresentam uma distribuição da camada de lodos bastante influenciada por seu comportamento hidrodinâmico. Esse comportamento foi observado em várias lagoas estudadas pela UFES, como, por exemplo, a lagoa anaeróbia da ETE de Maringá, na região da Grande Vitória (ES), esquematizada na figura 2.6. O mapeamento da camada de lodo desta lagoa é apresentado em 3 dimensões pela figura 2.7. A camada de lodos apresenta

elevações significativas nas proximidades da entrada e da saída, bem como em toda a faixa longitudinal coincidente com o alinhamento entrada – saída, por onde ocorre o fluxo preferencial no reator.

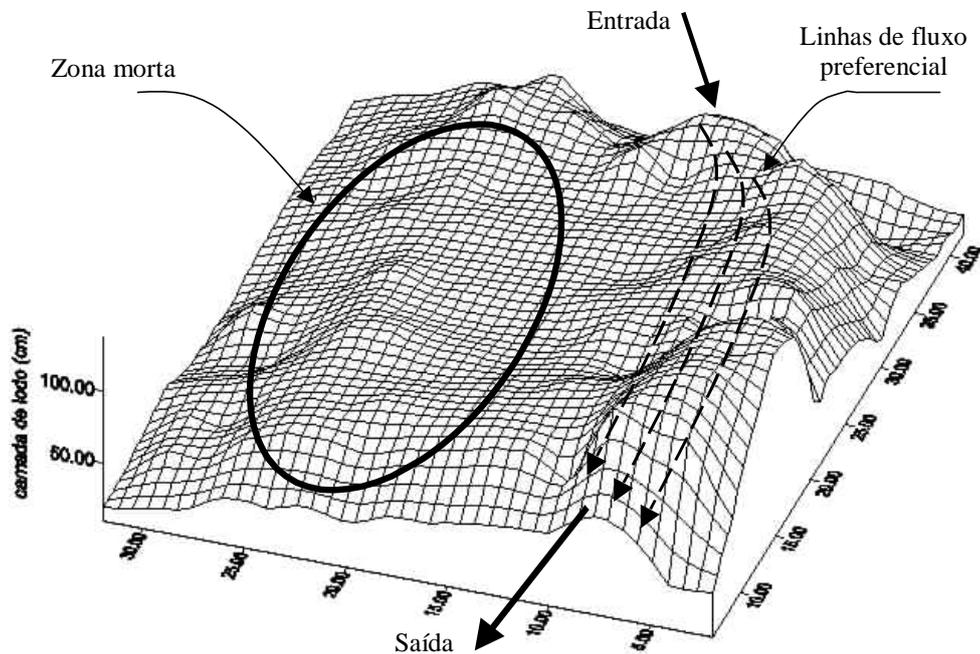


Figura 2.7 – Distribuição da camada de lodos na lagoa anaeróbia de Maringá (ES)

No tocante à distribuição vertical (altura da camada), a distribuição espacial heterogênea do lodo no interior da lagoa pode ter como situação limite a representada na figura 2.8. Por ocasião dos estudos realizados no ES, quatro lagoas anaeróbias apresentaram afloramento da camada de lodos nas proximidades do dispositivo de entrada. Nesses casos, o principal inconveniente é a permanente emanção de compostos odorantes oriundos da digestão anaeróbia do lodo em contato direto com a atmosfera. Caso não seja realizada a remoção do lodo, pelo menos uma operação visando a redistribuição da camada aflorante de lodo deve ser providenciada rapidamente, para minimizar problemas de impacto do empreendimento em ambiente urbano.

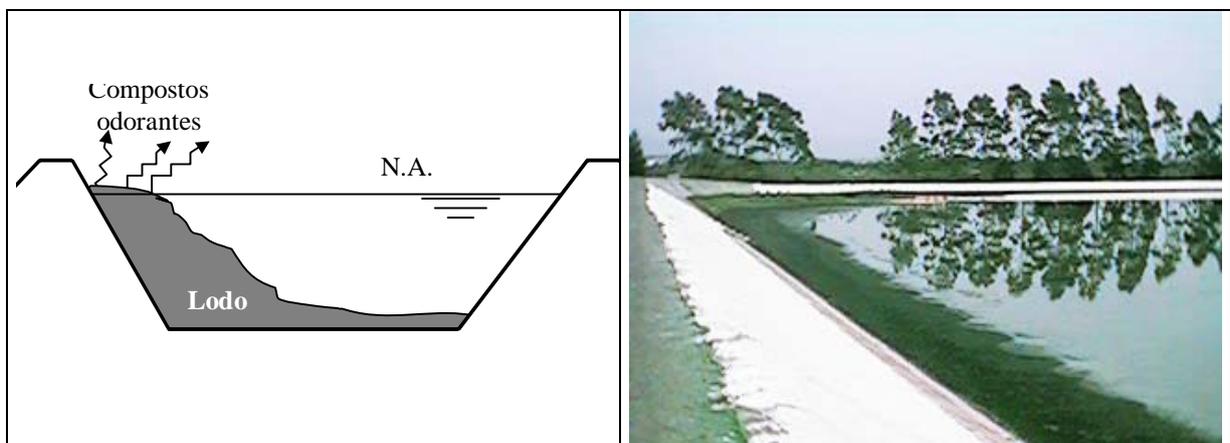


Figura 2.8 – Distribuição espacial heterogênea com parte da camada de lodos em contato direto com a atmosfera

2.2.2 - Evolução no tempo da camada de lodos

A acumulação de lodo no fundo das lagoas é bastante acelerado nos primeiros anos de operação, diminuindo sensivelmente ao longo dos anos. Logo após a partida do processo, a ausência da biomassa anaeróbia no fundo da lagoa resulta nas baixas taxas de hidrólise e metanização da matéria orgânica sedimentada (Marais, 1971). Na medida em que a biomassa se desenvolve adaptada às condições operacionais, o estoque de matéria orgânica tende a diminuir.

A temperatura também irá influenciar na formação da camada de lodos, na medida em que as taxas de digestão anaeróbia são uma função direta desta variável. Nos locais onde a temperatura do esgoto atinge valores inferiores a 19 °C por alguns dias consecutivos, a carga de material orgânico sedimentável supera a capacidade de digestão anaeróbia da biomassa (Oswald, 1968). Por outro lado, taxas de digestão elevadas ($T > 22^{\circ}\text{C}$) resultam na maior estabilização dos sólidos sedimentáveis orgânicos e uma maior produção de biogás. Sucede que a lagoa, em regiões onde as variações de temperatura são nitidamente sazonalizadas, funciona estocando matéria orgânica na camada de lodos durante o inverno (a camada fica maior) e com elevadas atividades de hidrólise e metanização (a altura da camada diminui) durante o verão. Schneiter et al. (1993) recomendam que, por ocasião do dimensionamento o volume da lagoa seja majorado em 5%, prevendo-se a estocagem de lodos nas regiões de clima frio.

2.3 - Procedimentos para determinação da camada de lodo em lagoas de estabilização em operação

A altura da camada de lodo deve ser determinada através de batimetria na lagoa, que pode ser realizada mediante o uso de diferentes tipos de equipamentos. As lagoas devem ser divididas em seções batimétricas com espaçamento preferencialmente constante, demarcadas através de topografia (piqueteamento), onde serão registradas as alturas da camada de lodo. Combinando-se as informações obtidas através de batimetria e as características geométricas da lagoa, calcula-se o volume de lodo estocado na mesma. Quanto mais precisas forem estas informações, mais bem quantificado será o volume de lodos na lagoa.

No tocante à batimetria, sua qualidade é proporcional à quantidade de seções batimétricas e de pontos amostrais. Evidentemente, quanto maior for o número de seções e pontos amostrais, maior será o volume de trabalho. Por outro lado, seções batimétricas com espaçamento grande e com baixa densidade de pontos amostrais induzem a erros significativos no cálculo do volume de lodo na lagoa.

Nos estudos realizados pela UFES, todas as lagoas selecionadas foram divididas em seções batimétricas de espaçamento variável segundo o tamanho da lagoa (Exemplo: croqui da lagoa facultativa primária de Mata da Serra, figura 2.9). Um total de 420 pontos batimétricos foram instalados em todas as lagoas, correspondendo a uma média de 84 pontos / ETE, e um número de 06 a 12 seções batimétricas por lagoa. As seções foram demarcadas através de piqueteamento, sendo percorridas com bote inflável, para registros das profundidades e lâmina de lodo.

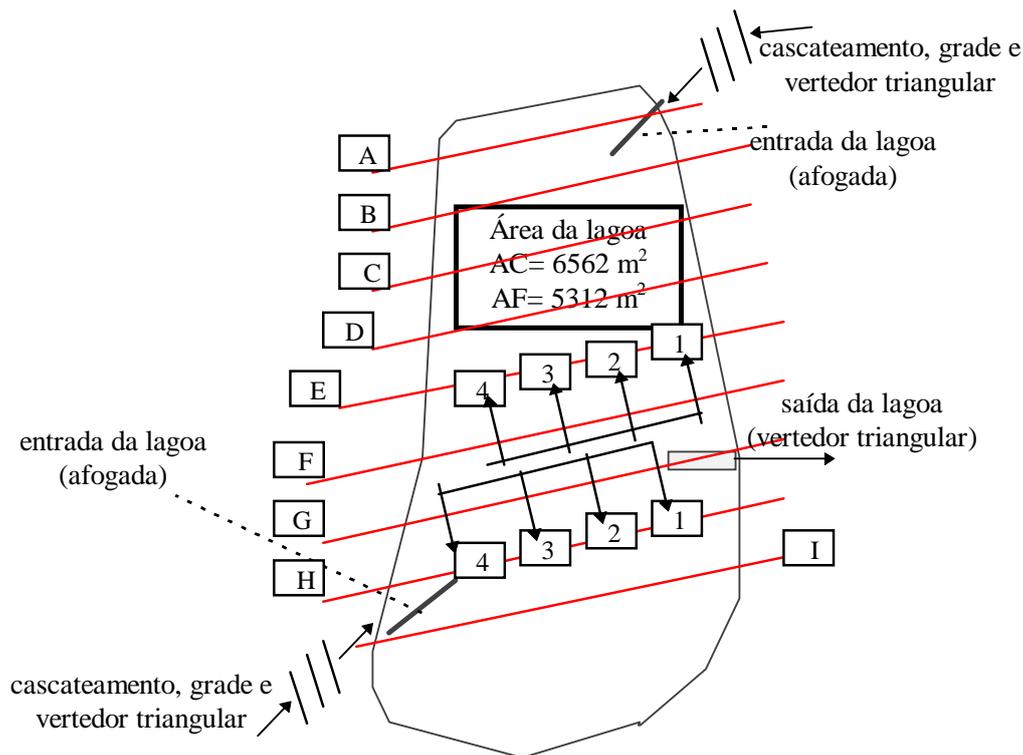


Figura 2.9 - Croqui da lagoa facultativa primária de Mata da Serra e posicionamento das seções batimétricas

Diversos equipamentos vem sendo utilizados para a medição da altura da camada de lodo, com diferentes níveis de sofisticação. Os seguintes equipamentos eletrônicos podem ser utilizados com esse objetivo: eco-batímetros, pH-metros e medidores de teores de SS.

O equipamento utilizado pela UFES com essa finalidade, composto por hastes de PVC ou alumínio conectáveis e com escalas métricas, é bastante simples e apresentou boa precisão (Gonçalves et al, 1997) (figura 2.10). A haste 1 é utilizada para determinar a profundidade da interface sólido – líquido (superfície da camada), onde ela repousará sem penetrar devido à placa circular de PVC com 300 mm de diâmetro situada na sua base. Uma vez localizada a superfície da camada de lodo com a haste 1, introduz-se a haste 2 pelo interior da haste de PVC vazada que compõe a haste 1. Esta segunda haste perfurará toda a camada de lodo, detendo-se ao encontrar o fundo da lagoa. A diferença entre as medições de profundidade realizadas através das duas hastes representa a altura da camada de lodos.

A utilização de um pH-metro portátil, dotado de uma sonda fixada em uma haste graduada, mostrou-se também bastante simples e eficaz, nas pesquisas realizadas por Paing et al. (1999). A diferença de pH entre o líquido e o lodo é muito nítida, devido à intensa atividade biológica de acidificação no lodo, caindo imediatamente de valores próximos de 7,0 no líquido para valores inferiores a 6,0 neste último compartimento. Na prática, a profundidade em que o aparelho detecta a mudança brusca de pH refere-se à superfície da camada de lodo. A diferença entre essa profundidade e o fundo da lagoa, determina a altura da camada de lodo.

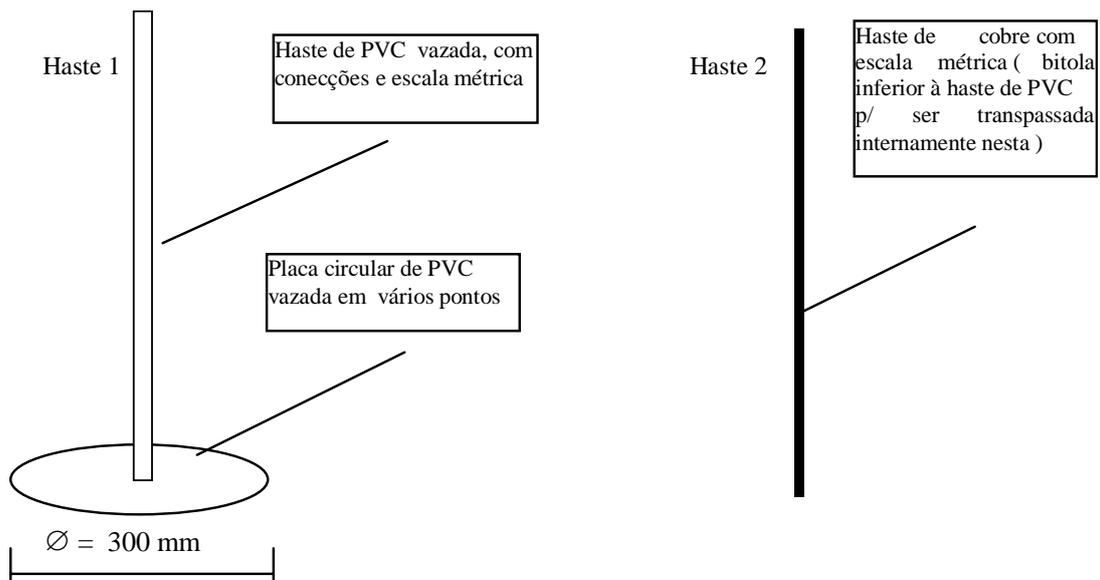


Figura 2.10 – Equipamento utilizado para determinação da altura da camada de lodo em lagoas no ES (Gonçalves et al., 1997)

Outra possibilidade é a utilização de equipamentos sensores de concentrações de sólidos suspensos, geralmente utilizados no monitoramento da manta de lodos em tanques de aeração e em decantadores primários ou secundários de lodos ativados. Os testes realizados com um equipamento dotado de uma sonda a base de radiação infra-vermelha, fixada em uma haste graduada, vem apresentando excelentes resultados nas pesquisas em curso na UFES. Entretanto, apesar da simplicidade e precisão do método, o equipamento é importado e apresenta preço relativamente elevado com relação aos demais métodos descritos anteriormente.

CAPÍTULO 3

ESTIMATIVA DA FORMAÇÃO DE LODO EM LAGOAS ANAERÓBIAS E FACULTATIVAS PRIMÁRIAS

Ricardo Franci Gonçalves
Fabrícia Fafá de Oliveira

3.1. Estimativa da formação de lodo em lagoas anaeróbias e em lagoas facultativas primárias

Estimar a produção de lodos em uma lagoa de estabilização primária é uma etapa primordial do projeto para a garantia da auto-sustentabilidade futura do empreendimento. A quantidade de lodo, a frequência de remoção, como desidratá-lo, transportá-lo e onde dispô-lo são questões que integram de maneira significativa o custo operacional da ETE. A estimativa da quantidade de lodos acumulados em lagoas primárias pode ser realizada através do emprego de taxas empíricas de acumulação ou através do uso de modelos racionais semi-empíricos ou teóricos.

3.1.1. Estimativa da acumulação de lodos através de taxas empíricas

As taxas empíricas de acumulação de lodos podem ser expressas em termos de:

- Volume de lodo acumulado por unidade de tempo per capita ($m^3/\text{hab.ano}$ ou $l/\text{hab.d}$),
- Altura acumulada de lodo por unidade de tempo (cm/ano).

A taxa volumétrica “per capita” de acumulação de lodo é definida pela equação:

$$t_v = (1000 \times V) / (P \times T) \quad [3.1]$$

Onde:

- t_v = taxa volumétrica “per capita” de acumulação de lodo ($l / \text{hab} \cdot \text{dia}$)
- V = volume de lodo acumulado no período considerado (m^3)
- P = n° de habitantes com ligação à rede coletora que contribui p/ a ETE (hab)
- T = tempo de operação da lagoa, decorrido desde a última batimetria (dias)

A taxa linear de acumulação de lodos com relação à altura da camada de lodos é definida pela expressão:

$$t_L = h / T \quad [3.2]$$

Onde:

- t_L = taxa linear de acumulação de lodos (cm / ano)
- h = Altura média da camada de lodos (cm)
- T = tempo de operação da lagoa, decorrido desde a última batimetria (dias)

A determinação da taxa linear é mais simples, por não exigir um cadastro rigoroso da população que contribui com esgotos para a ETE. Entretanto, a determinação precisa da geometria da lagoa, assim como a altura da camada de lodo, são pré-requisitos essenciais para a sua determinação. Em qualquer um dos casos, a utilização sem critérios de ambas as taxas pode resultar em imprecisões importantes na estimativa da formação de lodos, tal como ilustra a grande variedade de valores publicados por outros autores (tabela 3.1).

Nas lagoas anaeróbias, as taxas lineares de acumulação de lodo superam um valor de 4 cm/ano. Nas lagoas anaeróbias de Eldorado e Porto Canoa, no ES, as taxas lineares foram de 7,7 cm / ano e 5,3 cm / ano respectivamente (Nascimento et al., 1999) (tabela 3.2). Tais resultados são equivalentes ao valor de 5,7 cm / ano observado por Silva (1983) na lagoa anaeróbia de Tatuí - SP. Nas lagoas facultativas primárias, a taxa linear de acumulação tende para 2,0 cm/ano, conforme indicam os valores publicados por Silva (1983) e Nelson e Jiménez (1999). As lagoas facultativas secundárias corretamente dimensionadas operam quase que em equilíbrio entre os processos [aporte + geração] e [saída + destruição] de sólidos no reator. Decorre desse fato uma produção de lodos praticamente desprezível para fins práticos, conforme ilustra o valor da taxa linear de acumulação de lodos calculada para a lagoa facultativa de Eldorado, no ES (tabela 3.2).

As taxas volumétricas de acumulação de lodos variam entre 0,08 e 0,4 l/hab.dia em lagoas primárias (anaeróbias ou facultativas), sendo recomendada a utilização do limite inferior em regiões de clima quente e o limite superior para regiões de clima frio. Mesmo no caso do limite superior, o valor de produção “per capita” de lodos é muito pequeno, quando comparado às produções “per capita” características de outros processos de tratamento biológico de esgotos sanitários (tabela 3.3).

Tabela 3.1- Taxas de acumulação de lodo em lagoas anaeróbias e facultativas primárias

Taxa acumulação		Tipo de lagoa / observação	Referência
l/hab.d	cm/ano		
0,25 - 0,4	-	Facultativa no Alaska e no Canadá	Clark et al, 1970
0,34	9,1	Anaeróbia	Gloyna, 1973
0,26	-	Anaeróbia	Hess, 1975
0,13	-	Lodo após secagem (45% ST)	
0,08-0,11	-	Anaeróbia	Mendonça, 1990
0,3-0,4	-	Anaeróbia	Silva e Mara, 1979
0,08-0,22	-	Facultativa	Arceivala, 1981
0,1	-	Facultativa primária no RJ (lodo ao ar seco)	Da Rin e Nascimento, 1988
-	2,2-5,7	Anaeróbias em SP	Silva, 1983
-	1,2-2,8	Facultativas em SP	Silva, 1983
-	3,9	Anaeróbia em SP	Tsutyia e Cassetari, 1995
-	4,6	Anaeróbia	Saqgar e Pescod, 1995
-	2,2	Facultativa em SP	Tsutyia e Cassetari, 1995
-	2,4	Facultativa primária / México	Nelson e Jiménez, 1999
-	5,3 -7,7	Anaeróbias no ES	Nascimento et al, 1999
-	3	Facultativa	Howard, 1967
-	62	Anaeróbia (7 meses de operação – França)	Paing et al., 1999

Tabela 3.2 - Resultados das batimetrias e estimativa da produção de lodo em lagoas de estabilização no Espírito Santo

Localização	Tipo de sistema	Número de pontos Batimétricos	Variação da altura lodo (cm)	Altura Média de Lodo (cm)	Taxa linear média de acumulação (cm/ano)	Volume de lodo (m ³)
Eldourado	Lagoa anaeróbia + Facultativa	45	21 - 208	107	7,66	1200
		25	0 - 16	3	0,23	*
M. da Serra	Facultativa Primária	36	10 - 75	27	1,53	1450
Porto Canoa	Lagoa anaeróbia	30	20 - 148	78	5,35	400
Valparaíso	Lagoa aerada facult. + facultativa	80	*	*	*	*
		80	07 - 75	40	2,86	720

Fonte : (CESAN 1996) e Levantamento do PROSAB - DHS - UFES (1996/97)

Tabela 3.3 - Estimativas de produção de lodos em diferentes processos de tratamento de esgotos sanitários (Fonte: Jordão e Pessoa, 1995)

Tipo de lodo	Densidade	Sólidos secos, kg/m ³		Lodo úmido	
		Faixa	Típico	L / hab.dia	m ³ / 1000 m ³
- Lodo primário	1,020	108 – 168	150	0,5 – 1,0	3
- Filtro biológico percol.	1,025	60 – 95	70	0,6 – 0,7	4,5
- Lodos ativados conv.	1,005	70 – 95	85	1,5 – 4,5	10,5
- Lodos ativ. aer. prol.	1,015	85 – 120	95	1,0 – 3,0	7

A título de exemplo é apresentado a seguir o cálculo da taxa volumétrica média de acumulação de lodo (t_v) e da taxa linear acumulação anual de lodo (t_L) em uma lagoa fictícia.

Exemplo 3.1: Determinação das taxas de acumulação de lodo em uma lagoa anaeróbia

Dados :

- Tipo da lagoa = Anaeróbia primária
- População (P) = 5.000 habitantes
- Altura média da camada de lodos (h) = 32 cm
- Área média (A_m) * = 4.560 m²
- Tempo de operação (T) = 8 anos = 2920 dias

(*) A área média é calculada com base na altura média da camada de lodos.

- Cálculo da taxa linear de acumulação de lodos (t_L):

$$t_L = H / T = 32 / 8 =$$

$$t_L = 4 \text{ cm / ano}$$

- Cálculo do volume de lodo acumulado

$$V = A_m \times h = 4.560 \times 0,32 = 1.459 \text{ m}^3$$

- Cálculo da taxa volumétrica de acumulação de lodo (t_v)

$$t_v = (1000 \times V) / (P \times T) = (1000 \times 1459) / (5000 \times 2920) =$$

$$t_v = 0,1 \text{ l / hab.dia}$$

3.1.2. Estimativa através do modelo proposto por Saqqar e Pescod (1995)

A maioria dos modelos racionais disponíveis para a determinação da produção de lodo em lagoas primárias consideram que o volume de lodo acumulado é controlado pela porção não biodegradável dos sólidos sedimentáveis que entram no sistema e os que são produzidos pela atividade biológica dos microrganismos. Dentre eles, destacam-se os modelos desenvolvidos por Marais e Shaw (1966), citado por Kellner e Pires (1998), por Fritz, Middleton e Meredith (1979), por Polprasert e Agrwalla (1994) e o modelo desenvolvido por Saqqar e Pescod (1995). Excetuando-se esse último, os demais modelos são descritos detalhadamente por Kellner e Pires (1998). Embora não tenham sido desenvolvidos enfocando especificamente a produção de lodos, estes modelos possuem um compartimento específico que interage ativamente com os processos de depuração que ocorrem na fase líquida. No presente manual, será detalhado e utilizado como ferramenta de previsão da produção de lodo apenas o modelo de Saqqar e Pescod (1995).

O modelo desenvolvido por Saqqar e Pescod (1995) tem como objetivo principal a previsão do acúmulo de lodos em lagoas anaeróbias (figura 3.1). A taxa de acumulação (F_L) de lodos é definida pelo balanço de massa que considera a carga de sólidos suspensos na entrada, a carga de sólidos suspensos na saída e a produção de sólidos por ação biológica na lagoa:

$$F_L = (F_{XSS,0} - F_{XSS,1}) + \Delta F_X \quad [3.3]$$

Onde:

F_L = taxa de acumulação de lodo na lagoa
 $F_{XSS,0}$ = carga de sólidos suspensos na entrada da lagoa (kg/d).
 $F_{XSS,1}$ = carga de sólidos suspensos na saída da lagoa (kg/d).
 ΔF_X = taxa de produção de sólidos por ação biológica (kg/d).

A produção de sólidos decorrente do metabolismo bacteriano na camada de lodos é definida por:

$$\Delta F_X = Y \Delta F_{DBO} = Y (F_{CDBO,0} - F_{CDBO,1}) \quad [3.4]$$

onde:

Y = coeficiente de rendimento (kg SS / kg DBO₅)
 $F_{CDBO,0}$ = carga de DBO₅ na entrada da lagoa (kg/dia)
 $F_{CDBO,1}$ = carga de DBO₅ na saída da lagoa (kg/dia)

Por outro lado, tendo em vista que os sólidos suspensos (X_{SS}) podem ser divididos em sólidos suspensos voláteis (X_{VSS}) e sólidos suspensos fixos (X_{FSS}) (figura 3.1), a equação [3.5] pode ser escrita da seguinte forma :

$$F_L = (F_{X_{VSS},0} - F_{X_{VSS},1}) + (F_{X_{FSS},0} - F_{X_{FSS},1}) + Y(F_{C_{DBO},0} - F_{C_{DBO},1}) \quad [3.5]$$

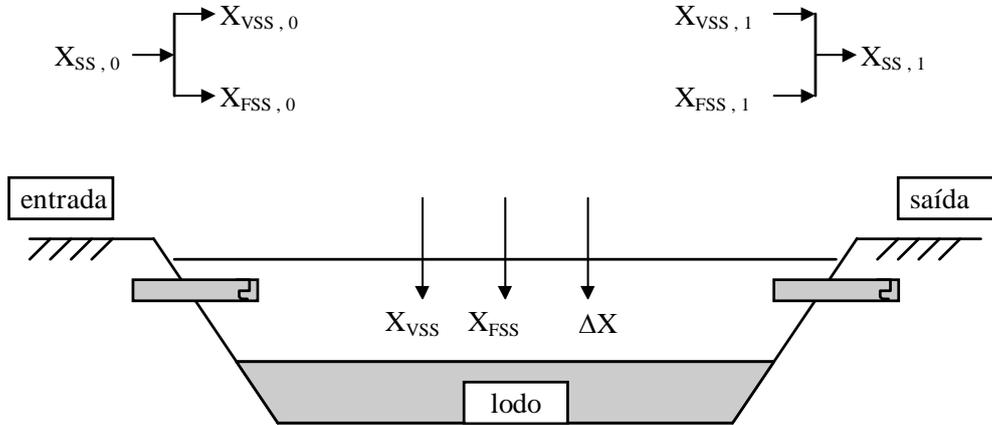


Figura 3.1 - Esquema do modelo desenvolvido por Saqqar e Pescod (1995) para previsão do volume de lodo acumulado em lagoas anaeróbias primárias

O volume de lodo acumulado diariamente na lagoa pode ser definida através da equação [3.6]:

$$Q_{AS} = \left[\frac{(j_1 \cdot f_1)(F_{X_{VSS},0}) + (j_2 \cdot f_2)(F_{X_{FSS},0}) + (j_3 \cdot Yf_3)(F_{C_{DBO},0})}{[SG_s \cdot \rho_w(1 - w_s)]} \right] \quad [3.6]$$

Onde:

- Q_{AS} = volume de lodo acumulado diariamente na lagoa (m³/dia)
- SG_s = Massa específica do lodo
- ρ_w = Densidade da água = 1000 Kg/m³
- w_s = Teor de umidade lodo (%)
- f_1 = Fração de $F_{X_{VSS},0}$ removida na lagoa
- f_2 = Fração de $F_{X_{FSS},0}$ removida na lagoa
- f_3 = Fração de $F_{C_{DBO},0}$ removida na lagoa
- j_1 = Fração de $F_{X_{SSV}}$ não destruída por digestão anaeróbia na lagoa
- j_2 = Fração de $F_{X_{SSF}}$ não destruída por digestão anaeróbia na lagoa
- j_3 = Fração de sólidos biológicos produzidos e não destruída por digestão anaeróbia na lagoa

Considerando-se o denominador da equação [3.6] como sendo constante, ela pode ser reescrita como:

$$Q_{AS} = [(\gamma_1 \cdot F_{X_{VSS},0} + \gamma_2 \cdot F_{X_{SS},0} + \gamma_3 \cdot F_{C_{DBO},0}) / 1000] \quad [3.7]$$

Onde:

$$\gamma_1 = (j_1 \cdot f_1) / [SG_s \cdot \rho_w \cdot (1 - W_s)] \quad [3.8]$$

$$\gamma_2 = (j_2 \cdot f_2) / [SG_s \cdot \rho_w \cdot (1 - W_s)] \quad [3.9]$$

$$\gamma_3 = (j_3 \cdot f_3) / [SG_s \cdot \rho_w \cdot (1 - W_s)] \quad [3.10]$$

Com vistas à determinação dos valores dos coeficientes γ_1 , γ_2 e γ_3 , o modelo assume que, no tocante aos sólidos retidos, a lagoa anaeróbia opera de forma semelhante a um digestor anaeróbio de lodo. Dessa maneira, os seguintes valores com as respectivas justificativas ficam determinados:

$$f_1 = 0,74 \text{ (eficiência de remoção de sólidos na lagoa estudada pelos autores)}$$

$$f_2 = 0,74 \text{ (eficiência de remoção de sólidos na lagoa estudada pelos autores)}$$

$$f_3 = 0,53 \text{ (valor médio determinado por Saqqar e Pescod, 1995)}$$

$$j_1 = 0,3 \text{ (destruição de } X_{VSS,0} \text{ em um digestor com TDH } > 100 \text{ dias)}$$

$$j_2 = 0,8 \text{ (destruição de } X_{FSS,0} \text{ em um digestor com TDH } > 100 \text{ dias)}$$

$$j_3 = 0,50 \text{ (composição das células bacterianas: SSV = 60\% e SSF = 40\%)}$$

$$Y = 0,50 \text{ (coeficiente de rendimento para digestão anaeróbia)}$$

$$W_s = 0,88 \text{ (determinado pelos autores com o lodo da lagoa estudada)}$$

$$SG_s = 1,03 \text{ (determinado pelos autores com o lodo da lagoa estudada)}$$

Com base nos valores acima, e nas equações [3.8], [3.9] e [3.10], ficam definidos $\gamma_1 = 1,8$, $\gamma_2 = 4,8$ e $\gamma_3 = 1,07$, e, explicitando-se o valor desse último coeficiente, a equação [3.7] transforma-se em:

$$V_{AS} = 1,07 \cdot [(1,7 \cdot F_{XVSS,0} + 4,5 \cdot F_{XSS,0} + 1,0 \cdot F_{CDBO,0}) / 1000] \quad [3.11]$$

Onde:

$$V_{AS} = \text{Volume de lodo acumulado (m}^3\text{)}$$

Evidentemente, essa equação pode ser reescrita nos casos em que parâmetros tais como f_1 , f_2 , f_3 , W_s e SG_s sejam objeto de pesquisa e assumam outros valores. Saqqar e Pescod (1995) ponderam que a degradação dos sólidos na camada de lodos de uma lagoa ocorre durante períodos muito longos (> 5 anos), o que permite a decomposição do material orgânico muito lentamente biodegradável. Este fato repercutiria na redução adicional do volume previsto pela equação [3.11], o que poderia ser previsto através da transformação desta equação em uma equação mais genérica, com a forma:

$$V_{AS} = K_{AS} \cdot [(1,7 \cdot F_{XVSS,0} + 4,5 \cdot F_{XSS,0} + 1,0 \cdot F_{CDBO,0}) / 1000] \quad [3.12]$$

Onde:

$$K_{AS} = \text{Coeficiente de acumulação de lodo}$$

A equação [3.12] indica que a decomposição do lodo acumulado é diretamente proporcional ao termo $[(1,7 \cdot F_{XVSS,0} + 4,5 \cdot F_{XSS,0} + 1,0 \cdot F_{CDBO,0}) / 1000]$. Conhecendo-se as

características médias do esgoto a ser tratado ($F_{XVSS,0}$, $F_{XSS,0}$ e $F_{CDBO,0}$), torna-se possível o cálculo do valor de V_{AS} de forma simples e direta. Valores K_{AS} elevados indicam que o lodo acumulado encontra-se pouco digerido, enquanto que, para valores pequenos, o lodo está bem digerido no fundo da lagoa. O primeiro caso corresponde a lagoas em operação a menos de 1 ano, com K_{AS} podendo assumir valores superiores a 1,0. Paing et al. (1999) determinaram $K_{AS} = 1,4$, em uma lagoa anaeróbia encontrando-se no 7º mês de operação no sul da França.

EXEMPLO 3.2: Estimativa da quantidade de lodo estocado em uma lagoa anaeróbia

Uma lagoa de estabilização anaeróbia será projetada para atender a uma população de 10.000 habitantes. A estimativa da produção e estocagem de lodo durante o período operacional será realizada através do emprego da taxa volumétrica “per capita” de acumulação, assim como através do modelo de Saqqar e Pescod (1995). Os dados iniciais compreendem uma vazão média afluyente de 1600 m³/d, concentração de DBO₅ no esgoto bruto (S_o) de 300 mg/l, concentração de SST no esgoto bruto de 220 mg/l, e temperatura (T) do líquido de 22°C. Os seguintes parâmetros serão utilizados no dimensionamento da lagoa:

- Taxa de aplicação volumétrica : $L_v = 0,10$ kg DBO/m³
- Altura da lâmina líquida: $H = 4,0$ m

a) Cálculo da carga diária de DBO₅:

$$C_{DBO}^d = S_o \times Q = \frac{300(\text{mg/l})1600(\text{m}^3/\text{d})}{1.000} = 480 \text{ kg DBO}_5/\text{d}$$

Onde:

- C_{DBO}^d = Carga diária de DBO₅ afluyente à lagoa anaeróbia (kg/dia)
- S_o = Concentração de DBO₅ no esgoto bruto (mg/l)
- Q = Vazão média afluyente de esgoto bruto (m³/dia)

b) Cálculo do volume requerido da lagoa:

$$V = (C_{DBO}^d / L_v) = \frac{480(\text{kg DBO}/\text{d})}{0,10(\text{kg DBO}/\text{m}^3 \cdot \text{d})} = 4800 \text{ m}^3$$

Onde:

- V_{lagoa} = Volume útil da lagoa (m³)
- C_{DBO}^d = Carga volumétrica nominal de DBO₅ (kg / m³ . dia)

c) Cálculo da área média da lagoa:

$$A = (V_{lagoa} / H) = \frac{4800(\text{m}^3)}{4,0(\text{m})} = 1200 \text{ m}^2$$

Onde:

- A = Área média da lagoa (referente à metade da lâmina líquida) (m)

Dimensões relativas à área média da lagoa :

Comprimento B = 35 m
Largura L = 35 m
Altura da lâmina líquida H = 4,0 m

d) Verificação do tempo de detenção hidráulica (θ):

$$\theta = \frac{V_{\text{lagoa}}}{Q} = \frac{14.400 (\text{m}^3)}{4.800 (\text{m}^3/\text{d})} = 3,0 \text{ dias}$$

e) Estimativa do volume de lodo acumulado na lagoa anaeróbia após 5 anos de operação através da taxa volumétrica per capita (t_L)

$$t_L = 0,1 \text{ l/hab.dia (22 }^\circ\text{C)}$$

$$V = (t_L \cdot P \cdot T \cdot 365) / 1000$$

Onde:

V = Volume de lodo acumulado no período considerado(m³)
 t_L = Taxa volumétrica “per capita” de acumulação de lodo (l/hab.dia)
P = População contribuinte com esgoto para a ETE (hab)
T = Tempo de operação estimado para a remoção de lodo da lagoa (anos)

$$V = (0,1 \cdot 10000 \cdot 5 \cdot 365) / 1000 =$$
$$V = 1825 \text{ m}^3 \text{ de lodo}$$

f) Estimativa do volume de lodo acumulado através do modelo de Saqqar e Pescod (1995):

Para estimar o afluxo de sólidos à lagoa, considera-se que 75% dos SST encontram-se na forma volátil e os 25% restantes na forma fixa (Metcalf e Eddy, 1991). Desta maneira, as concentrações das diferentes formas de SS no afluente são: $SSV = 165 \text{ mg/l}$ e $SSF = 55 \text{ mg/l}$. O fluxo de massa (F) é definido como:

$$F = C \cdot Q$$

Onde:

C = Concentração do substrato considerado (mg/l)
Q = Vazão média de esgoto bruto (m³/dia)

Assim:

$$F_{XVSS,0} = 165 (\text{mg/l}) \times 1600 (\text{m}^3/\text{d}) \times 10^{-3} = 264 \text{ Kg/d}$$
$$F_{XFSS,0} = 55 (\text{mg/l}) \times 1600 (\text{m}^3/\text{d}) \times 10^{-3} = 88 \text{ Kg/d}$$
$$F_{CDBO,0} = 300 (\text{mg/l}) \times 1600 (\text{m}^3/\text{d}) \times 10^{-3} = 480 \text{ Kg/d}$$

Entrando com esse valores e um valor de $K_{AS} = 0,6$ na equação [3.12], obtém-se:

$$V_{AS} = K_{AS} \cdot [(1,7 \cdot F_{XVSS,0} + 4,5 \cdot F_{XSS,0} + 1,0 \cdot F_{CDBO,0}) / 1000] =$$

$$V_{AS} = 0,6 \cdot [(1,7 \cdot 264 + 4,5 \cdot 88 + 1,0 \cdot 480) / 1000] =$$

$$V_{AS} = 0,79 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Considerando-se 365 dias / ano, em 5 anos, o volume de lodo estocado no período será de:

$$V_{AS} = 5 \cdot 365 \cdot 0,79 = 1442 \text{ m}^3$$

Este valor é cerca de 20% inferior ao estimado através da taxa volumétrica “per capita” (tabela 3.4 e figura 3.2). Para que o valor estimado pelo modelo fosse igual ao previsto através da taxa empírica, o valor do coeficiente K_{AS} teria de ser igual a 0,76. Esse valor indica o acúmulo de lodos relativamente mal digeridos na lagoa, o que, em função dos parâmetros de dimensionamento adotados, não deverá ocorrer. O mais provável é que, por não considerar as características do esgoto bruto afluente a lagoa, a estimativa realizada através da taxa empírica esteja super-dimensionada.

Tabela 3.4 - Resumo das estimativas de lodos acumulados na lagoa através da taxa volumétrica “per capita” e do modelo Saqqar e Pescod (1995)

Método de cálculo	Taxa t_L	Saqqar e Pescod $K_{AS} = 0,6$	Saqqar e Pescod $K_{AS} = 0,76$
Volume de lodo (m ³)	1825	1442	1825

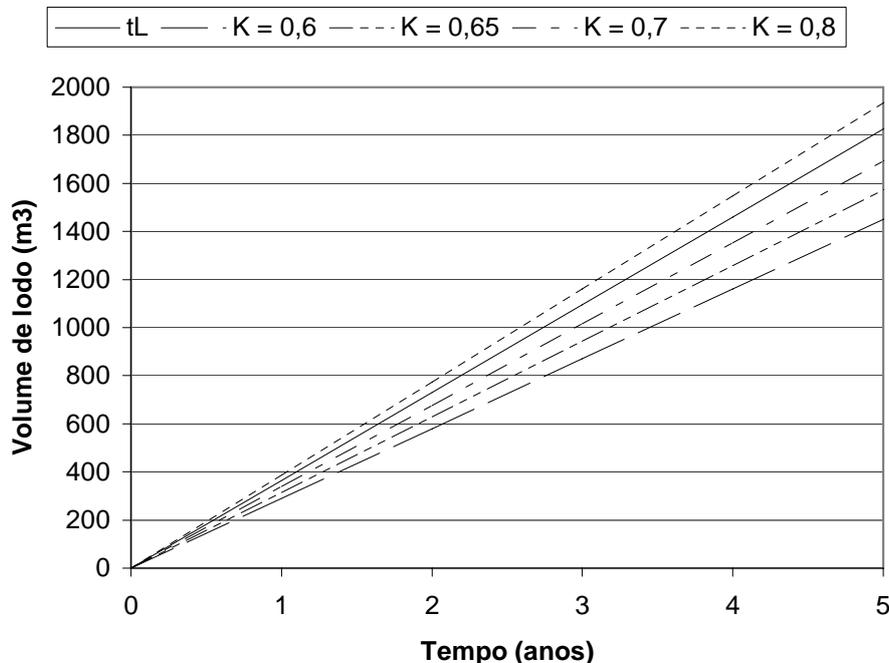


Figura 3.2- Estimativa da produção de lodo em função do tempo através da utilização do modelo de Saqqar e Pescod (1995) e da taxa volumétrica per capita (diferentes valores K_{AS})

CAPÍTULO 4
**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E
MICROBIOLÓGICAS DO LODO DE LAGOAS**

**Ricardo Franci Gonçalves
Márcia Regina Pereira Lima
Fabiana Reinis Franca Passamani**

4.1 - Opções de disposição final em função da composição dos lodos

A definição da melhor opção para a disposição final do lodo depende diretamente das suas características físico-químicas e microbiológicas, dentre as quais sobressaem a quantidade de matéria orgânica, os nutrientes, os metais pesados e os compostos orgânicos potencialmente tóxicos (Santos, 1996). Os principais efeitos nocivos provocados por uma disposição inadequada do lodo podem resultar em: (a) risco à saúde humana, animal e vegetal em função de agentes contaminantes e (b) acúmulo de metais pesados ou compostos orgânicos no solo.

As características físico-químicas de alguns lodos dependem da composição das águas residuárias e dos processos que compõem tanto a fase líquida quanto a fase sólida do tratamento. Sabe-se que estas características podem variar anualmente, sazonalmente ou até mesmo diariamente, em consequência das variações nas características das águas residuárias. Estas variações são mais acentuadas em sistemas que recebem grandes quantidades de descargas industriais (Metcalf e Eddy, 1991). Processos de tratamento diferentes geram tipos e volumes de lodo diferentes que irão influenciar diretamente nas técnicas de desidratação, higienização e disposição final do material.

Dentre as várias alternativas racionais para disposição final do lodo destacam-se os aterros sanitários, disposição de superfície, disposição oceânica, lagoas de armazenamento, incineração e reciclagem agrícola. A abordagem central realizada neste capítulo é a caracterização físico-química e microbiológica do lodo de lagoas com vistas à sua valorização agrícola. Para tanto, destacam-se como importantes características do lodo os teores de nutrientes, pelas suas propriedades nutricionais, e os de metais pesados e de poluentes orgânicos, que podem por em risco o equilíbrio da cadeia alimentar e, conseqüentemente, a saúde humana. Outro aspecto importante está relacionado com os teores de matéria orgânica do lodo, que determinam a estabilidade do material e o seu potencial de emissão de odores e de atração de vetores.

4.2 - Composição físico-química típica do lodo de lagoas

Sólidos Totais e Voláteis

O parâmetro inferencial mais utilizado para avaliação dos teores de matéria orgânica no lodo é a sua concentração de sólidos voláteis. Nos processos de tratamento com baixos tempos de retenção celular, o lodo apresenta baixos teores de sólidos totais (ST) e elevados percentuais

de sólidos voláteis (SV), exigindo etapas de tratamento que realizem a estabilização complementar. Conforme já foi discutido nos capítulos anteriores, os lodos de lagoas apresentam características específicas devido ao longo tempo de permanência dentro dos reatores (geralmente, $\theta_c > 5$ anos). Esse período de retenção elevado permite, ao mesmo tempo, importante adensamento e digestão anaeróbia extensiva. A degradação dos sólidos por períodos superiores a um ano na camada de lodo permite até mesmo a decomposição do material orgânico de biodegradação muito lenta (Saqqar e Pescod, 1995).

Os lodos retirados de lagoas primárias em geral apresentam elevados teores de sólidos totais (ST > 15%) e baixos teores de sólidos voláteis (SV < 50% ST) (Silva, 1983, Da Rin, 1988, Tsutyia e Cassetari, 1995 e Nascimento et al, 1999). Os experimentos realizados no Espírito Santo indicam nitidamente o efeito do tempo de residência do lodo no reator sobre suas características físico-químicas. As amostras estratificadas da camada de lodo apresentaram altas concentrações de sólidos totais no fundo da lagoa anaeróbia de Eldorado, atingindo valores superiores a 22% (figura 4.1). Tais sólidos apresentam-se bastante estabilizados, com teores de sólidos voláteis na faixa de 35 %ST. Os teores de sólidos decaem de forma não linear ao longo da altura da camada de lodos, no sentido ascendente da lâmina líquida, atingindo valores médios de ST = 12,5% e SF= 41,8 %ST na altura de 1,40 m. Esta lagoa nunca havia sido submetida a operação de retirada do lodo até a realização do levantamento, estando em operação a mais de 10 anos.

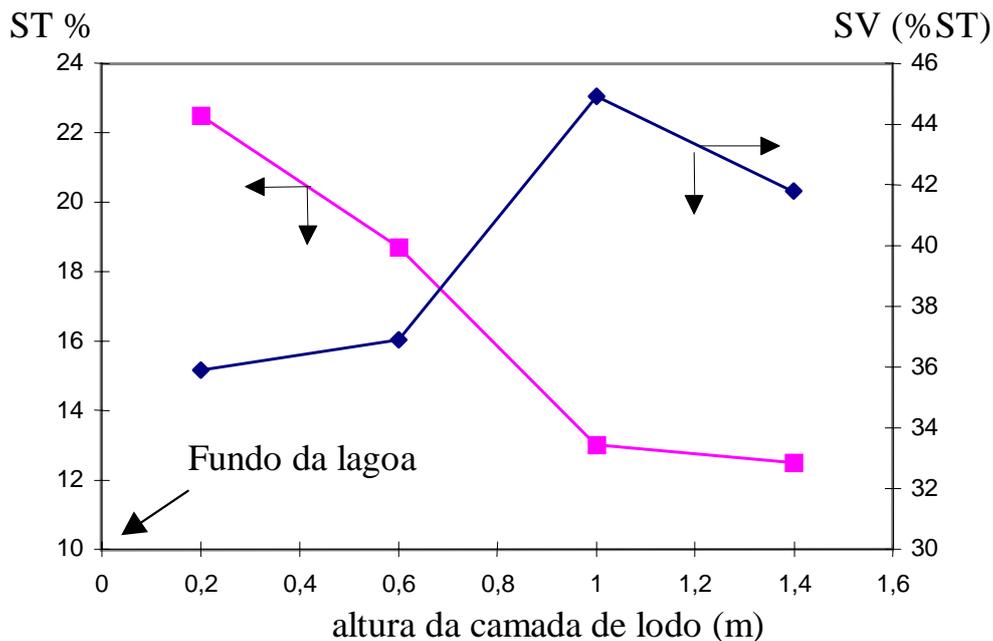


Figura 4.1 - Variação dos teores de sólidos totais e sólidos voláteis ao longo da altura da camada de lodo da lagoa anaeróbia de Eldorado

Observou-se ainda que os teores médios de sólidos dos lodos retirados das lagoas anaeróbias são bem superiores aos retirados de lagoas facultativas primárias e de lagoas de sedimentação em sistemas do tipo [lagoa aerada com mistura completa + lagoa de sedimentação] (tabela 4.1). Valores típicos de teores de ST presentes em lodo primário adensado e em lodo adensado e digerido pela via anaeróbia também são apresentados na tabela, para efeito de comparação.

Deve ser ressaltado que os teores de ST da ordem de 18% encontrados em lodos de lagoas do ES (Müller, 1998), de SP (Silva, 1983 e Tsutyia e Cassetari, 1995) e na Jordânia (Saqqar e Pescod, 1995) correspondem a teores de ST em lodos de processos do tipo lodos ativados ou filtros percoladores submetidos a desidratação pela via mecanizada (Exemplo: centrífugas e prensas desaguadoras). Por exemplo, lodos extraídos de lodos ativados e submetidos diretamente a centrifugação atingem teores de ST na faixa de 5 a 15%. Se digeridos anaerobicamente em conjunto com lodo primário, esses teores podem atingir valores na faixa de 10 a 35% (Metcalf e Eddy, 1991).

Tabela 4.1 - Teores de sólidos totais e de sólidos voláteis em diferentes tipos de lagoas de estabilização operando no ES

Parâmetros	Eldorado (lagoa anaeróbia)	Mata da Serra (lagoa facultativa primária)	Valparaíso (lagoa sedimentação)	Lodo primário* (típico)	Lodo digerido* (típico)
Sólidos Totais (%)	18,3	8,4	5,8	5,0	10,0
Sólidos Voláteis (% ST)	37,2	35,8	54,8	65,0	40

Fonte : Muller (1998), Metcalf and Eddy (1991)*

Nutrientes

A quantidade de nutrientes e matéria orgânica do lodo de esgoto aumenta a fertilidade do solo e ainda, como condicionador, melhora as características físicas, como tamanho e estabilidade dos agregados, a capacidade de armazenamento e infiltração de água (Nascimento e Botega, 1996). Constitui-se em fonte de macro e micronutrientes para os vegetais, através de sua mineralização e diminui a suscetibilidade dos solos à erosão (Sopper, 1993).

O teor de nitrogênio nos lodos de estações de tratamento de esgotos varia de 2 a 6 %, principalmente sob a forma orgânica, do qual 10 a 40 % mineraliza-se no primeiro ano de aplicação no solo. O fósforo apresenta-se no lodo também em maiores concentrações que em matérias orgânicas de uso habitual na agricultura e apresenta baixa solubilidade no solo. O potássio apresenta-se em níveis geralmente inferiores a 1% no lodo, por esse elemento ser muito solúvel e não ficar retido no mesmo. No solo, 100% do potássio é considerado assimilável pelas plantas (Luchesi, 1998).

Os resultados dos estudos de caracterização dos lodos de lagoas em operação no ES indicam que, em função da estabilização avançada, os lodos de lagoas não mecanizadas apresentam teores de macronutrientes relativamente baixos (tabela 4.2). Em comparação com o lodo digerido de processos mecanizados e com os fertilizantes, as maiores deficiências se concentram nos teores de fósforo e potássio. Não obstante, os testes realizados por Teles (1999), sobre a produção de mudas de essências nativas utilizando o lodo de lagoa anaeróbia como substrato, apresentaram excelentes resultados quando comparados à utilização de fertilizantes químicos disponíveis no mercado.

Tabela 4.2 – Teores de nutrientes nos lodos de lagoas operando no ES e valores típicos de lodo de esgoto digerido e de fertilizantes agrícolas

ETE / tipo de material	Tipo de lagoa	NTK (%ST)	P total (%ST)	K (%ST)
Eldourado	Anaeróbia	2,0	0,2	0,04
Mata da Serra	facultativa primária	2,0	0,2	0,05
Valparaíso	lagoa de sedimentação	4,0	3,5	0,07
Lodo de esgoto digerido	-	3,3	2,3	0,3
Fertilizantes para agricultura*	-	5,0	10,0	10

Fonte : Muller (1998), Metcalf e Eddy (1991)

* Valores variáveis, segundo o tipo de cultura e as características do solo

Metais pesados

Os elementos traços, normalmente designados por metais pesados, tem ação dinâmica e consequências ambientais muito diferentes um dos outros. O termo metal pesado abrange metais como cobre, zinco, mercúrio, cádmio, cromo, níquel e chumbo, que possuem como característica em comum a densidade atômica maior que 6 g / cm^3 . Estes elementos representam um grupo de poluentes que requer uma atenção especial, pois não são biodegradados biologicamente ou quimicamente de forma natural, principalmente em ambientes terrestres e em sedimentos aquáticos. Ao contrário, são acumulados e podem tornar-se ainda mais nocivos quando reagem com alguns dos componentes dos solos e sedimentos.

A concentração de metais em lodos depende, em grande parte, do tipo e quantidade de efluentes industriais lançados nos sistemas de tratamento de esgotos e é fundamental na definição de alternativas para disposição final. Em baixas concentrações os metais são fontes de nutrientes para as plantas mas, quando em altas concentrações alguns destes metais podem ser nocivos não só às plantas, como também ao homem e aos animais. Sabe-se, entretanto, que elementos como ferro, cobre, cobalto, molibdênio e zinco desempenham importantes funções nos organismos: eles compõem o sistema doador de elétrons e funcionam como pontes nos compostos enzimáticos, isto em baixas concentrações, pois podem tornar-se tóxicos e até mesmo letais em altas concentrações.

Para Chaney et al. (1980) os elementos traços mais perigosos aos animais são o cádmio, o berílio, o molibdênio, o selênio e o cobalto. Andreoli et al. (1994) destacam como perigosos o cobre, o molibdênio, o níquel e o zinco, e, especialmente, o cádmio. Segundo os autores, este elemento não apresenta função biológica e é tóxico para os animais em concentrações mais baixas do que para os vegetais. Uma vez no solo, os metais pesados podem ser adsorvidos, lixiviados ou incorporados à teia trófica.

Segundo a EPA (1995), a presença de elementos traço no solo pode ou não causar riscos, dependendo do pH, CTC, textura e teor de matéria orgânica. Os processos de adsorção, complexação, precipitação, oxidação e redução é que definem a biodisponibilidade destes elementos para as plantas, a solubilidade e a lixiviação nos solos e, conseqüentemente, seu potencial de risco para a saúde humana e para o meio ambiente. O tipo de planta também seria

um fator a ser considerado visto que as espécies vegetais têm capacidades variáveis de absorção de metais.

As concentrações de metais pesados nos lodos das lagoas estudadas no Espírito Santo são relativamente baixas quando comparado a dados de literatura referentes a ETEs de outros estados brasileiros e países (tabela 4.3). Verificou-se que há uma predominância de valores mais elevados em quase todos os compostos metálicos nas amostras da lagoa de Valparaíso (aerada + bacia de sedimentação).

Dentre os elementos com concentrações mais expressivas no lodo de Valparaíso destacam-se o Cobre (Cu) (190 mg/kg) e o Zinco (Zn) (1512 mg/kg). Comparativamente, os valores de concentração encontrados no lodo desta ETE correspondem a quase o dobro dos encontrados no lodo da lagoa anaeróbia de Eldorado. Somente no tocante aos elementos Ferro (Fe) e Cobalto (Co), o lodo de Valparaíso apresentou concentrações menores do que os das demais lagoas (21,7 g/Kg e 6 mg/kg). As concentrações de Manganês (Mn) e Chumbo (Pb) apresentaram concentrações intermediárias, variando de 118 e 95 mg/kg. A maior concentração de metais da estação de Valparaíso deve-se ao fato da mesma receber pequena contribuição de esgoto de origem industrial, enquanto que as estações de Mata da Serra e Eldorado tratam exclusivamente esgoto doméstico.

Comparando os resultados obtidos no Espírito Santo com o de outros autores, observa-se que o lodo da lagoa anaeróbia de Eldorado apresenta concentrações de metais pesados menores do que os lodos descartados de processos anaeróbios operados pela SANEPAR (Miyazawa et al, 1996). O lodo da estação de Valparaíso apresentou teores de metais expressivamente menores do que os teores dos lodos de Barueri (SP), Suzano (SP) e do Paraná. Os teores de alguns metais potencialmente tóxicos (Cr e Pb) chegaram a apresentar valores 4 vezes menores do que o menor valor relatado para o lodo do Paraná. Em relação aos metais Fe e Mn em lodo de esgoto, não foi possível encontrar dados de literatura a respeito.

Tabela 4.3 - Concentrações de metais pesados nas lagoas estudadas comparados com outros sistemas.

Estação	Tipo de lagoa	Cu mg/kg	Co mg/kg	Cr Mg/kg	Ni mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Fe g/kg
V. Nova	Anaeróbio	91	14	73	40	2	86	-	232	470	44,0
Valparaíso	Aeróbio	190	6	63	30	2	95	2,5	118	1512	21,7
Mata Serra	Facultat.	111	9	50	32	2	100	1,8	129	710	38,5
Eldorado	Anaeróbio	95	8	44	25	3	80	1,5	118	632	34,0
Paraná	Aeróbio	401	-	125	81	<2,5	268	-	-	1340	-
Paraná	Anaeróbio	299	-	190	94	<2,5	343	-	-	1070	-
Paraná	Aeróbio	439	-	178	73	-	123	1,0	-	824	-
Paraná	Anaeróbio	89	-	58	40	-	64	0,5	-	456	-
Barueri	Aeróbio	917	-	670	364	21	200	2,6	-	1876	-
Susano	Aeróbio	811	-	2495	212	603	352	24,6	-	1880	-

Com relação às normas sobre reutilização de lodos na agricultura vigentes em outros países, verifica-se que as concentrações de todos os metais pesados nos lodos do Espírito Santo atendem aos padrões mais restritivos estabelecidos nos EUA e na Europa (tabela 4.4). Esse

fato é consequência do tipo de esgoto sanitário tratado pelas ETEs estudadas, constituído quase que essencialmente por esgotos de origem residencial.

Tabela 4.4 – Padrões referentes a metais em lodo de esgoto utilizados na agricultura e nos solos agrícolas (Normas dos EUA e da Comunidade Européia)

Metais Pesados	EUA – USEPA Part 503		Europa – Diretiva 86/278/EEC	
	Concentração máxima	Qualidade excepcional	Recomendado	Obrigatório
	(mg / kg MS)	(mg / kg MS)	(mg / kg MS)	(mg / kg MS)
Zinco	7500	2800	2500	4000
Cobre	4300	1500	1000	1750
Níquel	420	420	300	400
Cádmio	85	39	20	40
Cumbo	840	300 **	750	1200
Mercúrio	57	17	16	25
Cromo	3000	1200	-	-
Molibdênio	75 ++	18 ++	-	-
Selênio	100	36	-	-
Arsênico	75	41	-	-
Metais pesados	Carga máxima	Conc. no solo	Carga máxima	Conc. no solo
	(kg / ha / ano)	(mg / kg MS)	(kg / ha / ano)	(mg / kg MS)
Zinco	140	1460	30	150 – 450 (3)
Cobre	75	770	12	50 – 21 (3)
Níquel	21	230	3	30 – 112 (3)
Cádmio	1,9	20 (4)	0,15	1 – 3
Cumbo	15 (4)	180 (4)	15	50 – 300
Mercúrio	0,85	8,5 (4)	0,1	1 – 1,5
Cromo	150	1530	-	-
Molibdênio	0,9 (5)	9,5 (5)	-	-
Selênio	5	50 (4)	-	-
Arsênico	2	21 (4)	-	-

Fonte: Hall (1998)

4.3 - Características microbiológicas dos lodos produzidos por lagoas

Coliformes fecais

A maioria dos relatos sobre a presença de coliformes fecais em lodos retirados de lagoas de estabilização indicam, em comparação com outros tipos de lodos, baixas densidades desses microrganismos. Dados recentes, publicados por Nelson e Jiménez (1999), a respeito do lodo de uma lagoa facultativa primária operando na cidade do México, indicam que boa parte dos coliformes fecais do esgoto são capturados e inativados na camada de lodo. A densidade média de coliformes fecais variou em função da profundidade, com média de 10^7 NMP/g (MS) na região mais próxima da superfície, e $2,3 \times 10^3$ NMP/g (MS) na região mais profunda. Tal fato demonstrou a ocorrência de uma inativação de 4 log no lodo de lagoa de estabilização facultativa estudada.

As pesquisas realizadas por Tsutyia e Cassetari (1995) indicaram quantidades relativamente pequenas de coliformes totais e fecais no lodo de duas lagoas facultativas (49.000 hab.) operando em série desde 1978 em SP. Os valores variaram entre 8×10^5 e $2,4 \times 10^5$ NMP/100 g, no caso dos coliformes totais, e entre $2,2 \times 10^5$ e $1,7 \times 10^5$ NMP/100 g para os coliformes fecais.

Nas pesquisas realizadas com o lodo da lagoa anaeróbia de Maringá, no Espírito Santo, as concentrações de coliformes fecais variaram entre 10^6 e 10^4 NMP/100g nos diferentes pontos de coleta de amostras (figuras 4.2 e 4.3). A concentração média inicial de coliformes fecais foi de $4,9 \times 10^4$ NMP/g (MS) considerando no cálculo todas as amostras coletadas até então. O valor da média geométrica obtido para as 24 amostras, medida na região mais próxima da superfície do lodo, é levemente superior ao encontrado por Muller (1998). A caracterização microbiológica de lodos de outras lagoas anaeróbias no Espírito Santo mostrou uma concentração média de coliformes fecais de $1,9 \times 10^3$ NMP/g (MS).

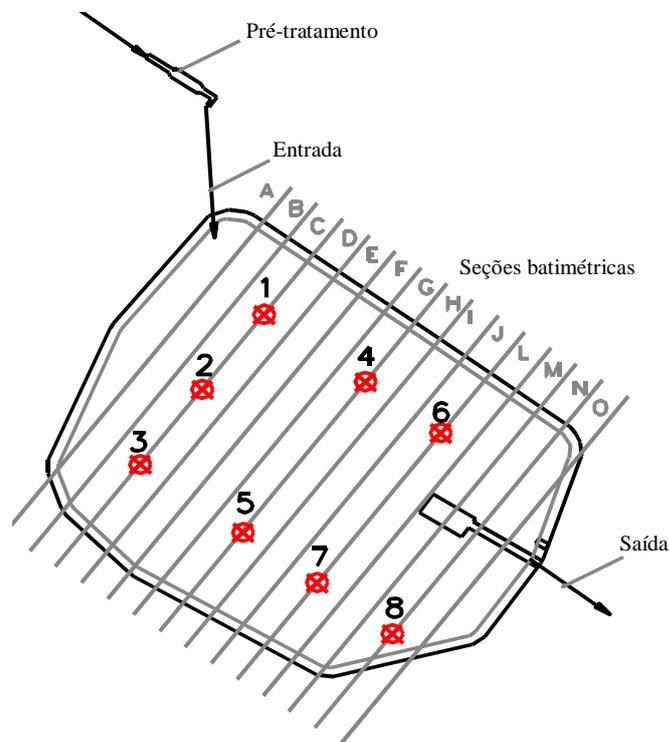


Figura 4.2 – Seções batimétricas e pontos de coleta de amostras do lodo da lagoa anaeróbia de Maringá, Serra (ES)

No lodo produzido pelas ETE's Norte e Sul através do processo de lodos ativados com remoção biológica de nutrientes, gerenciadas pela CAESB, foi constatado a média de 10^6 para coliformes fecais (CAESB, 1998). Como se pode observar, estes valores demonstram uma média superior aos encontrados nas ETE's do Espírito Santo (tabela 4.5).

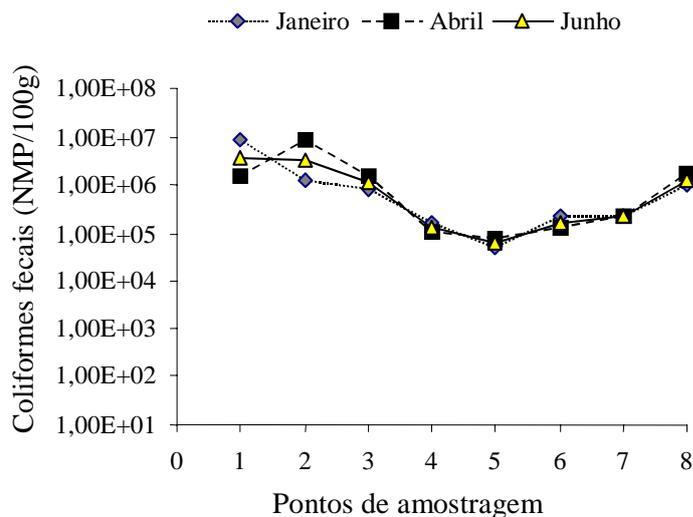


Figura 4.3- Densidade de coliformes fecais encontradas nos diferentes pontos da lagoa anaeróbia da ETE de Maringá, Serra (ES)

Tabela 4.5 – Resultados comparativos de coliformes fecais e ovos de helmintos no lodo de ETE's de Brasília e Espírito Santo

Patógeno	Lodo ETE Maringá-ES	Lodo ETE Eldourado-ES	Lodo CAESB	EPA Classe A	EPA Classe B
Ovos viáveis de helmintos (ovos/g MS)	3,5	-	3,0	< 1	NE
Ovos de helmintos (ovos/g MS)	76,4	12,9	13,0	NE	NE
Coliformes fecais (NMP/g MS)	10 ⁴	10 ³	10 ⁶	< 10 ²	< 10 ⁶

Fonte: CAESB (1998) e Muller (1998), NE – Não especificado.

Helmintos

A remoção de ovos de helmintos em lagoas ocorre predominantemente por sedimentação, com taxas bastante elevadas em climas quentes (Pescod, 1995). Os estudos realizados por Silva (1982), em várias lagoas operando em série, na região Nordeste do Brasil, mostraram que todos os ovos de parasitas são removidos nas duas primeiras lagoas. Pescod (1995) afirma que a taxa remoção de ovos de parasitas por unidade de tempo de residência é a mesma em lagoas de estabilização anaeróbias, anóxicas ou facultativas primárias, uma vez que esta depende basicamente da sedimentação.

Nas pesquisas realizadas com o lodo da lagoa anaeróbia de Maringá, no Espírito Santo, os resultados das análises parasitológicas indicam uma maior concentração de ovos de helmintos no ponto 6 (próximo a saída da lagoa), seguidos dos pontos 2 e 1 (próximos a entrada da lagoa) (figura 4.4). Esta diferença de distribuição ocorre, provavelmente, devido a direção de fluxo hidráulico na lagoa e do tempo de decantação.

As análises de identificação mostraram a presença de ovos de nematodas e de cestodas. Dentre estes, as espécies que prevaleceram foram *Ascaris lumbricoides* (> 50%), *Trichuris trichiura*, *Ascaris summ*, Ancilostomídeo e *Hymenolepis diminuta* (Figura 4.5). A digestão anaeróbia do lodo no interior da lagoa resulta em uma porcentagem média de redução de viabilidade dos ovos de helmintos de 95,4 %. Sendo o número total de ovos de 76,4/g (M.S.), foram detectados 3,5 ovos viáveis/g (M.S.) e 72,9 ovos inviáveis/g (M.S.). Os resultados encontrados não diferem muito de outras caracterizações de lodo de lagoa anaeróbia no Espírito Santo. Vale ressaltar que, apesar do elevado número de ovos de helmintos encontrados no lodo, a redução é elevada e, conseqüentemente, o número de ovos viáveis é pequeno.

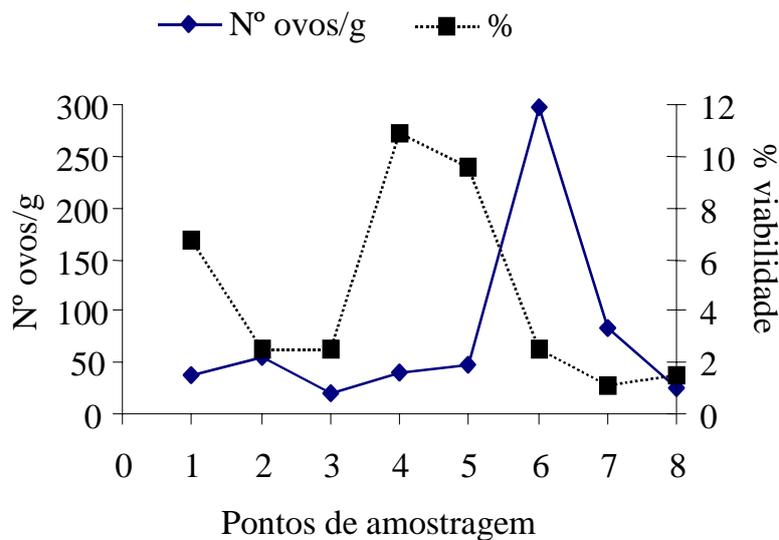


Figura 4.4- Contagem e viabilidade de ovos de helmintos nas amostras analisadas

No tocante à viabilidade, existem principalmente dois tipos de ovos de helmintos, os férteis ou fecundados e os inférteis ou não fecundados. Um ovo fértil é considerado potencialmente viável, ou seja, capaz de desenvolver-se até a etapa infecciosa (Rojas et.al., 1998). No lodo da lagoa anaeróbia estudada esta concentração de ovos viáveis, indica a necessidade de higienização para sua posterior utilização na agricultura. Este tratamento, além de diminuir o risco de contaminação humana e animal, valoriza este sub-produto (Bontoux, 1998).

Concentrações médias de ovos de helmintos mais elevadas foram encontradas por Nelson e Jiménez (1999), na camada mais superficial do lodo de lagoa facultativa de estabilização primária, tratando esgoto sanitário da Cidade do México. Os valores obtidos foram de 102 ovos/g (MS), sendo 15 ovos viáveis/g (MS). Os estudos realizados em reatores do tipo RALF (digestão anaeróbia) da região metropolitana de Curitiba demonstraram uma eficiência de redução de 80% da viabilidade de ovos de helmintos (Thomaz-Soccol, 1998). O tempo de permanência do lodo em lagoas varia por um período de 5 a 10 anos, enquanto que em reatores anaeróbios este tempo é da ordem de 60 a 90 dias.

A digestão anaeróbia do lodo no interior da lagoa resulta em uma porcentagem média de redução de viabilidade dos ovos de helmintos de 95,4 %. O lodo analisado neste estudo pode

ser classificado como Lodo classe B, podendo ser utilizado para cultivo de espécies florestais e frutíferas, se esta for a disposição final do mesmo.

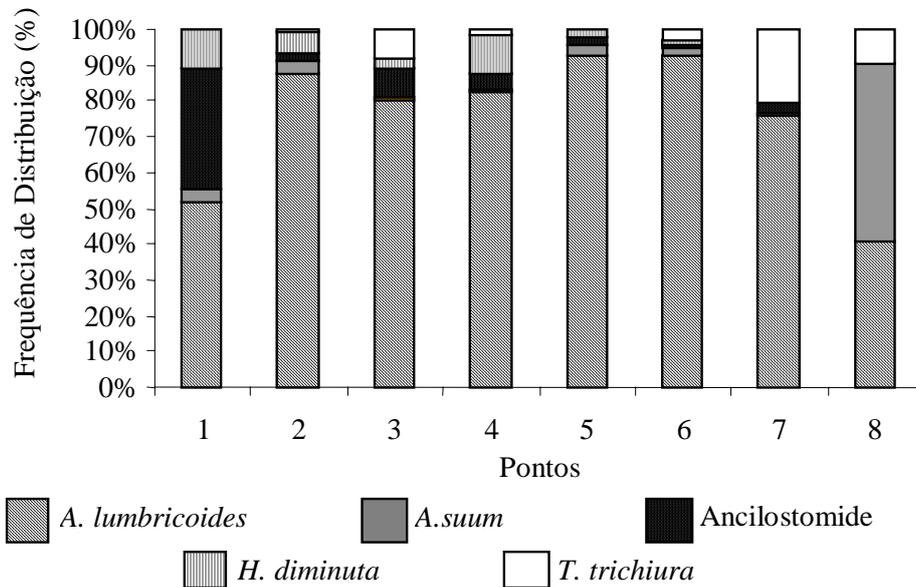


Figura 4.5 - Frequência de distribuição de ovos de helmintos em lodo de lagoa de estabilização anaeróbia.

Outros microrganismos patogênicos

As bactérias do gênero *Salmonella* são geralmente encontradas no lodo. São utilizadas como indicadores da redução de outras bactérias patogênicas por serem encontradas em grande densidade na natureza, apresentarem uma habilidade de crescimento rápido em determinadas condições, além de serem bastante resistentes aos processos de tratamento.

4.3.1 - Principais grupos de microrganismos patogênicos em lodos de esgoto

O lodo de esgoto pode apresentar quantidades significativas de microrganismos patogênicos, o que se constitui em um dos principais entraves na sua utilização como insumo agrícola. A disposição deste material no solo sem higienização prévia possibilita a exposição do homem e dos animais a bactérias, vírus, fungos e parasitas patogênicos (tabela 4.6).

A transmissão de doenças pelo lodo de esgotos pode se dar de forma direta, indireta ou através de vetores (EPA, 1992). A contaminação direta pode ocorrer pelo manejo de áreas onde o lodo foi aplicado, pelo contato com vegetais crus cultivados em solo adubado com lodo e pela inalação de microrganismos patogênicos através do espalhamento do lodo no solo. A transmissão indireta pode acontecer por consumo de vegetais, carne e leite de animais que podem ter sido contaminados por patógenos presentes no lodo, pela ingestão de água contaminada, pela proximidade a áreas de aplicação do lodo e pelo contato com agentes vetores (roedores, insetos) que tenham estado nas áreas que receberam lodo. Desta maneira, a caracterização de lodos de lagoas é condição fundamental para se ter uma disposição final adequada deste material.

Microorganismos como bactérias, fungos, helmintos, protozoários e vírus estão presentes em águas residuárias e lodos, e muitos tipos são capazes de se proliferarem durante alguns estágios do tratamento do esgoto.

Tabela 4.6 - Principais patógenos presentes em águas residuárias municipais e lodos

ORGANISMO	DOENÇA/SINTOMAS
BACTÉRIA	
<i>Salmonella</i> spp.	Salmonellosis, febre tifóide
<i>Shigella</i> spp.	Desintéria bacilar
<i>Yersinia</i> spp.	Gastroenterite aguda
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenterite
VÍRUS	
Poliovírus	Poliomelites
Coxsackievirus	Meningites, pneumonias, hepatites, febres, etc.
Echovírus	Meningites, pneumonias, encefalites, febres, diarreias, etc.
Hepatite A vírus	Hepatite infecciosa
Rotavírus	Gastroenterite aguda com diarreias severas
Reovirus	Infecções respiratórias, gastroenterites.
PROTOZOÁRIOS	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenterite
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enterite aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiase
<i>Balantidium coli</i>	Diarréia e desintéria.
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose
HELMINTOS	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Distúrbios digestivos e nutricionais, dor no abdômen, vômitos
<i>Ascaris suum</i>	Pode causar sintomas como febre, tosse e dor peitoral
<i>Trichuris trichiura</i>	Dor abdominal, diarreia, anemia e perda de peso.
<i>Toxocara canis</i>	Febre, desconforto abdominal, dores musculares, sintomas neurológicos.
<i>Taenia saginata</i>	Nervoso, insônia, anorexia, dor abdominal, distúrbios digestivos.
<i>Taenia solium</i>	Nervoso, insônia, anorexia, dor abdominal, distúrbios digestivos.
<i>Necator americanus</i>	Distúrbios digestivos
<i>Hymenolepis nana</i>	Teníase

Fonte: EPA (1992)

Muitos dos tratamentos biológicos removem microrganismos patogênicos presentes no esgoto, nem sempre pela destruição das suas funções vitais, mas frequentemente pela sua captura e concentração no lodo originado pelo processo de tratamento. A concentração destes microrganismos no lodo depende diretamente de vários fatores, dentre os quais podem ser citados: as condições sócio-econômicas da população, as condições sanitárias, a presença de animais vivendo na rede de esgoto, as características do esgoto, o tipo de estação de tratamento de esgoto e o tipo de tratamento a que o lodo foi submetido (Exemplo: digestão aeróbia, digestão anaeróbia).

Os tipos de microrganismos que podem ser encontrados em lodos de esgoto refletem três categorias gerais: 1) os que geralmente participam no processo do tratamento; 2) os que podem causar problemas no processo de tratamento, e 3) os que não participam do processo de tratamento e estão somente presentes. Esta última categoria inclui a maioria das bactérias patogênicas, vírus e os parasitas (Lue-Hing et al., 1992). Estes microrganismos podem ser caracterizados, usualmente, pela sua resistência, pois eles conseguem sobreviver a uma variedade de fatores ambientais, como as flutuações de temperatura, pH, radiação solar, limitações de nutrientes, etc.

As evidências sobre transmissão de doenças pelo uso do lodo de esgoto são escassas na literatura. Segundo EPA (1984), a maior probabilidade está associada ao uso em culturas agrícolas de contato primário, ao uso em pastagens e à contaminação de corpos d'água.

4.3.2- Normas técnicas para uso do lodo

As normas técnicas regulamentam o uso e a disposição do lodo estabelecendo critérios baseados no risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente. Estas normas estabelecem ainda que o lodo de esgoto pode ser utilizado na agricultura após higienizado por processos que eliminem ou reduzam significativamente o teor de organismos patogênicos, tornando o produto final biologicamente inerte de acordo com a aplicação desejada. O controle deve ser realizado com o monitoramento de três espécies de patógenos: *Salmonella* spp., vírus entéricos e ovos viáveis de helmintos, além da utilização de um indicador bacteriano de contaminação que são os coliformes fecais. Tanto os Estados Unidos como o Paraná especificam critérios para classificação do lodo de acordo com as características sanitárias e o uso agrícola do material (tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Limites estabelecidos para patógenos pela legislação do Paraná e dos E.U.A.

Legislação do Paraná		
Microrganismos / Classes	Lodo Classe A	Lodo Classe B
Ovos de helmintos	Até 50 ovos/100 g MS	Até 100 ovos/100 g MS
<i>Salmonella</i> spp	Ausente	Ausente
Estreptococos fecais	$< 10^3/100$ g MS	$< 10^6/100$ g MS
Coliformes fecais	$< 10^3/100$ g MS	$< 10^6/100$ g MS
Culturas	Milho, feijão, soja, ou seja, grandes culturas mecanizadas sem contato primário.	Espécies florestais e frutíferas em sistema de cova.
Legislação dos E.U.A.		
Microrganismos / Classes	Lodo Classe A	Lodo Classe B
Ovos viáveis de helmintos	$< 1 / 4$ g M.S.	Não especificado
<i>Salmonella</i> spp	$< 3 / 4$ g M.S.	Não especificado
Coliformes fecais	$< 10^3 /$ g M.S.	$< 2 \times 10^6 /$ g M.S.
Vírus entéricos	$< 1 / 4$ g M.S.	Não especificado
Culturas	Pode ser aplicado em terrenos de praças, jardins e pastagens.	Pode ser utilizado na agricultura com algumas restrições.

Fontes: SANEPAR (1997) e EPA (1992)

REMOÇÃO DO LODO DAS LAGOAS

Ricardo Franci Gonçalves
Claudio Gomes do Nascimento
Márcia Regina Pereira Lima

5.1 – Introdução

A remoção do lodo é uma tarefa obrigatória e de proporções significativas na operação de lagoas primárias, ainda sem solução de engenharia com aceitação generalizada. Sua realização deve ser bem planejada, uma vez que a técnica utilizada pode alterar as características do lodo (aumentar a umidade) e dificultar a sua disposição final. Algumas das principais técnicas de remoção utilizadas no Brasil, identificadas através de pesquisa bibliográfica e de informações de empresas concessionárias de saneamento, são relacionadas a seguir.

5.2 – Informações sobre o volume de lodo a ser removido

O planejamento da remoção do lodo de uma lagoa tem como objetivo minimizar custos, antecipar soluções de problemas eventuais e reduzir impactos relacionados com a remoção e disposição do lodo. Como etapas essenciais na operação de limpeza podem ser citadas:

ETAPA 1 – A determinação da geometria da lagoa com base no projeto executivo ou através de levantamento topográfico.

ETAPA 2 - A realização da batimetria da lagoa, definindo-se seções batimétricas, altura útil da lagoa e a lâmina da camada de lodo.

ETAPA 3 - Caracterização físico-química e microbiológica do lodo.

ETAPA 4 – Definição da tecnologia a ser adotada na remoção do lodo e, se necessário, os meios de desidratação e transporte.

ETAPA 5 – Definição do destino final adequado para o lodo, considerando o menor impacto ambiental possível.

Evidentemente, as etapas 1, 2 e 3 são pré-requisitos para implementação da etapa 4, que define a técnica de remoção do lodo da lagoa. Embora não haja convergência a nível nacional sobre tal ou qual tipo de técnica, a sua definição tem impacto direto nos teores de umidade e, portanto, no volume de lodo a ser disposto posteriormente.

5.3 – Técnicas aplicáveis na remoção do lodo

As principais técnicas de remoção do lodo de lagoas podem ser classificadas em mecanizadas ou não mecanizadas e com paralisação ou não paralisação do funcionamento da lagoa. Esta última

classificação foi adotada na descrição a seguir, por considerar a decisão operacional de manter ou não a lagoa funcionando.

Para os casos em que o lodo deve ser submetido a desidratação após a remoção, as seguintes alternativas podem ser consideradas: secagem natural na própria lagoa, utilização de leitos de secagem, de lagoas de lodo ou até mesmo a utilização de equipamentos mecânicos.

Estudos realizados no Espírito Santo, por ocasião do plano diretor para gerenciamento do lodo de esgotos no Estado, indicaram a viabilidade de utilização de uma unidade móvel de desidratação (com centrífugas) na região da Grande Vitória. Esta opção mostrou-se viável por se tratar de uma região com cerca de 20 ETEs com lagoas de estabilização, muitas das quais anaeróbias ou facultativas primárias em operação ininterrupta por mais de 10 anos.

5.3.1 – Remoção de lodos com desativação temporária da lagoa

A desativação temporária de uma lagoa pode ser uma medida operacional simples, se a etapa primária de lagoas foi projetada em módulos e se existe capacidade ociosa de tratamento. Entretanto, se esta etapa é composta por uma única lagoa, ou se a carga nominal de dimensionamento já foi atingida, a desativação temporária pode colocar em risco a estabilidade da etapa posterior do tratamento.

Outro aspecto importante está relacionado com o esvaziamento da lagoa. Esta operação necessária para a secagem do lodo no local requer planejamento prévio e consentimento do órgão ambiental. Em caso de esvaziamento muito rápido, principalmente em se tratando de lagoas anaeróbias, o impacto do efluente anaeróbio no corpo receptor pode superar a capacidade de auto-depuração deste último. Mortandade de peixes, odores desagradáveis e protestos por parte da população podem surgir em consequência.

Remoção manual

Neste caso o lodo é submetido a secagem dentro da própria lagoa, até atingir uma consistência que possibilite a utilização de pás e carrinhos de mão para promover a sua retirada ($ST > 30\%$). A figura 5.1 ilustra a remoção do lodo contaminado por óleos de alta densidade na primeira lagoa da ETE de Jardim Camburi, em Vitória (ES), operada pela Companhia Espírito Santense de Saneamento

Esta técnica possui a grande desvantagem de requerer um longo período para secagem (ver capítulo 6 desse livro). Considerando-se o período de tempo necessário ao esvaziamento da lagoa, o período de secagem e o período referente à remoção manual do lodo, seguramente a lagoa deverá permanecer desativada por mais de 3 meses.

Entretanto, o volume de lodo a ser removido nestas condições é bastante inferior ao volume existente antes da secagem. Outro aspecto positivo é a possibilidade de higienização complementar do lodo por pasteurização induzida pela energia solar. Pode ser considerada uma solução viável para pequenas ETEs (< 5000 E.H.).



Figura 5.1 – Remoção manual do lodo de lagoa anaeróbia - Vitória (ES) (Cortesia: CESAN)

Remoção mecânica (uso de tratores)

Como na técnica anterior, o lodo é submetido a secagem na lagoa, sendo removido em seguida. Em função do maior rendimento das máquinas na remoção do lodo, a lagoa pode voltar a funcionar mais rapidamente do que no caso da remoção manual. Porém, para que os tratores tenham acesso ao fundo da lagoa, deve ser verificada previamente a capacidade de suporte do solo, para que não se comprometa a impermeabilização do fundo da lagoa nem a estabilidade dos taludes.

A facilidade de acesso das máquinas na lagoa deve ser avaliada, inclusive considerando-se a opção de ruptura parcial dos taludes para posterior reconstrução. Há registros de tratores atolados em lagoas com lodo, motivo pelo qual recomenda-se não acessar o fundo da lagoa enquanto o lodo apresentar consistência pastosa ($20\% < ST < 30\%$).

Raspagem mecanizada e bombeamento do lodo

Quando a lagoa não pode ser desativada por um período de tempo muito longo, uma secagem parcial ao ar, seguida de raspagem mecânica da camada de lodos e posterior bombeamento, pode ser realizada. Esta técnica requer o auxílio de um trator ou dispositivo outro para conduzir o lodo ainda líquido até um ponto mais baixo onde será realizado o bombeamento.

Foi a solução utilizada em Balneário de Camboriú (SC), onde a retirada do lodo das lagoas anaeróbicas foi realizada através de bomba de drenagem de valas acoplada a um motor de um trator. O lodo foi desidratado durante um período curto de tempo antes do início da sua remoção.

A utilização de bombas de deslocamento positivo (êmbolos, diafragmas, lóbulos rotativos, pistões de alta pressão, etc) é recomendada, devido a sua capacidade de imprimir movimento na massa de lodos. Bombas de torque (centrífugas) podem ser utilizadas, porém requerem diluição do lodo muito concentrado, o que resulta em acréscimo de volume de lodo removido.

5.3.2 – Remoção de lodos com manutenção da lagoa em funcionamento

Tubulação de descarga hidráulica do lodo

A tubulação de descarga hidráulica do lodo é o dispositivo mais utilizado por ocasião do projeto de lagoas de estabilização anaeróbicas ou aeradas. Não obstante, trata-se de uma solução bastante criticada pelos setores operacionais das empresas concessionárias do serviço.

Vários são os relatos de entupimento e perda de função deste dispositivo durante o funcionamento da lagoa. O problema ocorre em função da evolução dos teores de sólidos no lodo ao longo do tempo, fazendo com que sua consistência se modifique do líquido para o pastoso ao longo dos anos. Caso o descarte do lodo seja realizado com maior frequência (< 5 anos), o que impediria o adensamento do lodo a teores superiores a 7% no fundo da lagoa, este dispositivo talvez possa ser útil em pequenas ETEs (Gonçalves et al,1998). Para Victoretti (1975), é desnecessária a previsão de dispositivos para descarga do lodo pelo fato das lagoas operarem durante longos períodos sem necessidade de remoção de lodos. Segundo este autor, as unidades deveriam ser projetadas de forma a poderem ser desativadas para a drenagem e remoção do lodo.

Em caso de adoção desta técnica de remoção de lodos de lagoas, recomenda-se a adoção de diâmetros iguais ou superiores a 200 mm (Metcalf e Eddy, 1991).

Remoção através de caminhão limpa fossa

Os caminhões limpa fossa dispõem de um sistema de sucção à vácuo com tubulação flexível que remove o lodo e o transporta para o compartimento de armazenagem dos próprios caminhões. Este sistema vem sendo utilizado no estado do Espírito Santo pela concessionária responsável pela manutenção e operação das estações de tratamento de esgotos (figura 5.2).

É uma solução que apresenta o inconveniente de remover lodo com elevado teor de umidade, uma vez que o bombeamento requer a diluição da camada de lodos em avançado estágio de adensamento. O resultado pode ser uma quantidade muito grande de viagens para transportar o lodo da ETE até o local de disposição e um custo adicional na operação. Entretanto, possui a grande vantagem de promover a remoção e o transporte do lodo na mesma operação. Os equipamentos também podem ser facilmente encontrados e alugados em cidades de médio e grande porte.



Figura 5.2 – Remoção de lodo de lagoa anaeróbia através de caminhão limpa-fossa (Cortesia: CESAN)

Dragagem

O uso de dragas permite a remoção de lodos com teores de ST superiores a 15%, se a raspagem do lodo for realizada por via mecânica. Para lodos com teores de umidades inferiores, este tipo de processo de remoção vê-se comprometido devido a consistência do material. Em testes realizados pela UFES - Universidade Federal do Espírito Santo, lodos com teores superiores a 20% ST foram removidos de lagoas anaeróbias (Gonçalves et al,1998).



Figura 5.3 - Draga fabricada pela empresa Liquid Waste Technology Inc. (E.U.A.) operando em lagoa de estabilização

As dragas também podem ser dotadas de dispositivo desestruturante da camada de lodo, para que a remoção seja realizada através de bombeamento. Nesses casos, o lodo é removido com

teores de umidade maiores do que no caso da raspagem mecânica. A figura 5.3 apresenta uma draga deste tipo, com propulsão a diesel e com possibilidade de controle remoto, fabricada pela empresa Liquid Waste Technology Inc. (E.U.A.) (<http://www.lwtpithog.com>), com capacidade de bombeamento variando em uma faixa de 0 a 1360 m³/h.

A dragagem pode suspender sólidos na saída da lagoa, com o revolvimento da camada de lodo no fundo. Tal fato pode causar uma carga significativa de sólidos na lagoa secundária, quando houver. Outro aspecto importante refere-se à estabilidade do selo impermeabilizante do fundo da lagoa, que pode ser comprometida pela ação de dragagem.

Bombeamento a partir de balsa

O bombeamento do lodo do fundo da lagoa pode ser realizado a partir de conjunto moto-bomba instalado em uma balsa. A utilização de bombas de deslocamento positivo (ênbolos, diafragmas, lóbulos rotativos, pistões de alta pressão, etc) também é recomendada. A propulsão do conjunto moto-bomba pode ser por eletricidade ou combustível. A figura 5.4 ilustra um sistema desta natureza, com dispositivo desestruturante da camada de lodos e podendo ser controlado por controle remoto.

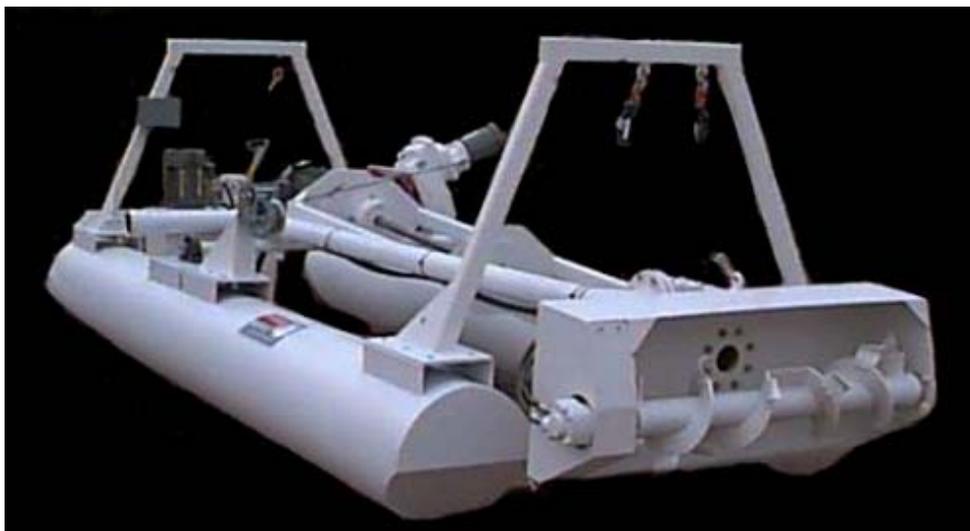


Figura 5.4 - Sistema automatizado de bombeamento sobre balsa (L.W.T Inc., E.U.A.)

A utilização de bombas centrífugas só é viável nos casos em que o lodo ainda possui consistência líquida (teores de ST < 6%) ou nos casos em que o conjunto dispõe de dispositivo para escarificação do lodo de fundo. O lodo removido por bombeamento é encaminhado para fora da lagoa, onde poderá ser transportado ou desidratado no local.

Sistema robotizado

Esta alternativa não é, até o presente momento, utilizada em larga escala no Brasil. Pode ser considerada uma tecnologia promissora na extração do lodo, constituída por um pequeno trator robotizado que desloca-se sobre uma esteira, sendo comandado por controle remoto (figura 5.5).

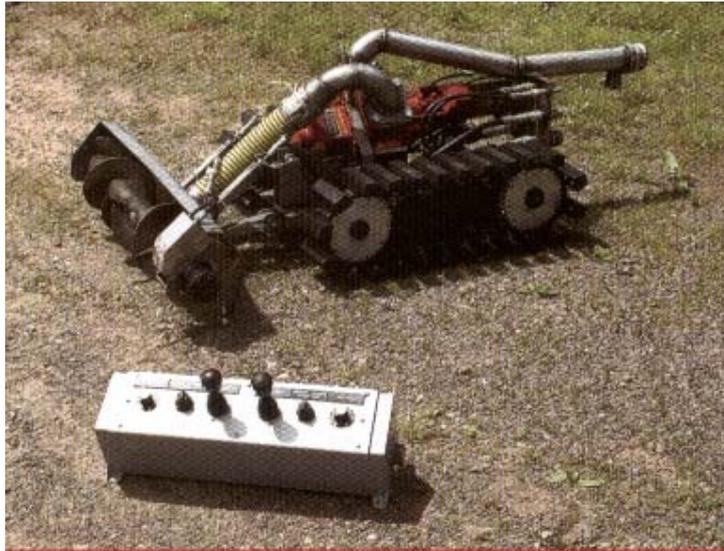


Figura 5.5 – Sistema robotizado para remoção de lodo de lagoas (L.W.T Inc., E.U.A.)

Na parte frontal do trator, a camada de lodos é desestruturada e aspirada, sendo em seguida retirada da lagoa através de bombeamento. Segundo o fabricante, a tecnologia é capaz de remover lodo com altas concentrações de sólidos ($ST > 20\%$), permitindo que a limpeza da lagoa seja realizada em períodos de tempo mais longos. Suas principais desvantagens residem na ausência de experiências brasileiras com o equipamento e o fato de se tratar de um equipamento importado.

5.4 - Vantagens e desvantagens das técnicas apresentadas

As principais vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de remoção de lodo de lagoas citadas anteriormente são resumidas na tabela 5.1. Uma comparação entre as diferentes técnicas consideradas, envolvendo fatores tais como desempenho do processo, facilidade operacional, flexibilidade com relação à disposição final do lodo, quantidade de lodo removido e custo operacional, é apresentada na tabela 5.2. A comparação serve apenas de balizamento inicial, uma vez que as condições específicas de cada lagoa de estabilização podem modificar completamente o rendimento das técnicas em questão.

Tabela 5.1 – Vantagens e desvantagens das técnicas de remoção do lodo de lagoas de estabilização

TÉCNICAS DE REMOÇÃO DO LODO UTILIZADAS COM DESATIVÇÃO DA LAGOA		
TECNOLOGIA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Remoção manual	<ul style="list-style-type: none"> - A remoção da umidade é realizada na própria lagoa; - A limpeza da lagoa é realizada de forma controlada; - Lodo com altos teores de ST diminui o custo com transporte; - Possibilita a remoção quase que completa do lodo; 	<ul style="list-style-type: none"> - A lagoa fica desativada durante um longo período de tempo; - Contato direto dos empregados com o lodo.
Remoção mecânica do lodo (uso de tratores)	<ul style="list-style-type: none"> - A remoção da umidade é realizada <i>in loco</i>; - A limpeza da lagoa é realizada de forma controlada; - Lodo com altos teores de ST diminui o custo com transporte; - Maior rendimento que a remoção manual do lodo - Possibilita a remoção quase que completa do lodo; 	<ul style="list-style-type: none"> - A lagoa fica desativada durante um longo período de tempo; - Possibilidade de demolição de parte do talude p/ acesso das máquinas; - O fundo da lagoa pode ser danificado necessitando de reparos. - Possibilidade do trator atolar no lodo
Raspagem mecanizada e bombeamento	<ul style="list-style-type: none"> - Menor tempo de secagem do lodo na lagoa - Possibilita a remoção quase que completa do lodo; 	<ul style="list-style-type: none"> - Remove lodo ainda muito úmido - Requer acesso de tratores na lagoa
TÉCNICAS DE REMOÇÃO DO LODO UTILIZADAS COM A MANUTENÇÃO DA LAGOA EM FUNCIONAMENTO		
TECNOLOGIA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Sistema de vácuo com caminhão limpa fossa	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade operacional - O equipamento é de fácil disponibilidade; - O lodo é removido e transportado na mesma operação 	<ul style="list-style-type: none"> - Retirada do lodo com maior frequência – requer baixos teores de ST; - Remove lodo úmido devido à mistura com esgoto durante a operação. - Lodo removido deverá exigir desidratação natural ou mecânica;
Tubulação de descarga hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade operacional; - Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> - Entupimento do dispositivo de descarga; - Descarga deve ser realizada c/ maior frequência – baixos teores de ST; - Lodo removido deverá exigir desidratação natural ou mecânica; - Dificuldades no controle da operação de descarga;
Dragagem	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilita a remoção quase que completa do lodo; - O lodo é retirado com elevada concentração de sólidos - A limpeza pode ser realizada com menor frequência 	<ul style="list-style-type: none"> - Lodo removido deverá exigir desidratação natural ou mecânica; - Dificuldades no controle da operação de retirada do lodo; - Custo do equipamento.
Bombeamento a partir de balsa	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade operacional - O equipamento é de fácil disponibilidade; 	<ul style="list-style-type: none"> - Retirada do lodo com maior frequência – requer baixos teores de ST; - Lodo removido deverá exigir desidratação natural ou mecânica; - Dificuldades no controle da operação de retirada do lodo;
Sistema robotizado	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilita a remoção quase que completa do lodo; - Lodo com altos teores de ST diminui o custo com transporte; - Permite limpeza da lagoa com menor frequência,. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo do equipamento. - Disponibilidade do equipamento no Brasil.

Tabela 5.2 – Comparação dos principais fatores de seleção das técnicas de remoção do lodo de lagoas de estabilização

Técnica	Desempenho	Facilidade de operação	Tempo de execução	Volume de lodo	Custo
Remoção manual	* * * *	* *	* * * *	*	* *
Remoção mecânica (uso de tratores)	* * * *	* * *	* * *	*	* *
Raspagem mecanizada e bombeamento	* * *	* *	* * *	* *	* *
Sistema de vácuo com caminhão limpa fossa	*	* * *	* *	* * * *	* * *
Tubulação de descarga hidráulica	*	* * * *	* *	* * *	*
Dragagem	* * *	* *	* *	* * *	* * *
Bombeamento a partir de balsa	* *	* *	* *	* * *	* *
Sistema robotizado	* * * *	*	* *	* *	* * * *

Escala:

* * * * Maior ⇒ ⇒ ⇒ * Menor

DESIDRATAÇÃO DO LODO DE LAGOAS

Márcia Regina Pereira Lima
Ricardo Franci Gonçalves

6.1 – Introdução

Conforme foi discutido no capítulo 5, a técnica utilizada na remoção do lodo da lagoa afeta diretamente as suas características no tocante aos teores de umidade. Nos casos em que esses teores são elevados, o volume de lodo a manusear pode conduzir à necessidade de desaguamento do mesmo. Existe uma relação direta entre o teor de sólidos, o grau de umidade e o volume do lodo. Uma redução dos teores de umidade de 90% (ST = 10%) para 70% (ST = 30%) resulta em uma redução de volume superior a 60% do volume original de lodos, o que pode representar significativa economia nas etapas de transporte e disposição deste material (Metcalf e Eddy, 1991).

6.2 – Remoção da umidade

As técnicas utilizadas na remoção da umidade podem ser classificadas em mecanizadas (centrífugas, prensas desaguadoras, filtros prensa e desidratação térmica) e naturais (lagoas de lodo e leitos de secagem) (WEF, 1996).

A secagem do lodo na própria lagoa é uma opção de baixo custo, que necessita interromper o fluxo de esgoto por um período de tempo relativamente longo (Figura 6.1). Esta possibilidade é viável quando a estação de tratamento foi construída em módulos, permitindo a desativação temporária de forma independente de cada módulo, e quando existe capacidade de tratamento ociosa. A paralisação de unidades é mais difícil quando a lagoa anaeróbia foi construída em módulo único ou quando a carga nominal de projeto da ETE já foi atingida.



Figura 6.1 - Remoção do lodo seco ao ar livre na lagoa anaeróbia da ETE Camburi, Vitória (ES)

Mesmo nos casos em que a desativação de uma lagoa é factível, a operação deve ser planejada com critério e realizada com consentimento prévio dos órgãos de controle ambiental. Uma etapa sensível da operação é o esvaziamento da lagoa que, se realizado de forma abrupta, pode causar importante impacto no corpo receptor (principalmente nos casos das lagoas anaeróbias). Mortandade de peixes, emanação de odores e reclamações por parte da população são alguns problemas que podem advir em consequência.

Um exemplo para dar uma idéia da complexidade de uma operação desta natureza, e do tempo necessário à realização da remoção de lodo de uma lagoa anaeróbia, é apresentado a seguir.

Exemplo 6.1 – Estimativa do tempo necessário para a realização da remoção do lodo de uma lagoa anaeróbia

Após um período de operação ininterrupto de 5 anos, a lagoa anaeróbia descrita no exemplo 3.2, do capítulo 3, deverá ser submetida a uma operação de remoção do lodo nela depositado. Pretende-se remover 90% do lodo estocado, através de uma operação inicial que compreende o esvaziamento da lagoa até a superfície da camada de lodo. A remoção do lodo será realizada no mês de junho, por se tratar daquele que apresenta o menor índice de pluviosidade no ano, na região do Espírito Santo. O volume total de lodo acumulado foi estimado em 1442 m³, segundo o modelo de Saqqar e Pescod (1995). O teor médio de sólidos totais da camada de lodos, determinado através da média realizada sobre amostras coletadas em vários pontos da lagoa, é de 19%. Para efeito de cálculo dos volumes, áreas e alturas, as seguintes características geométricas da lagoa serão consideradas:

- Altura da lâmina líquida na lagoa:	H = 4 m
- Área média da lagoa (na metade de H):	A _m = 1600 m ²
- Inclinação dos taludes:	i _{talude} = 1:2 m/m
- Largura média (na metade de H):	B _m = 40 m
- Comprimento médio (na metade de H):	L _m = 40 m
- Largura no fundo da lagoa:	B _f = 32 m
- Comprimento no fundo da lagoa:	L _f = 32 m
- Volume de lodo acumulado no período considerado:	V = 1442 m ³

Com base nas características geométricas da lagoa, foram determinados os seguintes dados importantes:

- Altura da camada de lodos:	h _L = 1,3 m
- Comprimento e largura médios na camada de lodos:	L _{Lm} = B _{Lm} = 34,6 m
- Área média da camada de lodos:	A _{Lm} = 1197 m ²

O tempo de secagem do lodo será estimado através do balanço hídrico para lagoas de estabilização apresentado por Jordão e Pessoa (1995):

$$Q_a + Q_p = Q_s + Q_i + Q_e \quad [6.1]$$

Onde:

Q_a = Vazão de esgoto afluyente à lagoa (m³/dia)

Q_p = Vazão de precipitação de chuvas no período considerado (m^3/dia)

Q_s = Vazão efluente da lagoa (m^3/dia)

Q_i = Vazão de infiltração no solo (m^3/dia)

Q_e = Vazão de evaporação no período considerado (m^3/dia)

Considerando-se que a lagoa será desativada para secagem do lodo, as vazões Q_a e Q_s são nulas no período. Portanto, a vazão de secagem do lodo será dada pela expressão:

$$Q_{sec} = Q_i + Q_e - Q_p \quad [6.2]$$

Onde:

Q_{sec} = Vazão de secagem do lodo (m^3/dia)

a) Cálculo da vazão de precipitação

A vazão de precipitação de chuvas depende do índice de pluviosidade relativo ao mês (ou meses) em que será realizada a operação. Por motivos óbvios, recomenda-se que esta seja realizada no período mais seco do ano.

$$Q_p = t_p \times A_{Lm} \quad [6.3]$$

Onde:

t_p = Índice pluviométrico do mês de junho de 1998 – Vitória (ES) = 5,3 mm/mês
= $5,3 \times 10^{-3} m^3/m^2.mês$

Então: $Q_p = (5,3 \times 10^{-3} \times 1197) / 30 = 0,2 m^3/dia$

b) Cálculo da vazão de infiltração

A vazão de infiltração depende da taxa de infiltração do líquido no fundo e nos taludes da lagoa. A taxa de infiltração pode variar muito de lagoa para lagoa, dependendo da qualidade da impermeabilização realizada. Entretanto, tendo em vista que a lagoa do exemplo em questão está em operação por um longo período, e que o próprio lodo auxilia na colmatação dos poros do solo, adotou-se uma taxa de infiltração (t_i) correspondente a 10% da taxa relativa a solos com baixíssima permeabilidade (US EPA, 1981).

$$Q_i = t_i \times A_{Lm} \quad [6.4]$$

Onde:

t_i = Taxa de infiltração (estimada em 10% do valor para solos com infiltração muito lenta = 0,015 cm/h = $1,5 \times 10^{-4} m^3/m^2.dia$)

Então: $Q_i = 1,5 \times 10^{-4} \times 1197 \times 24 = 4.3 m^3/dia$

c) Cálculo da vazão de evaporação

A vazão de evaporação depende da taxa de evaporação da água presente no lodo, que não é a mesma da água livre na natureza. Devido a dificuldade de se obter este dado na literatura

especializada, a taxa de evaporação adotada foi calculada a partir de dados publicados por Catunda et al. (1998). Este grupo pesquisou a desidratação de lodos de reatores UASB em leitos de secagem na região de Campina Grande - Paraíba.

$$Q_e = t_e \times A_{Lm} \quad [6.5]$$

Onde:

t_e = Taxa de evaporação para lodos com 19%ST até atingir 30%ST (Catunda et al., 1998)
 $= 7,2 \text{ Kg de água} / \text{m}^2 \cdot \text{dia} = 7,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$

Então: $Q_e = 7,2 \times 10^{-3} \times 1197 = 8,6 \text{ m}^3/\text{dia}$

d) Cálculo da vazão de secagem do lodo

Da equação 6.2, tem-se : $Q_{\text{sec}} = Q_i + Q_e - Q_p = 4,3 + 8,6 - 0,2 = 12,7 \text{ m}^3/\text{dia}$

e) Cálculo da massa e do volume de água a ser removida do lodo

$$M_{\text{rem}} = M_{19} - M_{30} \quad [6.6]$$

Onde

M_{rem} = Massa de água a ser removida do lodo (ton)

M_{19} = Massa de lodo com ST = 19% (ton)

M_{30} = Massa de lodo com ST = 30% (ton)

$M_{19} = V_L \times \rho_L = 1442 \times 1,02 \text{ (tonST/m}^3) = 1471 \text{ (ton)}$

$M_{30} = 932 \text{ kg}$

$M_{\text{rem}} = 1471 - 932 = 539 \text{ ton de água}$

$V_{\text{rem}} = \text{Volume de água a ser removida do lodo} = 539 \text{ m}^3$

e) Cálculo do tempo de secagem do lodo (de ST = 19% para ST = 30%)

$$T_s = V_{\text{rem}} / Q_{\text{sec}} \quad [6.7]$$

$T_s = 539 / 12,7 = 42,5 \text{ dias}$

Considerando que a operação de remoção do lodo é composta pelo tempo de esvaziamento da lagoa, pela secagem do lodo e pela remoção deste, pode se estimar que o tempo total de desativação da lagoa será praticamente igual ao dobro do tempo para secagem. Tal fato resulta em uma estimativa de tempo total de 3 meses de paralisação do funcionamento da lagoa.

O exemplo apresentado baseou-se em dados analisados para as condições climáticas específicas de Campina Grande (PB), que são bastante favoráveis a esta prática (Catunda, 1998). Em que pesem as simplificações realizadas no modelo de cálculo, o resultado final é bastante coerente com as observações realizadas por Da-Rin et al. (1988). Esses autores observaram que para a remoção do lodo da lagoa facultativa primária da Cidade de Deus - Rio de Janeiro, desativada para secagem, foi necessário um período de 4 meses para que o lodo atingisse teores de sólidos que permitissem os operários caminharem sobre a camada.

Outra opção bastante interessante a ser considerada é a remoção do lodo das lagoas com maior frequência e a utilização de leitos de secagem na própria ETE. Essa possibilidade considera duas modificações dos conceitos operacionais vigentes para lagoas de estabilização:

1. Remoção com maior frequência do lodo da lagoa – Esta medida resultaria em períodos de estocagem menores, que não permitiriam o adensamento do lodo a teores de ST superiores a 8%. Lodos pouco adensados viabilizam a utilização de técnicas de remoção mais simples e baratas, tais como descarga hidráulica ou a utilização de bombas centrífugas, sem desativação da lagoa.
2. Construção de leitos de secagem em ETEs com lagoas – Esta medida é uma decorrência natural da primeira, objetivando a redução do volume de lodo a ser transportado. O lodo, após secagem, pode ser retirado da ETE com teores de ST superiores a 40% e transportado para a disposição final.

A frequência de remoção de lodo, geralmente estimada em 1 para cada 5 anos, pode ser aumentada para 1 a cada 2 anos, ou 1 por ano, sem acréscimo significativo na demanda operacional da estação. Estudos realizados pela Universidade Federal do Espírito Santo confirmam que os leitos de secagem podem integrar de maneira muito interessante a configuração de ETEs com lagoas de estabilização.

6.3 – Leitos de secagem

Trata-se de uma das técnicas mais antigas utilizadas na separação sólido-líquido do lodo, tendo um custo de construção bastante reduzido se comparado com as opções mecânicas de desidratação (Van Haandel e Lettinga, 1994). No Brasil a NB 570/1990 – Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário – ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas regulamenta os projetos de leito de secagem. Caracterizam-se por um tanque, geralmente, retangular com paredes de alvenaria ou concreto e fundo de concreto. No interior do tanque são colocados dispositivos para possibilitar a drenagem da água presente no lodo. São eles: soleira drenante, camada suporte e sistema de drenagem (figura 6.2) (NB 570, 1990).

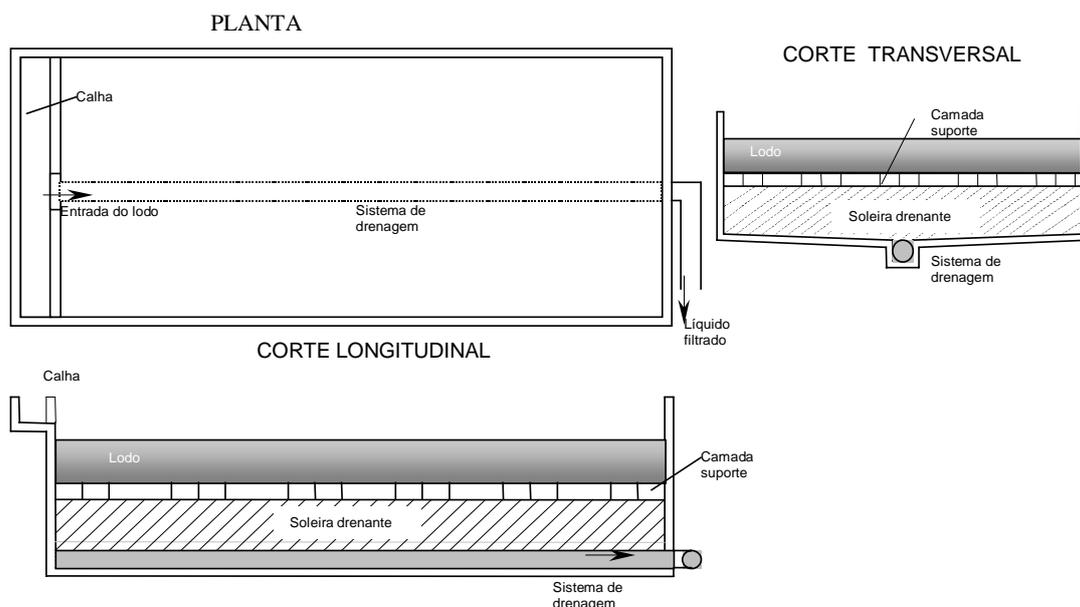


Figura 6.2- Esquema de um leito de secagem

Soleira drenante

Permite que o líquido presente no lodo percole por camadas sucessivas de areia e pedregulho com diferentes granulometrias com, aproximadamente, 0,50m de espessura. As camadas são dispostas com grãos de tamanho crescente de cima para baixo, variando de 0,3mm na parte superior até 20mm na parte inferior (figura 6.3).

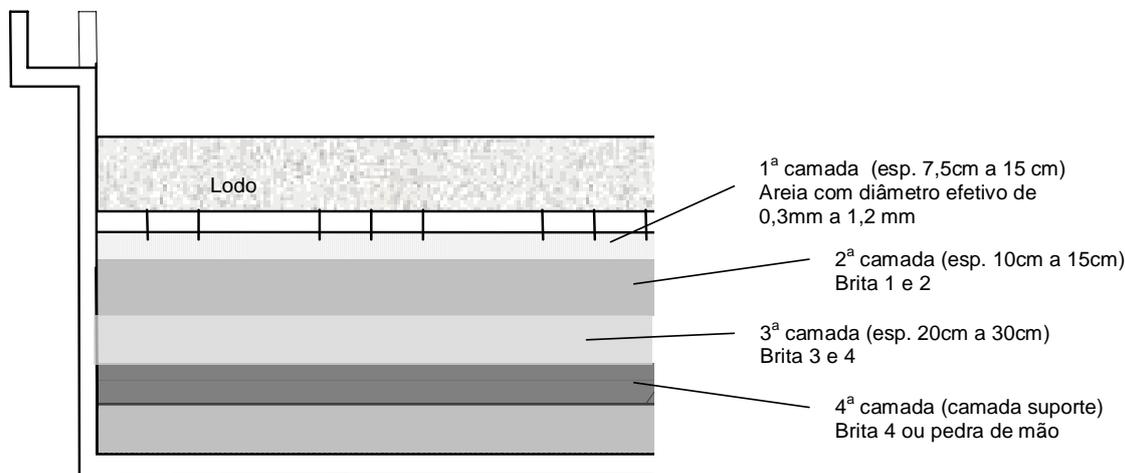


Figura 6.3- Detalhe da soleira drenante

Camada suporte

Composta de tijolos recozidos ou outros elementos de material resistente à operação de remoção do lodo seco, dispostos normalmente, como mostra a figura 6.4 e assentados com areia grossa com juntas de 2 a 3cm. Tem a finalidade de possibilitar uma melhor distribuição do lodo, impedir a colmatação (entupimento dos poros da superfície da soleira drenante) e garantir que a retirada do lodo desidratado seja realizada sem o revolvimento das camadas superficiais da soleira drenante.

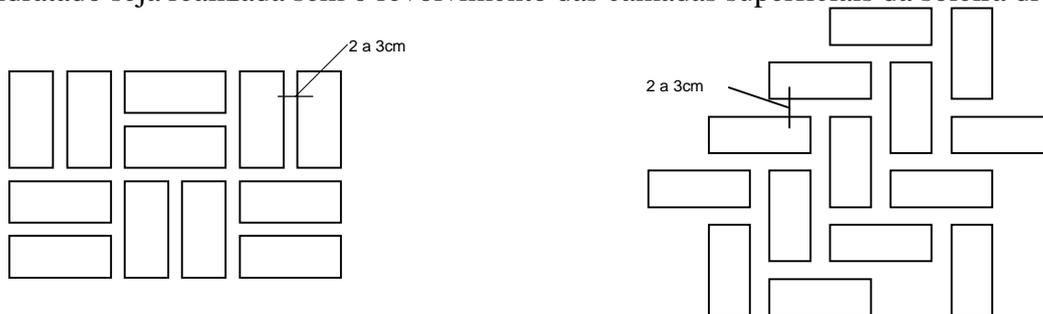


Figura 6.4 - Detalhe da disposição dos tijolos que compõem a camada suporte

Sistema de Drenagem

É constituído de tubos assentados com juntas abertas ou perfurados com diâmetro mínimo de 100 mm colocados no fundo do tanque que recolhem todo o líquido percolado na soleira drenante. Os drenos não deverão estar com mais de 3,00m de distância entre si. O fundo do leito de secagem deve ser plano e impermeável, com inclinação mínima de 1% no sentido do coletor principal de escoamento do líquido filtrado. Pode-se instalar, também, o sistema de drenagem fora do tanque para facilitar a manutenção das canalizações. Neste caso, o fundo do tanque deverá ser bastante

inclinado para possibilitar o escoamento do líquido através de orifícios feitos ao longo da parede lateral do tanque.

6.4 – Aspectos gerais da desidratação de lodos em leitos de secagem

O lodo quando bem digerido (com pequena fração de sólidos biodegradáveis), submetido a secagem natural, apresenta características satisfatórias para que a desidratação ocorra num período mais curto de tempo (Jordão e Pessôa, 1995). Esta condição é apresentada pelo lodo gerado em lagoas, que é suficientemente estável para promover a separação sólido-líquido sem necessidade de tratamento prévio.

Os leitos podem ser instalados ao ar livre ou cobertos para proteger contra a influência das chuvas e das geadas. A secagem é realizada em batelada com o rodízio de vários leitos de secagem (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Segundo Hess (1973), o lodo digerido por estar sujeito a uma pressão hidrostática elevada, seja no decantador ou no digestor, apresenta água intersticial saturada de gases como CO₂ e metano. Quando levado a leitos de secagem para desidratação, pode flotar, permitindo que haja liquefação, em função da diferença do peso específico do lodo digerido e da água. Sendo assim, durante grande parte do período de desidratação a água percola com facilidade no leito filtrante, até que o lodo se deposite e se transforme numa massa densa e pastosa. A partir daí, a percolação é praticamente interrompida e a secagem é realizada por evaporação natural da água.

Imhoff (1966) considera que, a partir das características finais do lodo seco, pode ser avaliado o nível de estabilização do lodo submetido à desidratação, conforme apresentado abaixo:

- Lodo seco com fendilhamento escasso e fino, indica lodo bem digerido e com baixo teor de água;
- Fendas numerosas, de largura mediana, indicam lodo digerido com elevado teor de água;
- Fendas em pequena quantidade e de grande largura, indicam lodo mal digerido, pegajoso, requerendo longos períodos de tempo para secagem.

Além das características físicas do lodo, as condições climáticas também influenciam o comportamento deste tipo de processo. A secagem natural do lodo pode promover, em determinadas situações, uma remoção considerável de organismos patogênicos devido a exposição prolongada do material ao sol, que eleva a temperatura do lodo (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Após atingir teores de sólidos em torno de 30%, o lodo deve ser retirado do leito de secagem tão rápido quanto possível, para não dificultar sua remoção posterior. Além disso, a permanência prolongada do lodo nos leitos promove o crescimento de vegetação que, além de mostrar indícios de mal planejamento de operação da ETE, atrapalha de forma considerável sua retirada.

6.5 – Dimensionamento do leito de secagem

O exemplo a seguir apresenta o dimensionamento de um leito de secagem com base em dados obtidos nas pesquisas realizadas pelo DHS – CT – UFES com lodo de lagoa anaeróbia.

Exemplo 6.2 – Determinação da área de leito de secagem necessária para a desidratação de lodo de lagoa anaeróbia

Uma lagoa anaeróbia com capacidade de tratamento para 20.000 habitantes acumulou durante 2 anos de funcionamento ininterruptos 723 m³ de lodo. Pretende-se realizar a remoção de 80% desse volume de lodo, para posterior desidratação em um leito de secagem a ser construído na própria ETE. Pede-se calcular a área de leitos de secagem necessária para desidratar o lodo que foi removido com teor de umidade de 92% até atingir umidade final de 73%.

$$S_{LS} = M_{\text{lodo}} / (P_{LS} \times T) \quad [6.8]$$

Onde:

- S_{LS} = Área total do leito de secagem (m²)
- M_{lodo} = Massa de lodo acumulado em 2 anos (KgST)
- P_{LS} = Produtividade do leito de secagem (KgST/m².dia)
- T = Ciclo de secagem (dias)

a) Cálculo da massa de lodo a ser removida

$$M_{\text{lodo}} = V_{\text{lodo}} \times TS_i \times \rho_L \quad [6.9]$$

Onde:

- V_{lodo} = volume do lodo a ser removido = 723 x 0,8 = 579 m³
- TS_i = teor de sólidos inicial do lodo = 8% (umidade = 92%)
- ρ_L = densidade do lodo = 1,02 ton/m³

Então: $M_{\text{lodo}} = 579 \times 0,08 \times 1,02 = 47\text{tonST} = 47 \times 10^3\text{KgST}$

b) Produtividade

Este valor estabelece a relação entre a taxa de sólidos aplicada e o período de secagem para uma determinada umidade, apresentada como a razão entre a massa de ST obtida por unidade de área e por unidade de tempo (figura 6.5). As curvas apresentadas na figura 6.5 foram geradas a partir de análise experimental com lodo da lagoa anaeróbia de Eldorado, cujas características encontram-se descritas no capítulo 3.

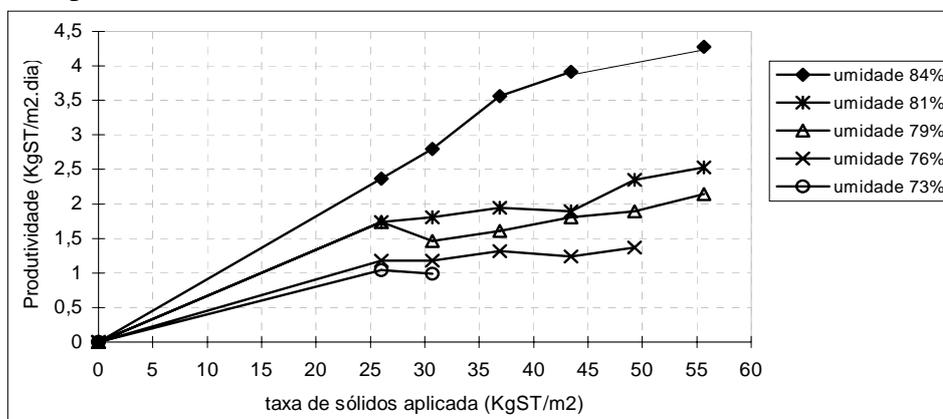


Figura 6.5 – Produtividade dos leitos de secagem em função da taxa de sólidos aplicadas

A taxa de sólidos a ser aplicada é função basicamente das condições operacionais que se deseja para o leito de secagem, ou seja, umidade final da torta de lodo, ciclo de secagem do lodo e altura da camada de lodo a ser aplicada. A NB-570/1990, citada anteriormente, recomenda uma taxa de 15KgST/m². Entretanto, em testes experimentais realizados com taxas superiores à recomendada pela norma, os resultados foram satisfatórios para lodo gerado em reatores tipo lagoa.

Considerando neste exemplo uma taxa de sólidos a ser aplicada de $t_{s_{\text{lodo}}} = 30 \text{ KgST/m}^2$ e umidade final a ser atingida com a desidratação de 73%, a produtividade será (figura 6.5):

$$P_{LS} = 1,0 \text{ KgST/m}^2 \cdot \text{dia}$$

c) Cálculo do ciclo de secagem

O tempo necessário para promover a desidratação (ciclo de secagem) é estabelecido em função da taxa de lodo aplicada e da produtividade do leito para as considerações apresentadas.

$$T = t_{s_{\text{lodo}}} / P_{LS} \quad [6.10]$$

$$T = 30 / 1 = 30 \text{ dias}$$

d) Cálculo da área de leito de secagem [equação 6.8]

$$S_{LS} = 47 \times 10^3 / (1,0 \times 30) = 1567 \text{ m}^2$$

Para as condições estabelecidas no exemplo, a altura de lodo a ser aplicada nos leitos será igual a:

$$H_{\text{lodo}} = V_{\text{lodo}} / S_{LS} \quad [6.11]$$

$$H_{\text{lodo}} = 579 / 1.567 = 0,37 \text{ m}$$

Neste caso, pode-se considerar, entre outras, as seguintes alternativas de distribuição de área dos leitos:

- 6 leitos de 10 x 30m
- 5 leitos de 12 x 30m
- 3 leitos de 15 x 30m
- 7 leitos de 10 x 25m

Por tratar-se de lodo de lagoa de estabilização, nada impede que este lodo fique no leito por longos períodos chegando a umidades ainda menores, haja visto os prazos dilatados para a descarga de lodo da lagoa.

Caso a técnica de remoção do lodo da lagoa a ser adotada possibilite a retirada em duas etapas, outra alternativa bastante viável seria retirar inicialmente parte do lodo para desidratar, e após o ciclo de secagem adotado, remover o restante do lodo da lagoa. Esta prática reduziria bastante a

área requerida para o leito de secagem. No exemplo acima, caso fosse retirado metade do lodo da lagoa a área reduziria, também, à metade com um ciclo de secagem total de 60 dias.

Na análise de produtividade apresentada na figura 6.4 não foi considerado o efeito da chuva na remoção da umidade do lodo. Para considerar tal fator, deve-se avaliar qual a taxa média de remoção de água no leito de secagem. Dando continuidade ao exemplo 6.2, se P_{LS} é a produtividade do leito e w_i e w_f representam as umidades inicial e final do lodo, então pode-se dizer que a taxa média de remoção de água no leito é definida como:

$$Ta = Ta_i - Ta_f \quad [6.12]$$

Onde:

Ta_i = Taxa de aplicação de água = $P_{LS} \times w_i / (1-w_i)$

Ta_f = Taxa de retirada de água = $P_{LS} \times w_f / (1-w_f)$

Então:

$Ta = P_{LS} \{ [w_i / (1-w_i)] - [w_f / (1-w_f)] \}$

$Ta = 1,0 \{ [0,92 / (1-0,92)] - [0,73 / (1-0,73)] \}$

$Ta = 8,80 \text{ l/m}^2 \cdot \text{dia}$ $Ta = 8,80 \text{ mm/dia}$; aproximadamente $Ta = 3.212 \text{ mm/ano}$

Supondo que a precipitação pluviométrica no período foi de 1.254mm/ano (ano de 1998, Vitória - ES), a relação entre a taxa de remoção de água e a precipitação acumulada no ano é em torno de 2,6. Logo, neste caso, para levar em consideração as chuvas, a área do leito de secagem deverá ser aumentada em 1/2,6, ou seja, 38%. Equivalentemente, vale reduzir a produtividade determinada em 38%. Sendo assim, a área final do leito de secagem será aproximadamente $S_{LS} = 2.163 \text{ m}^2$.

6.6 – Detalhes operacionais

A simplicidade de operação e manutenção dos leitos de secagem faz com que as soluções para possíveis problemas operacionais detectados sejam também bastante simples. A tabela 6.1 apresenta algumas soluções operacionais para tratar dificuldades na manutenção de leitos de secagem.

Tabela 6.1 – Principais soluções operacionais para a manutenção dos leitos de secagem

Problema detectado	Possível causa do problema	Checar e monitorar	Solução
Ciclo de desidratação elevado	Altura excessiva de lodo aplicado	A altura de lodo a ser aplicado de forma satisfatória é de aproximadamente 20cm	Quando o lodo estiver seco, removê-lo e limpar bem o leito de secagem. Aplicar uma pequena altura de lodo e medir o quanto diminuiu por um período de 3 dias. Na próxima aplicação lançar o dobro da diminuição verificada no 3º dia após a 1ª aplicação.
	Aplicação do lodo com limpeza inadequada do leito de secagem	Observar a condição de limpeza (manutenção) do leito de secagem	Remover o lodo após a secagem. Limpar bem a superfície do leito e recolocar de 1,2 – 2,5cm de areia limpa, se necessário
	Sistema de drenagem obstruído ou tubulação quebrada		Efetuar uma limpeza contra-corrente lentamente do leito de secagem conectando uma fonte de água limpa à tubulação de drenagem de fundo. Checar a areia do leito e substituir o meio filtrante quando for necessário. Drenar totalmente o leito para que não ocorra congelamento nas estações frias.
	Leito sub-dimensionado	Verificar o efeito da aplicação de polímeros	A dose típica é de 2,3 – 13,6 Kg polímero catiónico/ton sólidos seco. Resulta num aumento significativo da taxa de desidratação
	Condições climáticas da região	Temperatura, precipitação	Proteger o leito contra as intempéries
Tubulação de alimentação do leito de secagem bloqueada	Acúmulo de sólidos ou areia na tubulação		Abrir totalmente as válvulas no início da aplicação do lodo para limpeza da tubulação. Aplicar jatos de água, se necessário
Lodo muito fino sendo purgado do digestor	Problemas de separação de fase no digestor com remoção de água e não do lodo		Redução da taxa (velocidade) de retirada do lodo do digestor
Aparecimento de mosca na camada de lodo			Quebrar (romper) a crosta de lodo e usar larvicida tal como borato de cálcio ou matar as moscas adultas com inseticida adequado
Odor quando o lodo é aplicado	Inadequada digestão do lodo	Processo de operação e digestão	Estabelecer correta operação do processo de digestão
Surgimento de torrões e pó do lodo desidratado	Excesso de secagem	Umidade conseguida	Remover o lodo do leito quando conseguir umidade de 40 a 60%

Fonte: WEF(1996)

CAPÍTULO 7

HIGIENIZAÇÃO DE LODOS DE ESGOTOS

Fabiana Reinis Franca Passamani
Ricardo Franci Gonçalves

7.1 – Processos de higienização de lodos de esgotos

A higienização tem como principal objetivo eliminar ou reduzir a densidade de microrganismos patogênicos. Trata-se de uma etapa de tratamento do lodo que assume grande importância, se a alternativa para disposição final do produto for a reciclagem agrícola. Essa remoção de patógenos pode ser realizada através de processos químicos, físicos ou biológicos, buscando assegurar a qualidade sanitária do lodo a ser utilizado.

Tendo em vista os padrões de qualidade de lodos para reciclagem na agricultura, os processos de tratamento do lodo podem ser classificados como processos para redução avançada e para redução significativa de patógenos, de acordo com a capacidade de remoção destes microrganismos. Os processos de tratamento avançados reduzem ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* spp e vírus entéricos a níveis detectáveis e produzem um lodo Classe A, segundo a definição da norma dos E.U.A. O lodo produzido pelos processos de redução significativa, são denominados Classe B.

A tabela 1 apresenta as diferenças de classificação dos diferentes processos de higienização nas legislações dos EUA e da Grã-Bretanha. De uma maneira geral, a legislação dos E.U.A. é mais completa e flexível no enquadramento dos processos. Como exemplo, pode ser citada a digestão aeróbia, que não é reconhecida na Grã-Bretanha como um processo para redução significativa de patógenos, mas assim é recomendada nos E.U.A. mesmo para temperaturas do lodo da ordem de 15 °C. Também não são reconhecidos pela legislação britânica como processos para redução avançada de patógenos a secagem e o tratamento térmico a 180 °C.

7.2.1.- Calagem

A calagem é um dos processos mais eficientes para a eliminação dos patógenos no lodo, além de atuar na estabilização e na desodorização do mesmo. Definido como um processo de estabilização e desinfecção química, a calagem resulta da adição e mistura ao lodo de cal, para alcalinização brusca do meio, elevando o pH em níveis ligeiramente superiores a 12, o que torna o meio impróprio à sobrevivência e desenvolvimento dos patógenos presentes no lodo (EPA, 1984). As reações envolvidas nestes processos vão desde a neutralização dos ácidos à precipitação de elementos indesejáveis sob a forma de sais insolúveis (Gonçalves, 1998).

Segundo o EPA (1992) a obtenção de um pH elevado não é tão importante quanto a manutenção do mesmo acima de um valor igual ou superior a 12 durante um certo período de tempo. A quantidade de cal a ser adicionada ao lodo deve ser suficiente para promover um grau de estabilização que permita uma armazenagem por um período de tempo de aproximadamente 14 dias. Na cal virgem os parâmetros determinantes da eficiência da calagem são: o aumento do pH e da temperatura (Thomaz Soccol 1998), e, para cal hidratada somente o efeito do aumento do

pH. A calagem contribui ainda para desidratação do lodo e é tido como alternativa simples e de custo relativamente baixo (Andreoli, 1997).

Tabela 7.1 – Processos de higienização do lodo.

Processos	EUA	Grã-Bretanha
Processos para redução significativa de patógenos		
Digestão aeróbia	40 dias a 20 °C a 60 dias a 15 °C	Não reconhecida
Leitos de secagem, desidratação e estocagem	3 meses (ou 2 meses acima de 0 °C)	3 meses, caso digerido anaerobicamente
Compostagem	≥ 40 °C por 15 dias (T ≥ 55 °C por 4 h)	≥ 40 °C por 15 dias (T ≥ 55 °C por 4 h)
Digestão anaeróbia	$\theta_c = 15$ d, 35 – 55 °C ou 60 d / 20 °C	$\theta_c = 12$ d / 35 ± 3 °C ou 20 d / 25 ± 3 °C, ambos seguidos de digestão secundária com $\theta_c = 14$ d
Estocagem na forma líquida	Não reconhecida	3 meses
Processos para redução avançada de patógenos		
Compostagem	Reatores confinados 55 °C com $\theta_c = 3$ d; Leiras 55 °C com $\theta_c = 15$ d	≥ 4 °C / 5 dias (T ≥ 55 °C por 4 h)
Secagem	80 °C em biossólidos ou gás de exaustão	Não reconhecida
Tratamento térmico	180 °C por 30 min	Não reconhecida
Digestão aeróbia termofílica	$\theta_c = 15$ dias a 55 °C	$\theta_c = 7$ dias, com T ≥ 55 °C por 4 h
Pasteurização	T = 70 °C por 30 min	T = 70 °C por 30 min ou 55 °C por 4 h
Estabilização com cal	pH = 12 por 2 h	pH ≥ 12 por 2 h

Fonte: Hall (1998)

Uma das desvantagens da higienização com cal, comparado com outros processos, é que não há redução na massa do lodo ao final do tratamento. Pelo contrário, há um incremento nesta massa, devido a adição da cal (Lue-Hing et al. 1992). Além destes fatores, ocorre ainda um aumento nos custos de disposição final, devido, principalmente, ao transporte deste material.

A utilização da cal, virgem (CaO) ou hidratada Ca(OH)₂, como um processo para redução de microrganismos patogênicos no lodo vem sendo utilizada a milhares de anos e tem comprovada eficiência nesta remoção.

Em estudos realizados pela Universidade Federal do Espírito Santo, o processo de desinfecção com cal hidratada foi responsável pela manutenção do pH em níveis superiores a 12,5 e este valor variou em função do tempo de estocagem e da concentração da cal utilizada. O recrescimento bacteriano foi acompanhado do decaimento do pH, conforme apresentado na figura 7.1. Na cal virgem não foi observado recrescimento de coliformes fecais, demonstrando que a combinação do pH e da temperatura foi determinante para a eficiência deste processo de higienização (figura 7.2). Em relação aos ovos de helmintos foi observado, que 24 horas de

contato com a cal, tanto virgem como hidratada foram suficientes para inviabilizar 100% dos ovos.

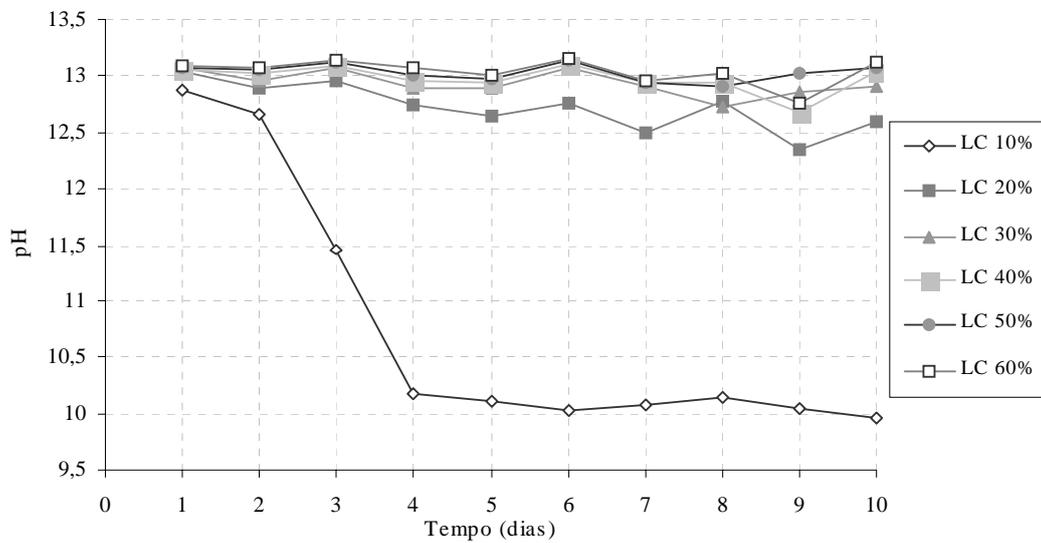


Figura 7.1- Variação do pH no lodo bruto e tratado com cal hidratada durante os dez dias consecutivos a calagem

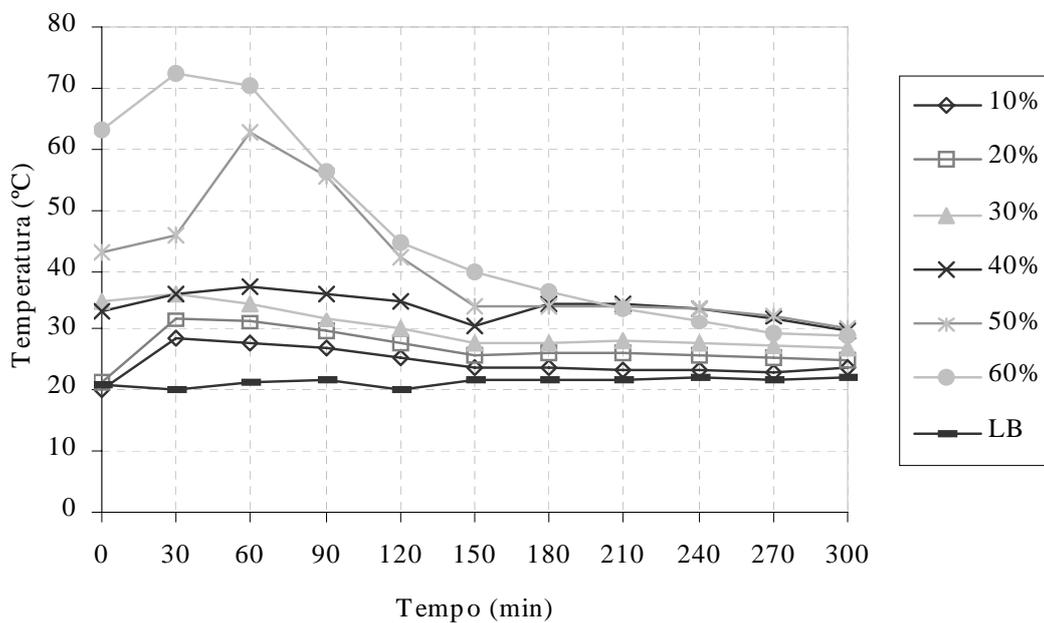


Figura 7.2 – Variação da temperatura no lodo bruto e tratado com cal virgem nas diferentes dosagens

7.1.2. Pasteurização

É um processo físico de elevação da temperatura e conseqüente diminuição da concentração de patógenos. Muito utilizado na Europa e na América do Norte, baseia-se no fato de que vírus,

helmintos, protozoários e bactérias patogênicas são inteiramente destruídos quando o lodo de esgoto é mantido a uma temperatura de 70 °C durante um intervalo de tempo de 30 minutos (EPA, 1984).

Das alternativas de desinfecção, a pasteurização vem se mostrando como um processo bastante promissor, pois é responsável pela redução avançada de microrganismos patogênicos, como citado anteriormente, produzindo um lodo do tipo A. Entretanto, este processo pode até agravar o problema de odor. A temperatura elimina os patógenos e enquanto o lodo estiver seco o odor está controlado. Mas uma vez que o lodo se rehidrata, a biodegradação recomeça e o problema de odor reaparece.

O experimento de pasteurização, realizado pela Universidade Federal do Espírito Santo, utilizando o lodo de um reator anaeróbico (UASB) permitiu avaliar o desempenho deste processo de higienização no tocante a inviabilização dos ovos de helmintos e a eliminação de coliformes fecais. Além disso, foi observado a importância de garantir que a temperatura do lodo esteja a 70°C e se mantenha nesta temperatura por um período de 30 minutos.

Os resultados obtidos demonstraram que este processo foi responsável pela redução em 100% da viabilidade dos ovos de helmintos e pela eliminação dos coliformes fecais, não sendo observado o recrescimento destes indicadores nos cinco dias consecutivos a pasteurização. Outro fato observado foi que os diferentes teores de ST (15%, 20%, 25% e 30%) no lodo pasteurizado não influenciaram na higienização do mesmo (figura 7.3). Deve ser ressaltado que ocorreu a emissão de compostos odorantes um dia após ao tratamento térmico.

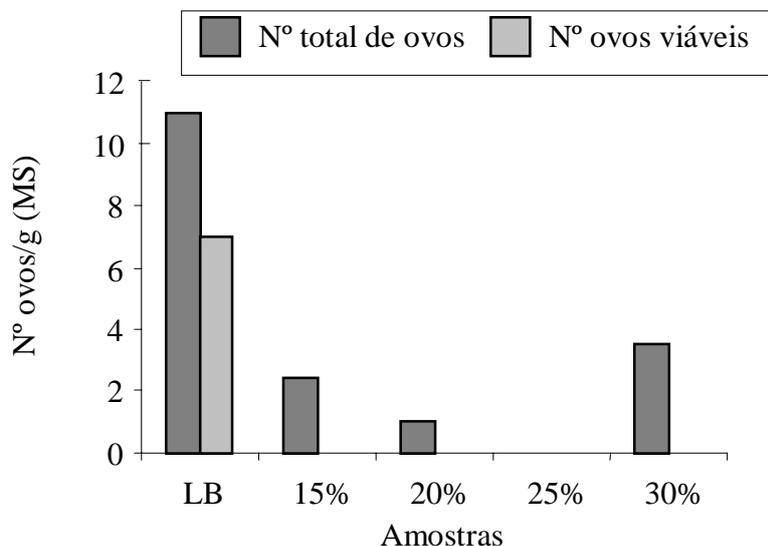


Figura 7.3 - Contagem e viabilidade de ovos de helmintos no lodo bruto e pasteurizado com diferentes teores de sólidos totais.

7.2.3 – Compostagem

A compostagem é um processo biológico onde uma mistura inicial de resíduos sofre a ação de vários grupos de microrganismos. Durante o processo de biodegradação da matéria orgânica a temperatura se eleva naturalmente chegando a 60-65°C nos primeiros dias do processo,

temperatura esta suficiente para inviabilizar ou reduzir os patógenos presentes no lodo (Bley, 1998).

Para a realização do processo de compostagem o lodo deve ser misturado a resíduos orgânicos, tanto vegetais como animais (palha, resíduo de podas de árvores triturados, esterco de galinha, capim). Esta técnica é muito utilizada para se obter a estabilização da matéria orgânica, de uma forma bem rápida e eficiente, pois este processo promove a mineralização da matéria orgânica em substâncias estabilizadas.

De acordo com a literatura, a relação tempo/temperatura é de extrema importância para que o processo seja eficiente. Alguns autores recomendam como valores ideais para o processo de compostagem, 55 – 60°C para temperatura e cerca de 60% para teor de umidade.

A compostagem pode ser realizada em pilhas ou leiras, mantidas em pátios a céu aberto ou em recintos fechados, que devem ser removidas periodicamente quer seja por um processo manual ou mecânica, a fim de se produzir a aeração das camadas inferiores, mantendo o controle de temperatura e umidade, condições estas importantes para melhor aproveitamento do processo (Bley, 1998).

Estudo realizado pela Universidade Federal do Espírito Santo, no âmbito do PROSAB 1, apresentaram resultados de ensaios de compostagem por aeração forçada positiva de lodo primário, esterco de galinha e lodo calado misturados com resíduos agrícolas. Tais processos demonstraram eficiência na produção de compostos orgânicos para utilização na agricultura, em relação aos valores obtidos de pH, relação C/N e macro e micronutrientes.

CAPÍTULO 8

RECICLAGEM AGRÍCOLA DO LODO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Aureliano Nogueira da Costa
Celson Rodrigues
Claudia Rodrigues Teles
Bruno Krohling

8.1 - Disposição do lodo na agricultura

Dentre as alternativas para a disposição final do lodo de esgoto no Estado a reciclagem agrícola vem sendo utilizada com sucesso em diversas culturas, em substituição à adubação química. Esse fato é atribuído à constituição do lodo que além dos benefícios como fonte de matéria orgânica também é fonte de nutrientes, principalmente em nitrogênio e fósforo e também pela sua constituição física, que confere a sua importante função como condicionador de solo.

8.2 - Potencial do lodo para uso na agricultura

A reutilização na agricultura surge como uma opção interessante, apresentando inúmeras vantagens, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. O lodo pode ser utilizado na forma de composto orgânico, na forma bruta ou higienizado com cal e os critérios de seleção para o uso são definidos em função das características do lodo, do tipo de solo e da cultura.

As pesquisas realizadas pela Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Espírito Santo e pela Empresa Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (EMCAPER), no âmbito do núcleo temático nº 4 do Ed. 01/96 - PROSAB / FINEP confirmam a viabilidade da transformação deste material em um importante insumo agrícola, respeitando-se os rigorosos critérios agrônômicos, sanitários e ambientais.

O lodo de esgoto é uma excelente fonte de matéria orgânica, e normalmente apresenta maior teor de nitrogênio em base de peso seco do que o esterco de bovinos e aves. A principal função do lodo com fonte de matéria orgânica é atribuída aos benefícios que apresenta quando da sua decomposição no solo formando o húmus, que apresenta os benefícios tais como solubilização de nutrientes; alta capacidade de troca catiônica (Ca, Mg, K, Na, H e NH₄), fornecimento lento de fósforo, nitrogênio, enxofre e micronutrientes, aumenta a capacidade de retenção de umidade no solo e melhora a estrutura e capacidade tampão do solo tornando-o mais resistente às ações da erosão.

Desse modo, a adubação orgânica favorece a formação de grânulos que tornarão o solo poroso e permeável, facilitando a absorção e a retenção de água e nutrientes. Por outro lado, os solos

arenosos, que são bastante porosos e soltos, de fácil absorção de ar e água, são pouco resistentes e não apresentam capacidade de retenção de água e nutrientes minerais mas, a aplicação do lodo como fonte de matéria orgânica favorece a sua firmeza, fertilidade e resistência a lixiviação.

8.3 - Pesquisas com o uso de lodo na agricultura no Estado do Espírito Santo

8.3.1 - Compostagem

O uso do lodo na produção de composto orgânico na agricultura tem sido estudado como forma de disposição do lodo na agricultura. A compostagem utilizando lodo primário da Estação de Tratamento de Esgotos do município de Venda Nova do Imigrante – ES e resíduos de capim Meloso, capim Napier verde, capim Napier seco, palha de café e esterco de galinha, mostrou-se eficiente no reuso do lodo .

No processo de compostagem utilizou-se leiras com 2,0 m de largura por 6,5 m de comprimento e 1,5 m de altura (figura 8.1). A composição do composto utilizando lodo bruto e o lodo calado foi na proporção de 50 Kg de lodo (peso seco) para cada m³ da mistura de resíduos vegetais.

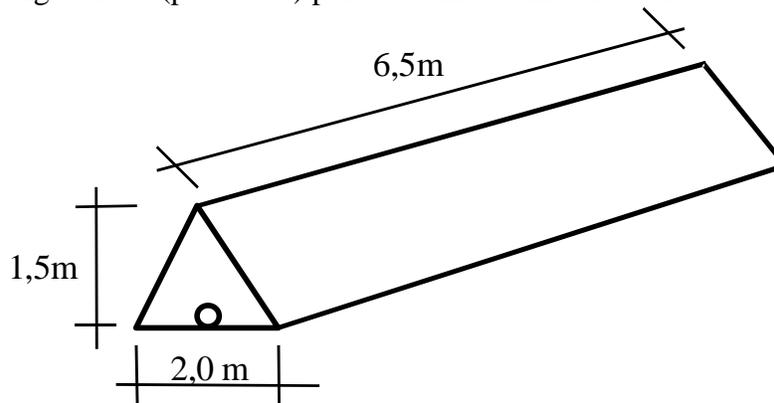


Figura 8.1 - Esquema de uma leira de compostagem

O teor de Nitrogênio foi considerado satisfatório para os compostos orgânicos, superando o valor de 1% de Nitrogênio, indicado na literatura como valor mínimo aceitável. O teor de Fósforo foi considerado baixo nos compostos com lodo bruto e no composto com lodo calado. Os teores de Potássio foram considerados médios para os compostos com lodo bruto sem cal e lodo com cal .

8.3.2 - Manejo da adubação e recomendação para o uso do lodo

O manejo da adubação e o aspecto quantitativo das dosagens do lodo como fonte de matéria orgânica e de nutrientes é um dos principais fatores na recomendação agrícola do lodo. Deste modo, foram realizados estudos pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento/UFES e a EMCAPER, na região serrana do Estado do Espírito Santo no Centro Regional de Desenvolvimento Rural em Venda Nova do Imigrante-ES utilizando o lodo produzido na Estação de Tratamento de Esgotos de Venda Nova do Imigrante, previamente higienizado através da calagem (50% cal virgem) e a compostagem aerada positiva com resíduo vegetal.

A recomendação de 15 toneladas de lodo (base peso seco) por hectare, na cultura do milho, foi avaliada através da aplicação do lodo higienizado com cal, lodo compostado, lodo bruto, adubação química e o composto com o esterco de galinha considerado como o padrão da região. Verificou-se que o lodo bruto, quando comparado à matéria orgânica padrão usada na região (esterco de galinha), apresentou teor superior em N e Fe e teores similares em Zn.

A pré-higienização do lodo com cal virgem elevou significativamente os valores de pH e Ca, além de reduzir o teor de Nitrogênio pelo desprendimento de Amônia. Isto indica que o mesmo deverá ser utilizado como condicionador de solo, com aplicações em intervalos de tempo que não comprometam a imobilização de nutrientes pela elevação do pH do solo. Os compostos orgânicos, de maneira geral, apresentam bom padrão de qualidade, sendo que o lodo bruto compostado se destacou nos teores de Zn e Fe; o lodo calado compostado apresentou maiores teores de Ca, em função da cal utilizada na pré higienização e o esterco de galinha compostado revelou as maiores concentrações de K e Cu.

Quanto à forma de utilização do lodo como fonte de adubo orgânico na cultura do milho, foram realizados estudos com a aplicação parcelada de doses crescentes de 3 a 15 toneladas de lodo por hectare, higienizado com cal e aplicado a lanço e incorporada ao solo com microtrator, com 2/3 da dose no plantio e o restante em cobertura aos 35 dias.

Na avaliação geral dos parâmetros da cultura do milho, o parcelamento não promoveu diferença significativa entre os tratamentos para a produtividade, destacando-se porém que as parcelas que receberam lodo tiveram produtividades muito próximas da parcela adubada somente com adubo mineral. Esses resultados ressaltam a importância do efeito a médio e longo prazo, tendo em vista o importante papel da decomposição da matéria orgânica no fornecimento dos nutrientes. É importante salientar que foram observados aumentos de 34%, 32%, 15% e 14% na produtividade do milho para as doses de 15, 12, 9 e 6 Toneladas de lodo/ha, respectivamente, em relação ao tratamento que não recebeu matéria orgânica (figura 8.2). Tal fato indica que o uso agrícola desse insumo pode ser um importante auxiliar na elevação da produtividade média desta cultura no Espírito Santo e no Brasil.

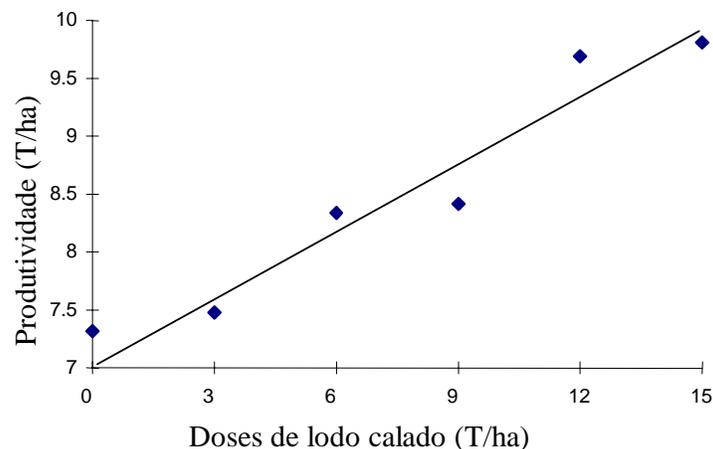


Figura 8.2 - Avaliação da produtividade (T/ha) em função de doses crescentes de adubação com lodo calado na cultura do milho - 1996/97.

Pesquisas utilizando o mesmo manejo e doses de lodo utilizadas no milho também foram desenvolvidas para a cultura do repolho e verificou-se um aumento de produtividade para todos os tratamentos com lodo quando comparados com a testemunha (sem lodo). Este aumento foi verificado tanto na produtividade total quanto na produtividade de cabeças de repolho comerciais.

8.3.3 - Uso do lodo como substrato na produção de mudas de espécies florestais

A utilização do lodo de lagoa anaeróbia higienizado, através da calagem a 50% do peso seco do lodo e a pasteurização à 70^o C por 30 minutos, foi avaliado como substrato na produção de mudas de Tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* Vell. Morong.). Verificou-se que a concentração de 25% de lodo calado foi a que apresentou o melhor resultado para o crescimento das mudas, seguido daqueles com 50% e 75% de lodo calado e mostrados na tabela 8.1. Esse efeito foi atribuído ao alto valor do pH devido a calagem com cal virgem.

Quanto ao uso do lodo pasteurizado, verifica-se na figura 8.3 que o comportamento das mudas foi diferente do observado no lodo calado (figura 8.2), com destaque para as dosagens na seguinte ordem: 100%, 75% e 50% de lodo pasteurizado conforme se observa na tabela 8.2.

Tabela 8.1- Características médias das mudas de tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* Vell. Morong.) submetidas aos tratamentos com lodo calado.

Tratamentos	Altura total (cm)	Diâmetro (mm)	Matéria Seca Parte Aérea (g)	Matéria Seca Sist. Radicular (g)
0%	8,35	3,14	5,65	6,16
25%	7,02	2,46	4,80	4,26
50%	5,37	2,03	3,54	2,15
75%	4,11	2,0	1,53	0,93
100%	4,00	1,59	0,98	0,44

Tabela 8.2- Características médias das mudas de Tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* Vell. Morong.) submetidas aos tratamentos com Lodo Pasteurizado

Tratamentos	Altura total (cm)	Diâmetro (mm)	Matéria Seca Parte Aérea (g)	Matéria Seca Sist. Radicular (g)
0%	9,84	3,72	9,25	6,75
25%	25,41	4,57	31,00	13,75
50%	24,74	4,91	34,00	14,00
75%	32,82	6,52	72,00	26,50
100%	33,36	6,92	74,50	32,75

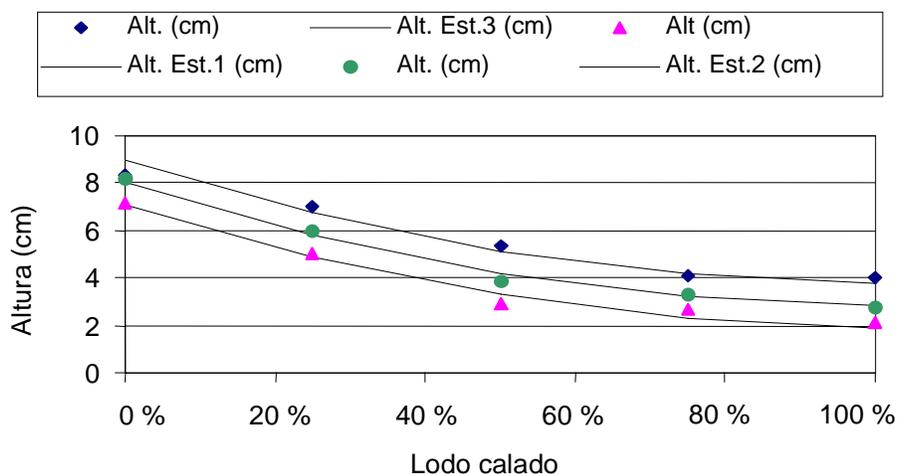


Figura 8.3 - Altura total das mudas de Tamboril submetidas aos tratamentos utilizando diferentes doses de lodo calado durante três épocas de avaliação

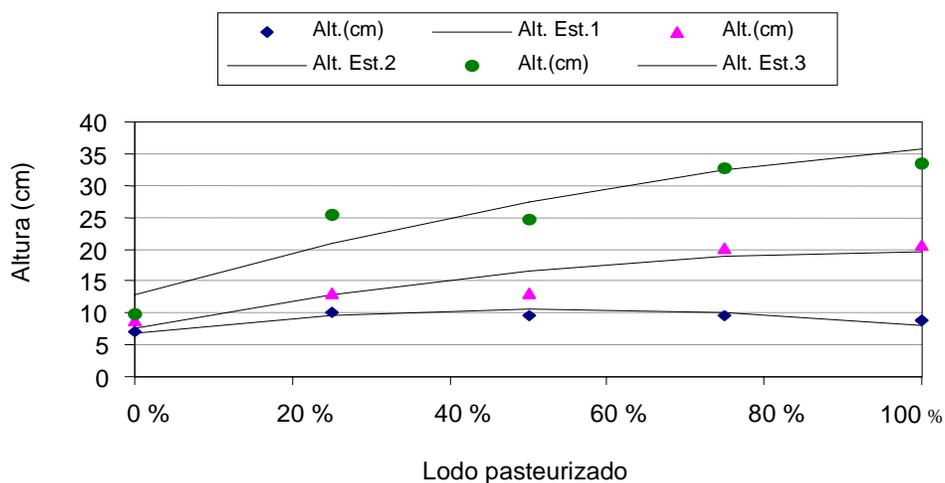


Figura 8.4 - Altura total das mudas de Tamboril submetidas aos tratamentos utilizando diferentes doses de lodo pasteurizado durante três épocas de avaliação

8.3.4 - Uso do lodo de esgoto calado no plantio do cafeeiro *Coffea Canephora*

A higienização do lodo com cal virgem nas proporções de 20, 30, 40, 50 e 60 %, com base em peso úmido, foi avaliada através do desenvolvimento do cafeeiro (*Coffea canephora*, var. conilon), com destaque para a concentração de 30% de cal virgem. Esses resultados destacam a importância do pH na disponibilidade dos nutrientes. Verificou-se que, com o aumento da dose de cal, ocorreu aumento do pH e manifestação de sintomas visuais típicos de deficiência nutricional, principalmente provocados pela deficiência de Mn induzida por alto pH.

A higienização do lodo com a cal virgem, provocou um aumento do valor de pH superior a 9,0 em todos os tratamentos, diminuindo o conteúdo de P, K, Fe, Zn, Mn e Cu nas folhas, que foram classificados abaixo dos níveis foliares considerados adequados.

Para os valores da matéria seca total, matéria seca da raiz, matéria seca da parte aérea, altura de planta e número de folhas emitidas, a concentração de 30 % de cal virgem na higienização do lodo mostrou-se mais eficiente, sendo aproximadamente a mesma concentração de 50 % de cal na base de peso seco, como pode ser observado na figuras 8.3 e 8.5.

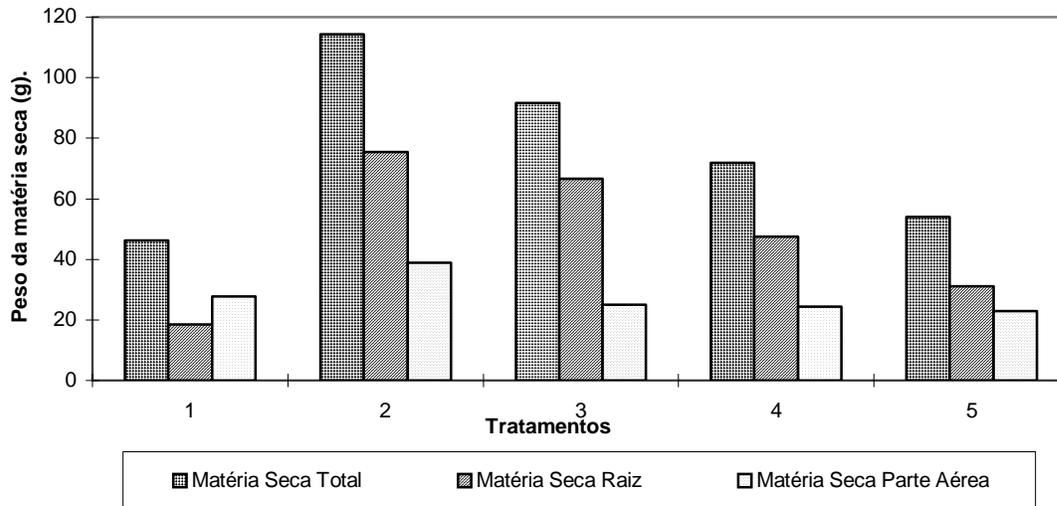


Figura 8.5 - Efeito da higienização do lodo de esgoto com diferentes concentrações de cal virgem no desenvolvimento do café conilon

8.3.5 - Aplicação de lodo calado de lagoa anaeróbia na formação de mudas de cafeeiros.

A utilização do lodo de esgoto calado, oriundo de lagoa anaeróbia, foi estudado na composição de substrato suplementado com doses de cloreto de potássio na formação de mudas de cafeeiros arábica. Verificou-se que a concentração de 30% de lodo calado/m³ de substrato sem a adição do fertilizante cloreto de potássio apresentou os melhores resultados para os teores de N (g/kg) na matéria seca da parte aérea, refletindo num maior desenvolvimento das mudas conforme se observa na tabela 8.3 e na figura 8.4.

Tabela 8.3 - Teores médios de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de mudas de cafeeiros (substrato: lodo de esgoto calado + doses de cloreto de potássio)

Kg KCl / m ³ de substrato	Doses de lodo de esgoto				Média
	30 %	40 %	50 %	60 %	
0,0	35,0	33,3	34,0	32,9	33,8
0,5	29,1	31,0	31,5	32,9	31,1

1,0	30,3	32,2	33,1	33,3	32,2
Média	31,5	32,2	32,9	33,0	

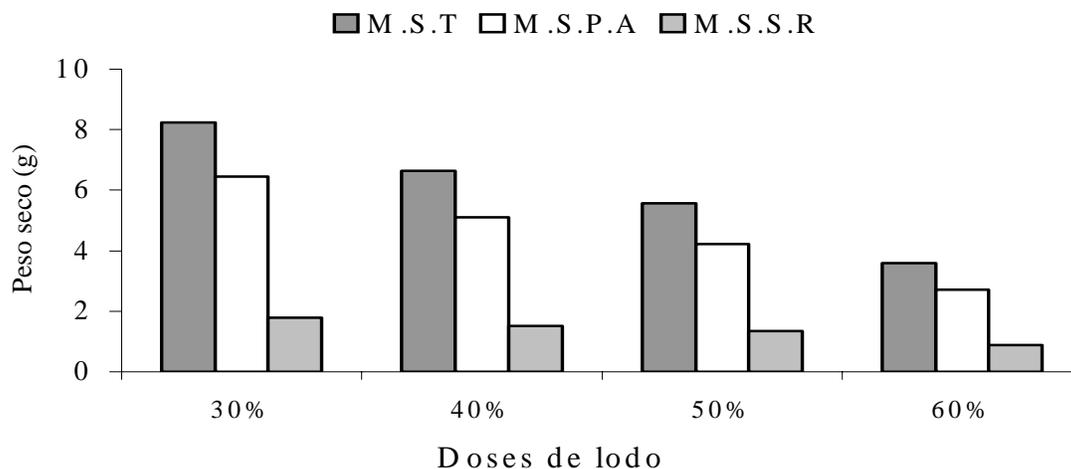


Figura 8.6 - Peso seco médio da matéria seca total (M.S.T), matéria seca da parte aérea (M.S.P.A) e matéria seca do sistema radicular (M.S.S.R) de mudas de cafeeiros crescendo em substrato contendo doses de lodo de esgoto

Fatores do lodo de esgoto que o potencializam para reciclagem agrícola no Estado:

- ⇒ Trata-se de um problema ambiental urbano emergente e cuja gravidade irá se ampliando à medida que se aumenta o número de ETEs no Estado.
- ⇒ Do ponto de vista ambiental e econômico são desaconselháveis, restritas ou passíveis de restrição as demais alternativas para sua disposição final.
- ⇒ Será uma fonte alternativa de macro e micronutrientes para as plantas, diminuindo a demanda de fertilizantes minerais e conseqüentemente o custo de produção agrícola.
- ⇒ Poderá melhorar a capacidade total de troca catiônica no solo e, portanto, o coeficiente de eficiência dos fertilizantes minerais utilizados.
- ⇒ Se adequadamente utilizado, conferirá melhor estruturação aos agregados do solo (sustentabilidade), tornando-o mais resistente à erosão, podendo contribuir para a melhoria da qualidade dos recursos hídricos no Estado.
- ⇒ Se adequadamente utilizado, será fonte de alimento e reequilíbrio da população microbiana do solo, potencializando a resistência das plantas aos patógenos, e com isto podendo reduzir o consumo de agrotóxicos.

- ⇒ Se adequadamente utilizado poderá conferir aumento da produtividade e conseqüentemente da produção agrícola no Estado.
- ⇒ Do ponto de vista financeiro, observa-se de maneira geral um retorno de até quatro vezes o valor em R\$ (real) quando aplicado o lodo em comparação à aplicação de adubos químicos, no Estado do Paraná.

Demandas de pesquisas sobre reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Espírito Santo:

- ⇒ Proposição de sistemas operacionais para o uso agrícola do lodo (metodologia a fim de orientar cálculos de dosagens e complementação mineral para a recomendação agrônômica, tecnologia para aplicação etc.)
- ⇒ Ampliação das pesquisas de qualificação do lodo de esgoto produzido no Estado para fins de reciclagem agrícola (Perfil sanitário, viabilidade de ovos de helmintos, eficiência de processos de desinfecção, etc.)
- ⇒ Análise da eficácia agrônômica em relação a várias culturas agrícolas do Estado (produtividade, qualidade do produto, resistência das plantas a doenças, etc.)
- ⇒ Estudos de economicidade de utilização agrícola do lodo.
- ⇒ Estudos de monitoramento da utilização do lodo de esgoto (sobrevivência dos patógenos no solo, capacidade de estocagem de elementos traço no solo e nos produtos agrícolas, o acúmulo de nitrogênio no solo e os riscos de contaminação do lençol freático por nitratos, etc.).
- ⇒ Proposição de um sistema de classificação de aptidão de áreas ou terras para a utilização do lodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estação de tratamento de esgoto sanitário - NB 570, 1990.
- AISSE, M.M. E ANDREOLI, F. DE N.. Estudo da Desidratação do Lodo Anaeróbio, Obtido em Reatores Tipo Ralf, Através do Uso de Leito de Secagem e de Centrífuga Tipo Decanter. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, Curitiba (PR), pp. 239 – 245. 1998.
- ALÉM SOBRINHO, P. E SAMUDIO, E.M.M.. Desidratação de Lodos de Reator UASB em Leitos de Secagem – Determinação de Parâmetros, XXV AIDIS, Cidade do México (México), 1996.
- ANDREOLI, C. V.; BARRETO, C. L. G. Tratamento e disposição do lodo de esgoto no Paraná. Sanare, Curitiba, Vol. 1, nº 1, p.10-15. 1994.
- ANDREOLI, C. V., DOMASZAK, S., FERNANDES, F.& LARA, A I. Proposta preliminar de regulamentação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Paraná. Sanare: Curitiba, 7 (7): p. 53-60. 1997.
- ARCEIVALA, S. J. Wastewater Treatment and Disposal. Engineering and Ecology in Pollution Control. New York, Marcel Dekker, p. 892, 1981.
- BLEY, C. Estabilização e Higienização de Biossólidos. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul. Curitiba, PR. p. 51-56. 1998.
- BONTOUX, J. Les Aspects Sanitaires de la Valorisation des Boues Issues de L'épuration des Eaux Uses Urbaines. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, Curitiba, Paraná. Pp. 73-76. 1998.
- CATUNDA, P. F. C. et al. Um método experimental para o dimensionamento e a otimização de leitos de secagem de lodo. XXVI AIDIS, Lima (Peru), 1998.
- CESAN. Plano diretor de gerenciamento de resíduos sólidos das instalações operacionais e administrativas da CESAN. Vitória, 1998
- CHANEY,R.L.; MUNNS, J.B.; CATHEY, H.M. Effectiveness of digest sewage sludge compost in supplying nutrients for soilless potting media. J.Am.Sol.Hont.Sci, S.1, v.105, 1980.
- CLARK, S. W. ; COUTS, H. J.; JACSON, R. Alaska Sewage Lagoons. Proc. Sec. Int. Symp. Waste Treatment Lagoons, Federal Water Quality Admin., Washington, D. C. 1970.
- DALTRO FILHO, J. et al. Desidratação de Lodo, em Leito de Secagem, na Cidade de Aracajú – SE: Resultados Preliminares. VI SILUBESA, Florianópolis (SC), 1994.
- DA-RIN, B., NASCIMENTO, G.P.L. - Acumulação de lodo em lagoas de estabilização. 21º Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. Rio de Janeiro, RJ, 1988.

- FRITZ, J.J., MIDDLETON, A.C., MEREDITH, D.D. – Dynamic process modeling of wastewater stabilization ponds. Journal Water Pollution Control Federation, vol. 51, n.11, p. 2724-2743, 1979.
- GLOYNA, E. F. Estanques de estabilizacion de águas residuales. Organização Mundial de Saúde (Ed.), Genebra – Série de Monografias, nº 60, 1973.
- GONÇALVES, R. F. et al. Estudo da formação de lodo em diversos tipos de lagoas de estabilização no Espírito Santo. Anais da II Exposição de Trabalhos Técnicos – XXIV Assembléia da ASSEMAE, 1 a 5 de junho de 1997, pp. 181 - 192.
- GONÇALVES, R. F. Relatório final do Projeto de pesquisa do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Espírito Santo. Sub-projeto 1; Caracterização, técnicas de remoção e reciclagem agrícola do lodo de lagoas de Estabilização, 1996. Edital 01/96 - PROSAB / FINEP, 1998.
- HALL, J. E. (19998) – Standardising and the management of the biosolids international experience. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, Curitiba (PR), 1998. pp 113 -122
- HANISH, B. Mechanical waste water treatment. Informal handouts, IHE, Delft. p.30, 1985.
- HESS, M. L. Lagoas de estabilização - Cap. 6: Lagoas anaeróbias . 2ª edição. Ed. CETESB, São Paulo, 1973.
- HOWARD, D. E. A study of solids deposition in lagoons. M.S. thesis, Univ. Missouri, Columbia. 1967.
- IMHOFF, K. Manual de tratamento de águas residuárias. Editora da Universidade de São Paulo, 1966.
- JORDÃO, E.P., PESSOA, C.A - Tratamento de esgotos domésticos . 3 ed., Editora ABES, 720p, Rio de Janeiro, 1995
- KELLNER, E., PIRES, E.C. – Lagoas de estabilização: projeto e operação . Editora ABES, 242p, Rio de Janeiro, 1998.
- LUCHESE, L. A. C. Características dos biossólidos e efeitos de sua reciclagem em ambientes edáficos com ênfase na dinâmica de elementos traço. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, Curitiba (PR), pp 77 – 83, 1998.
- LUE-HING, C., ZENZ, D. R. & KUCHENRITHER, R. Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal. Vol. 4. 663p. 1992.
- MARAIS, G.R. A dynamic theory for the design of oxidation ponds. University of Cape Town, 1971.
- MENDONÇA, Sérgio Rolim - Lagoas de estabilização e aeradas mecanicamente : novos conceitos. - João Pessoa, PB, 388p, 1990.

- METCALF AND EDDY, Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse, International Edition, 1334 p, 1991.
- MIYAZAWA, M.; ANDRADE, D.S.; MORAES, S.R. Determinação de CO₂ do solo por condutividade em sistema de injeção em fluxo. Congresso Latino Americano de Ciência do Solo, 13, Águas de Lindóia, 1996.
- MULLER, P. S. G. Caracterização físico-química, microbiológica e estudos de desidratação em leito de secagem de lodos de lagoas de estabilização. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória-ES. 1998.
- NASCIMENTO, C. G.; FERRARI, G. F.; MULLER, P. S. G. (1997). Estudo da formação de lodo em diversos tipos de lagoas de estabilização no Espírito Santo. ASSEMAE 97, 1997.
- NASCIMENTO,E.B.; BOTEGA,J.C. Relatório interno. Curitiba: EMATER, 1996.
- NASCIMENTO. C.G; GONÇALVES, R. F. Avaliação Comparativa do Modelo de Saqaar e Pescod com as Taxas de Acumulação de Lodo em Lagoas de Estabilização no Espírito Santo. 20º Congresso da ABES, Rio de Janeiro, 1999.
- NELSON, K & JIMÉNEZ, B. Sludge accumulation, properties, and degradation in a mexican wastewater stabilization pond. 1999.
- PAING, J., et al, Sludge accumulation and methanogenic activity in anaerobic lagoon, 4th International Specialiste Conference on Waste Stabilisation Ponds : Technology and the Environment, Marrakesh, 1999.
- OSWALD, W. J. Advances in anaerobic and pond systems design. Proc. Adv. Water Quality Improvement, Water Quality Symp., nº 1, Univ. of Texas Press, Austin. 1968.
- PESCOD, M.B. - The role and limitations of anaerobic pond systems. Preprint Volume, 3rd IAWQ International Specialist Conference of Waste Stabilization Ponds: Technology and Applications, João Pessoa, PB, 1995.
- PLANO DIRETOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS DAS UNIDADES OPERACIONAIS DA CESAN (ES) - Relatório técnico
- POLPRASERT, C., AGARWALLA, B.K. – Significance os biofilm activity in facultative pond design and performance. Water Science Technology, vol. 31, n. 12, p. 119-128, 1995
- ROJAZ, V. N.; GALVÁN M. & DE VICTORICA J. Evaluacion rápida de la viabilidade de los huevos de helmintos con colorantes biológicos. Anais eletrônico do XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, Lima, Peru. 1998.
- SANEPAR. Reciclagem agrícola do lodo de esgoto: estudo preliminar para a definição de critérios para uso agrônômico e de parâmetros para normatização ambiental e sanitária. Curitiba, 81 p., 1997.

- SANTOS, H. F. Uso agrícola do lodo das estações de tratamento de esgotos sanitários (ETEs): subsídios para a elaboração de uma norma brasileira. Dissertação de Mestrado, Universidade Mackenzie, São Paulo-SP. 1996.
- SAQQAR, M.M., PESCOD, M.B. - Modelling sludge accumulation in anaerobic wastewater stabilization ponds. Wat. Sci. Tech., Vol. 31, No 12, pp. 185-190, 1995.
- SCHNEITER, R.W., MIDDLEBROOKS, J., SLETTEN, R.S., REED, S.C.. Sludges from cold regions lagoons. Water Environment Research, vol. 65, N° 2, pp 146-155, March-April, 1993
- SILVA, M. O. S. A. Sedimentação de lodo em lagoas de estabilização. 12° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Santa Catarina, 1983.
- SILVA, S. A. On the treatment of domestic sewage in wate stabilization ponds in Northeast Brazil, PhD Thesis, Engineering and Applied Science, University of Dundee, U.K. 1982.
- SILVA, S. A; MARA, D. D. Tratamento de águas residuárias – Lagoas de estabilização. Ed. ABES, Rio de Janeiro, 1979.
- SOPPER, W.E. Municipal sludge use in land reclamation. S.1.: Lewis Publishers, 1993.
- TELES, C. R. Utilização do lodo de lagoa de estabilização anaeróbia como fonte de matéria orgânica e nutrientes na produção de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES. 1999.
- THOMAZ-SOCCOL, V. Aspectos sanitários do lodo de esgoto. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, Curitiba, Paraná. Pp. 65-72. 1998.
- TSUTIYA, M.T.e CASSETARI, O.Z. Características do lodo de lagoas de estabilização. 18° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Salvador (BA), 1995.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Process design manual for land e treatment of municipal wastewater, EPA 625/1-81-013A – Cincinnati, Ohio, 1981.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Septage treatment and disposal. Cincinnati, Ohayo: EPA. 1984.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge under 40 CFR part 503. Office of Water, Office of Science and Technology Sludge Risk Assesment Branch. EPA/625/R-92/013. Washington DC 20460. 1992.

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Process design manual. Land application of sewage sludge and domestic septage, EPA 625/R-95/001 – Cincinnati, Ohio, 1995.
- VAN HAANDEL, A . C. e LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos - Um manual para regiões de clima quente, 1994.
- VASEL, J. L.; BORGHT, V. P. Les techniques extensives d'épuration des eaux usées: synthese et conclusions. Proceedings of Inter-University Seminar on Wastewater Treatment in Waste Stabilization Ponds and Aerated Lagoons, Arlon. 1987.
- VICTORETTI, B..A. Lagoas de estabilização - Cap. 11: Manutenção e operação de lagoas de estabilização . 2ª edição. Ed. CETESB, São Paulo, 1975.
- VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. DESA-UFGM.134p, (1996b).
- VON SPERLING, M. Produção e processamento de biossólidos. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul, Curitiba (PR), pp 31 – 33, 1998.
- WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION, OPERATION OF MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS. Manual of Practice no 11, 1996.