

MODELAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO DE LAMAS DE ETAR POR MEIO DE LEITOS DE SECAGEM

Arthur Aparecido Janoni Lima

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do título de Mestre em Tecnologia
Ambiental, dentro do escopo do programa de Dupla
Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do
Paraná*

Orientado por:

Prof. Doutor Ramiro José Espinheira Martins (ESTIG-IPB)
Profa. Doutora Joseane Débora Peruço Theodoro (UTFPR-LD)

Bragança
2019/2020

MODELAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO DE LAMAS DE ETAR POR MEIO DE LEITOS DE SECAGEM

Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Dupla Diplomação do Instituto Politécnico de Bragança, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Professor Orientador (IPB): Prof^o.

Doutor Ramiro José Espinheira Martins

Professora Co-orientadora (UTFPR):

Prof^a. Doutora Joseane Débora Peruço

Theodoro

Bragança, Portugal

Fevereiro, 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente devo agradecer a Deus e a Mãe três vezes admirável (MTA) por toda força, disposição, perseverança, capacidade, proteção, entre outras muitas coisas boas que recebo das mãos divinas.

Agradeço também as instituições, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR e ao Instituto Politécnico de Bragança – IPB, e a todos os professores que contribuíram com minha formação profissional. Em especial agradeço aos meus orientadores, Professor Ramiro José Espinheira Martins e Professora Joseane Debora Peruço Theodoro, por todo o ensinamento, não só acadêmico, mas também pessoal.

Devo agradecer a minha família, principalmente aos meus pais, que nunca mediram esforços para me ajudar e me incentivar, e por sempre permanecerem ao meu lado, possibilitando a conclusão deste título. Agradeço também a minha namorada, Laiany, que me deu forças nos momentos mais delicados, enfrentando junto as dificuldades do desconhecido e fazendo dessa caminhada mais alegre e colorida.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus colegas de laboratório, em especial a Técnica Maria João e a Professora Cristiane Kreutz que foram fundamentais na elaboração dos experimentos deste trabalho. Também agradeço a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

É significativo o impacto ambiental causado pela descarga de efluentes domésticos sem o devido tratamento nos corpos hídricos. Por essa razão, nas últimas décadas, a crescente preocupação relativa a esse assunto, agravado pelo fato de que cada vez mais a população atendida pela coleta e tratamento de efluentes tem vindo a crescer. O processo de tratamento de lamas engloba três objetivos principais: estabilização da matéria orgânica, redução da contaminação bacteriológica e redução do volume. A desidratação das lamas geradas, representa uma etapa essencial do processo de tratamento de lamas, já que a redução de volume, traduz-se numa maior facilidade e menores custos de transporte, bem como uma redução dos custos de deposição em aterro ou incineração. Alguns métodos rápidos e eficientes requerem um elevado consumo energético, tornando o processo dispendioso. Os leitos de secagem surgem, para países em desenvolvimento e com clima quente, como uma alternativa prioritária, atendendo à simplicidade de construção e de operação e ao reduzido investimento inicial. O principal objetivo do trabalho foi a formulação de um modelo matemático que descreva a desidratação de lamas de uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR), em função das condições climáticas do local. O trabalho foi realizado em dois períodos de 30 dias, um no período seco e outro no período de chuvas. Os resultados da modelação foram satisfatórios, como os leitos se distinguiam na espessura da camada de lama ou na forma em que eram operados, 4 modelações foram criadas para satisfazer cada tipo de configuração dos leitos. Para o período seco e para as melhores condições experimentais (20 cm de camada de lama e revolvimento) foi obtido um espessamento considerável da lama, em que se passou de um teor de sólidos de 4,68 % para aproximadamente 73%. Relativamente ao período de chuvas, os melhores resultados foram obtidos novamente para uma camada de lama de 20 cm, porém sem revolvimento (Leito 6), sendo que o teor de sólidos passou de 2,8 para 11,8%.

Palavras-Chave: Leitos de Secagem; Lama de ETAR; Saneamento Básico; Tratamento de lamas.

ABSTRACT

The environmental impact caused by the discharge of domestic effluent without proper treatment in water bodies is significant. For this reason, in recent decades, the growing concern regarding this issue, aggravated by the fact that increasingly the population served by the collection and treatment of effluents has been growing. The sludge treatment process has three main objectives: stabilization of organic matter, reduction of bacteriological contamination and volume reduction. Dehydration of the sludge generated is an essential step in the sludge treatment process, as volume reduction translates into greater ease and lower transport costs, as well as a reduction in landfill or incineration costs. Some fast and efficient methods require high energy consumption, making the process costly. Drying beds arise to developing countries with a hot climate as a priority alternative, given the simplicity of construction and operation and the low initial investment. The main objective of this work was the formulation of a mathematical model that describes the sludge dewatering of a wastewater treatment plant, as a function of the local climatic conditions. The work was carried out in two periods of approximately 30 days, one in the dry season and the other in the rainy season. The results of the modeling were satisfactory, as the beds were different in the amount of the mud layer or in the way they were operated, 4 models were created to satisfy each type of bed configuration. For the dry season and for the best experimental conditions (20 cm of sludge and mix) a considerable dewatering of the mud was obtained, from a solids content of 4.68% to approximately 73%. Regarding the rainy season, the best results were obtained again for a layer of sludge of 20 cm, but without turning (Bed 6), the solids content went from 2.8 to 11.8%.

Keywords: Drying Beds; Sewage Sludge; Basic Sanitation; Sludge Treatment.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Estrutura da Dissertação	16
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	18
2.1	Tratamento de águas residuárias	18
2.2	Origem e produção de lamas nos sistemas de tratamento de águas residuárias	22
2.3	Características físico-químicas e geração per capita de lamas	24
2.4	Tratamento de lamas	26
2.5	Desidratação de lamas	27
2.5.1	Leitos de secagem (resumo)	28
2.5.2	Lagoas de lodo	28
2.5.3	Filtração forçada	29
2.5.4	Centrífuga	29
2.5.5	Secagem térmica	29
2.6	Leitos de secagem	30
2.6.1	Geral	30
2.6.2	Construção	31
2.6.3	Tanques	31
2.6.4	Sistema de drenagem	32
2.6.5	Meio drenante	33
2.6.6	Operação	33
2.6.7	Processo	35
2.7	Modelação Matemática	36

2.7.1	Balanço Hídrico.....	37
2.7.2	Transferência de Calor e Massa	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Caracterização da Área de Estudo	42
3.2	Amostragem	43
3.3	Montagem da Estação de Tratamento de Lamas Por Leitos de Secagem	43
3.3.1	Tanques.....	43
3.3.2	Leito Drenante	44
3.4	Ensaio.....	45
3.5	Coleta, Análise dos Parâmetros de Qualidade e Parâmetros de Controle	46
3.6	Modelação Matemática.....	48
3.6.1	Geral.....	48
3.6.2	Água Potencialmente Evaporada.....	49
3.6.3	Água Drenada Relativamente à Água Inicial do Sistema... 51	
3.6.4	Água Drenada Relativamente à Água Precipitada Sobre o Leito e Água Evaporada Real do Sistema	52
3.6.5	Espessura da Camada de Lama.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1	Primeiro Ciclo de Desidratação	56
4.1.1	Dados Meteorológicos	56
4.1.2	Dados do Experimento.....	57
4.1.2.1	Volume Lixiviado.....	57
4.1.2.2	Teor de Sólidos (Lama).....	59
4.1.2.3	Espessura da Camada de Lama.....	60
4.1.2.4	CQO do Lixiviado.....	61
4.1.2.5	Sólidos Suspensos Totais do Lixiviado	62

4.1.2.6	pH (Lama).....	63
4.1.2.7	pH (Lixiviado).....	64
4.2	Segundo Ciclo de Desidratação	65
4.2.1	Dados Meteorológicos	66
4.2.2	Dados do Experimento.....	67
4.2.2.1	Volume Lixiviado.....	67
4.2.2.2	Teor de Sólidos (Lama).....	68
4.2.2.3	Espessura da Camada de Lama.....	69
4.2.2.4	CQO do Lixiviado.....	70
4.2.2.5	Sólidos Suspensos Totais do Lixiviado	71
4.2.2.6	pH (Lama).....	72
4.2.2.7	pH (Lixiviado).....	73
4.3	Modelação	74
4.3.1	Água Potencialmente Evaporada.....	74
4.3.2	Água Drenada relativamente à Água Inicial do Sistema	76
4.3.3	Água Drenada Relativamente à Água Precipitada Sobre o Leito e Água Evaporada Real do Sistema	78
4.3.4	Espessura da Camada de Lama.....	80
4.3.5	Teor de Sólidos.....	82
5	SIMULAÇÃO	88
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	ANEXOS	A

LISTA DE ACRÓNIMOS

A_s - Área Da Superfície Da Camada De Lama
CF – Coliformes Totais
CQO - Carência Química De Oxigênio
ETAR - Estação De Tratamento De Águas Residuárias
ETAR`s - Estações De Tratamento De Águas Residuárias
 ϵ - Coeficiente De Emissão De Radiação
 ϵ_{atm} - Emissividade da Atmosfera
g - Aceleração da Gravidade
Gr - Número de Grashof
h - Coeficiente de Troca de Calor por Convecção
k - condutividade Térmica
 L_c - Comprimento da Superfície
LPQ – Laboratório de Processos Químicos
m - Massa
Nu - Número de Nusselt
Pr - Número de Prandtl
 P_s - Perímetro da Superfície
 P_v - Pressão de Vapor
 $P_{v_{parcial}}$ - Pressão de Vapor de Água Parcial
 $q''_{absorção}$ - Taxa de Transferência de Calor Absorvida por Radiação
 $q''_{convecção}$ - Taxa de Transferência de Calor por Convecção
 $q''_{emissão}$ - Taxa de Transferência de Calor Emitida por Radiação
 $q''_{transição}$ - Taxa de Transferência de Calor de Transição
 R_a – Número de Rayleigh
 R_{solar} - Radiação Solar
SST - Sólidos Suspensos Totais
ST – Sólidos Totais
T - Temperatura
 T_{ar} - Temperatura do Ar
 $T_{Céu}$ - Temperatura Equivalente do Céu
TH - Teor de Umidade

T_{orvalho} - Temperatura de Ponto de Orvalho

TS - Teor de Sólidos

t_{00} – Tempo a partir da meia noite

UFC – Unidades Formadoras de Colônias

UR - Umidade Relativa

α - Coeficiente de Absorção de Radiação

β - Coeficiente de Expansão Volumétrica

ΔH - Entalpia do Material

ΔH_{vap} - Entalpia de Vaporização da água

ΔT - Diferença de Temperatura

ϑ - Viscosidade Cinemática do Ar

P_{lamas} - Massa Volúmica das Lamas

σ - Constante de Stefan-Boltzmann

Φ - Condutividade Térmica do Ar (Fluido)

ρ_a - Densidade da Água

ρ_l - Densidade de Lamas

ρ_s - Densidade dos Sólidos de Lamas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tratamento preliminar e biológico por lagunagem. Adaptado de [7]. a) Lagoa Facultativa; b) Lagoa Anaeróbia – Lagoa Facultativa; c) Lagoa Aerada Facultativa; d) Lagoa Aerada de Mistura Completa – Lagoa de Decantação.	19
Figura 2 – Tratamento preliminar, tratamento primário e tratamento biológico por biomassa fixa. Adaptado de [7]. a) Filtro Biológico; b) Biodisco; c) Biofiltro Aerado Submerso.....	20
Figura 3 - Tratamento preliminar, tratamento primário (ou não) e tratamento biológico por lamas ativadas. Adaptado de [7]. a) Lodos Ativados Convencional ou Lamas Ativadas Convencional; b) Lodos Ativados – Aeração Prolongada ou Lamas Ativadas – Aeração Prolongada.	21
Figura 4 - Tratamento primário e biológico anaeróbico. Adaptado de [7]. a) Reator Anaeróbio de Manta de Lodo; b) Sistema Fossa Séptica – Filtro Anaeróbio.	22
Figura 5 – Fases do sistema de tratamento de esgoto e seus subprodutos [10].	23
Figura 6 – Etapas de tratamento de lamas e principais processos utilizados [7].	26
Figura 7 – Interação dos leitos de secagem com o ambiente [14].	30
Figura 8 – Conjunto de leitos de secagem de lamas convencionais [11].	32
Figura 9 – Conjunto de leitos de secagem de lamas convencionais [17].	33
Figura 10 – Mapa de localização da estação meteorológica e da estação de tratamento de lamas por leitos de secagem.	42
Figura 11 – Tanque utilizado para construção dos leitos.	44
Figura 12 – Leitos drenantes.	44
Figura 13 – Configuração dos leitos de secagem para ambos os ciclos.	45
Figura 14 – Etapas do processo de modelação.....	49
Figura 15 – Fluxograma do balanço energético.....	50
Figura 16 - Modelação de teor de sólidos (Folha de Cálculo D)	53
Figura 17 - Descrição das células do Excel	54
Figura 18 - Célula do Excel "Espessura da Camada de Lamas"	55
Figura 19 - Volume de água lixiviado experimental do ciclo 1	58
Figura 20 - Teor de sólidos experimental do ciclo 1.....	59

Figura 21 - Espessura da camada de lamas do ciclo 1	61
Figura 22 - Sólidos suspensos totais do lixiviado do ciclo 1	63
Figura 23 - pH das lamas no ciclo 1.....	64
Figura 24 - pH do lixiviado no ciclo 1	65
Figura 25 - Volume de água lixiviado experimental do ciclo 2	67
Figura 26 - Teor de sólidos experimental do ciclo 2.....	68
Figura 27 - Espessura da camada de lamas do ciclo 2	70
Figura 28 - Sólidos suspensos totais do lixiviado do ciclo 2	72
Figura 29 - pH das lamas no ciclo 2.....	73
Figura 30 - pH do lixiviado no ciclo 2	74
Figura 31 - Água potencialmente evaporada no ciclo 1	75
Figura 32 - Água potencialmente evaporada no ciclo 2	75
Figura 33 - Modelação da espessura da camada de lama no ciclo 1	80
Figura 34 - Modelação da espessura da camada de lama no ciclo 2	81
Figura 35 - Modelação do TS para os leitos de 20 cm com revolvimento.....	82
Figura 36 - Modelação do TS para os leitos de 30 cm com revolvimento.....	83
Figura 37 - Modelação do TS para os leitos de 20 cm sem revolvimento.....	84
Figura 38 - Modelação do TS para os leitos de 30 cm sem revolvimento.....	84
Figura 39 - Modelação da água total drenada acumulada no ciclo 1	86
Figura 40 - Modelação da água total drenada acumulada no ciclo 2.....	87
Figura 41 - Teor de sólidos e espessura da camada de lama simulados	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de lamas em cada leito de secagem.	43
Tabela 2 – Planejamento experimental.....	46
Tabela 3 – Rotina de análises laboratoriais das lamas e quantidades coletadas em cada dia da semana	47
Tabela 4 – Rotina de análises laboratoriais dos lixiviados e quantidades coletadas em cada dia da semana.....	47
Tabela 5 - Dados meteorológicos do ciclo 1	57
Tabela 6 - CQO do ciclo 1	62
Tabela 7 - Dados meteorológicos do ciclo 2	66
Tabela 8 - CQO do ciclo 2	71
Tabela 9 - Água drenada da inicial para leitos de 20 cm	76
Tabela 10 - Água drenada da inicial para leitos de 30 cm	77
Tabela 11 - Fatores de multiplicação de drenagem para leitos com revolvimento (Fator de multiplicação 2)	78
Tabela 12 - Fatores de multiplicação de evaporação para leitos com revolvimento (Fator de multiplicação 3)	79
Tabela 13 - Fatores de multiplicação de drenagem para leitos sem revolvimento (Fator de multiplicação 2)	79
Tabela 14 - Fatores de multiplicação de evaporação para leitos sem revolvimento (Fator de multiplicação 3)	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características e quantidade de lama produzida em vários sistemas de tratamento de água residuária [7].....	25
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluente é crucial para a devolução da água ao meio ambiente, diversas conferencias internacionais ligadas a esse assunto são realizadas já a algum tempo, evidenciando ainda mais a realidade desse fato [1]. Ao se tratar os efluentes, a fração sólida, ou as chamadas lamas, deve ser separada da fração líquida, seguindo cada uma das partes para seus posteriores tratamento. Os resíduos considerados sólidos possuem aproximadamente 95% de água [2], se tratando de estações de tratamento de efluentes, que geram grandes quantidades continuamente desse material, esse fato inviabiliza o transporte e deposição em aterros.

O tratamento de lamas engloba três objetivos principais, são eles a estabilização da matéria orgânica, redução da contaminação bacteriológica e redução do volume. A desidratação das lamas geradas, representa uma etapa essencial, já que a redução de volume, gera uma maior facilidade e menores custos para o transporte, bem como a redução dos mesmos para a deposição em aterro.

Existem várias técnicas para a desidratação de lamas, que são escolhidas de acordo com o volume de lama a se tratar no espaço e tempo disponível. Algumas dessas técnicas consistem na utilização de energia elétrica, são mais rápidas e compactas, porém são detentoras de altos custos energéticos, além da complexidade de instalação e operação, outros métodos como os leitos de secagem, que basicamente expõe-se a lama ao ambiente em leitos drenantes, com materiais simples, como britas e areia, objetivando-se a evaporação e lixiviação da parte líquida com efeitos naturais, os leitos drenantes podem ser variados em suas composições, mudando os materiais a serem utilizados ou então a sua distribuição na camada. São isentas de gastos energéticos e ainda sua instalação e operação são processos simples, a necessitar apenas de tempo e espaço superiores aos métodos energéticos [3].

Os leitos de secagem se apresentam viáveis para regiões onde o clima apresente temperaturas quentes e que tenham baixo índice pluviométrico, já que utiliza de fenômenos naturais para a desidratação das lamas, muitos autores obtiveram valores significativos para suas experiências relativo à redução de volume da lama, entre eles: 59% [4] e 65% [5]. Vários países, ou regiões em desenvolvimento

apresentam tais características climáticas, isso contribui para o aumento do saneamento básico nessas áreas, já que o fator económico é determinante.

Para prever se os leitos de secagem serão eficientes para o tratamento de lamas a se adotar na construção de uma estação de tratamento de águas residuais, deve-se levar em conta as quantidades de lamas geradas, espaço disponível e os padrões meteorológicos da região. Com isso, a partir de uma equação matemática, é possível relacionar os dados e determinar então qual a técnica mais viável a se utilizar no tratamento das lamas do efluente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente estudo foi o desenvolvimento de uma equação que descreva, de modo aproximado a realidade, a relação dos fatores meteorológicos com a desidratação de lamas por meio de leito de secagem.

1.2.2 Objetivos Específicos

Alguns objetivos específicos foram colocados em evidência, a fim de aproveitar os ensaios realizados. São eles as análises de:

- Capacidade de diminuição de coliformes totais na lama;
- Interação dos materiais do leito constituinte com o lixiviado;
- Avaliação da influência do revolvimento na desidratação;
- Avaliação da influência de diferentes espessuras da camada de lama.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho é composto por 6 capítulos, além de referências bibliográficas e anexos. O primeiro, no qual essa seção se encontra, introduz o assunto e seus principais objetivos. No capítulo 2 é disposta o embasamento teórico sobre os assuntos referentes ao trabalho e também a caracterização das lamas, descrita pela

literatura existente. No capítulo 3 é descrito os procedimentos utilizados para a execução da parte prática do trabalho, especificando materiais e métodos utilizados no experimento, também mostra a forma como foi elaborado o modelo matemático. No quarto capítulo encontram-se os resultados e as discussões obtidos com a execução do trabalho. O capítulo 5 se refere a uma simulação feita, utilizando a modelação elaborada, para determinar se os leitos de secagem seriam ou não eficientes para a cidade escolhida, levando em consideração as condições climáticas da mesma. E no sexto, e último capítulo, se encontra as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Tratamento de águas residuárias

A escolha do sistema de tratamento das Estações de Tratamento de Águas Residuárias Urbanas – ETAR`s é feita levando em conta vários fatores [6]. São eles, características quantitativas e qualitativas, localização do sistema e grau de tratamento pretendido.

Complementando, Sperling [2] lista que, a eficiência, custos de operação, confiabilidade, requisitos de área, sustentabilidade, impactos ambientais, custos de implantação, simplicidade e disposição do lodo, também são fatores importante na implantação de uma ETAR.

As estações de tratamento em questão, normalmente, dispõem de quatro fases para o tratamento, podendo usar todos em conjunto ou apenas alguns, onde cada fase é responsável a uma determinada parcela do tratamento.

A primeira fase do tratamento é chamada de tratamento preliminar, tem por objetivo a remoção de sólidos grosseiros. É constituída por grades, na chegada do efluente a estação de tratamento, para o gradeamento de materiais de grandes dimensões. Logo após a etapa de gradeamento, geralmente se encontra um desarenador. Esse serve para a remoção de areia, que se sedimenta facilmente perante as condições impostas para a passagem da água residuária ao elemento. Por último, deve-se instalar um regulador de caudal, também conhecido como calha parshall. A fase preliminar pode ser observada na Figura 1, antecedendo os tratamentos biológicos que serão explicados a seguir.

Antecessor ao tratamento biológico, o tratamento primário pode ou não existir assim como mostra a Figura 3, dependendo do sistema secundário utilizado. Consiste em remover partículas suspensas com tempo de sedimentação pouco maior que as antes retiradas no desarenador, seu principal elemento é o sedimentador primário e seu objetivo é diminuir a carga orgânica que seguirá para o próximo passo do tratamento.

No tratamento secundário, ou tratamento biológico, é onde ocorre a retirada da carga orgânica do meio, essa carga é consumida por microrganismos, gerando a chamada lama ou lodo biológico. Esta etapa do tratamento pode ser projetada a

trabalhar entre diversas opções de tratamento que desfrutam do mesmo princípio, a decomposição microbiana. Dentre eles os que mais se destacam e que mais são utilizados são: “Os sistemas aeróbios intensivos, quer por biomassa suspensa (lamas activadas), quer por biomassa fixa (leitos percoladores e biodiscos ou discos biológicos), e os sistemas aquáticos por biomassa suspensa – lagunagem.” [6]. Está disposto na Figura 1 – Tratamento preliminar e biológico por lagunagem. Adaptado de [7].os vários tipos de tratamento biológico por lagunagem e seus subprodutos.

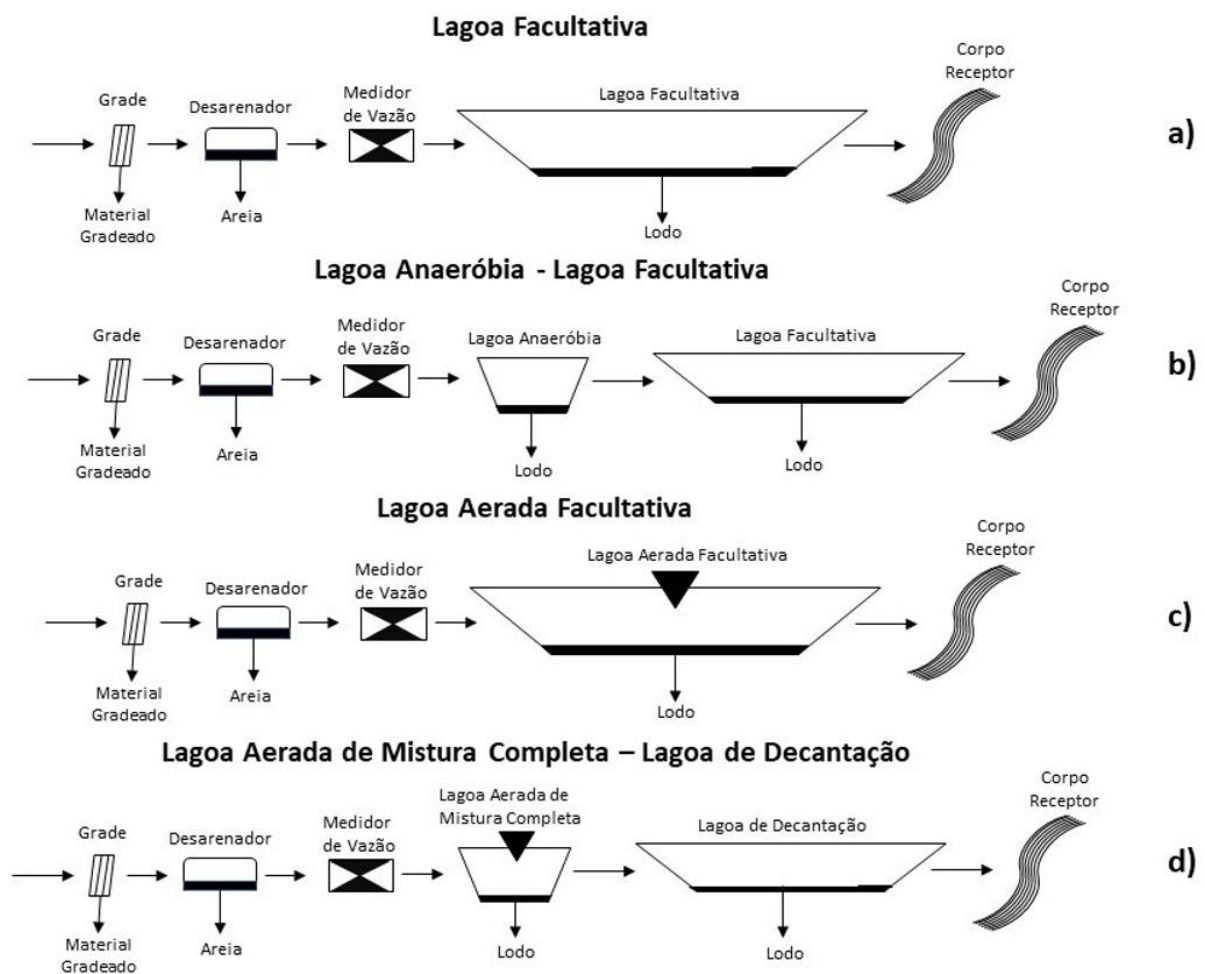


Figura 1 – Tratamento preliminar e biológico por lagunagem. Adaptado de [7]. a) Lagoa Facultativa; b) Lagoa Anaeróbia – Lagoa Facultativa; c) Lagoa Aerada Facultativa; d) Lagoa Aerada de Mistura Completa – Lagoa de Decantação.

Na Figura 2 estão contidos os tratamentos biológicos por biomassa fixa.

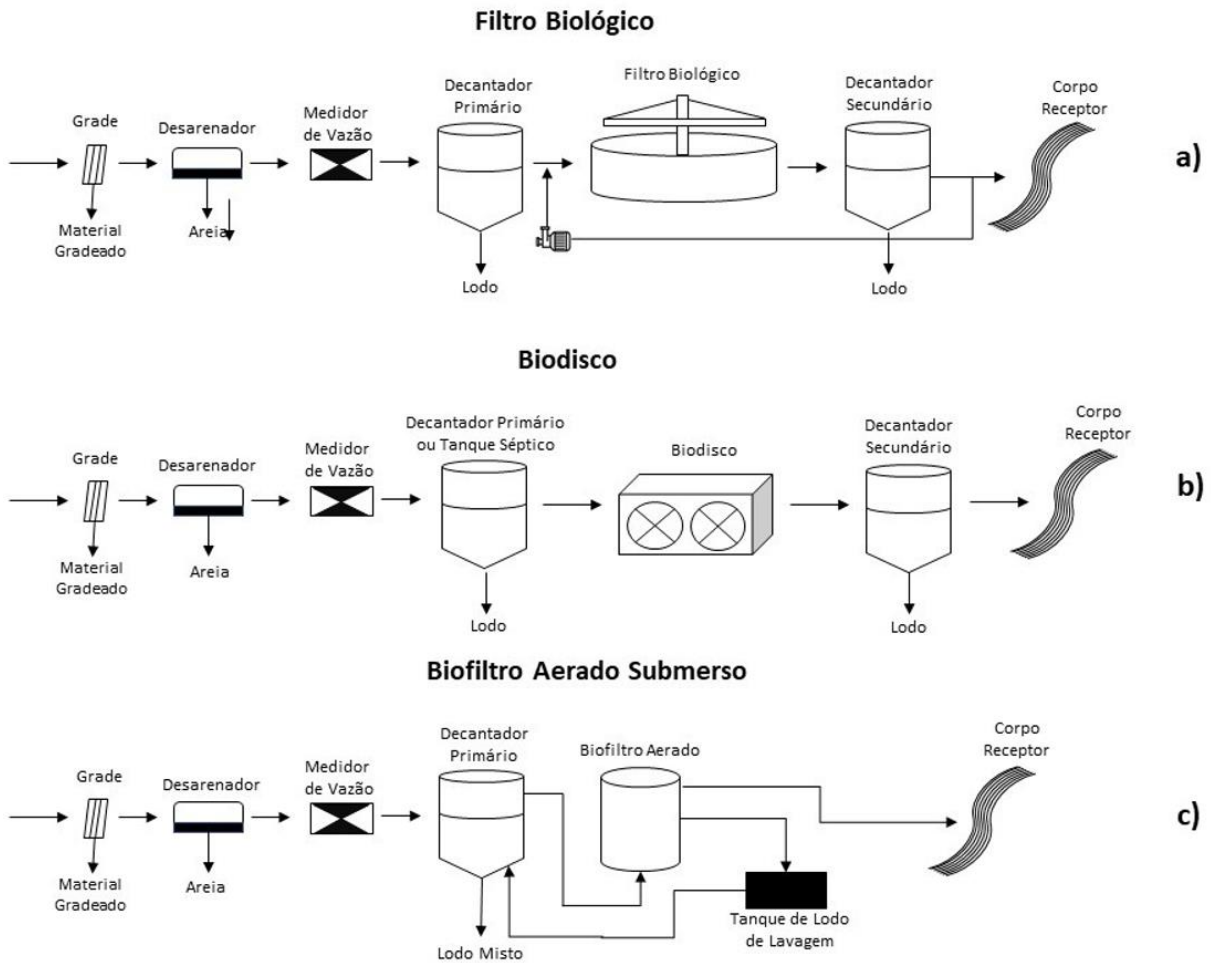


Figura 2 – Tratamento preliminar, tratamento primário e tratamento biológico por biomassa fixa. Adaptado de [7]. a) Filtro Biológico; b) Biodisco; c) Biofiltro Aerado Submerso

Existem dois tipos de tratamento por lamas ativadas, são eles as lamas ativadas convencional e lamas ativadas com aeração prolongada e estão representados na Figura 3. A principal diferença se dá pelo fato das lamas ativadas de aeração prolongada não usufruir de sedimentador primário, pois a lama final desse processo, por apresentar maior tempo de detenção em tratamento sai estabilizada, e é inviável a utilização de um sedimentador primário, onde a lama necessitaria de uma unidade de estabilização [2].

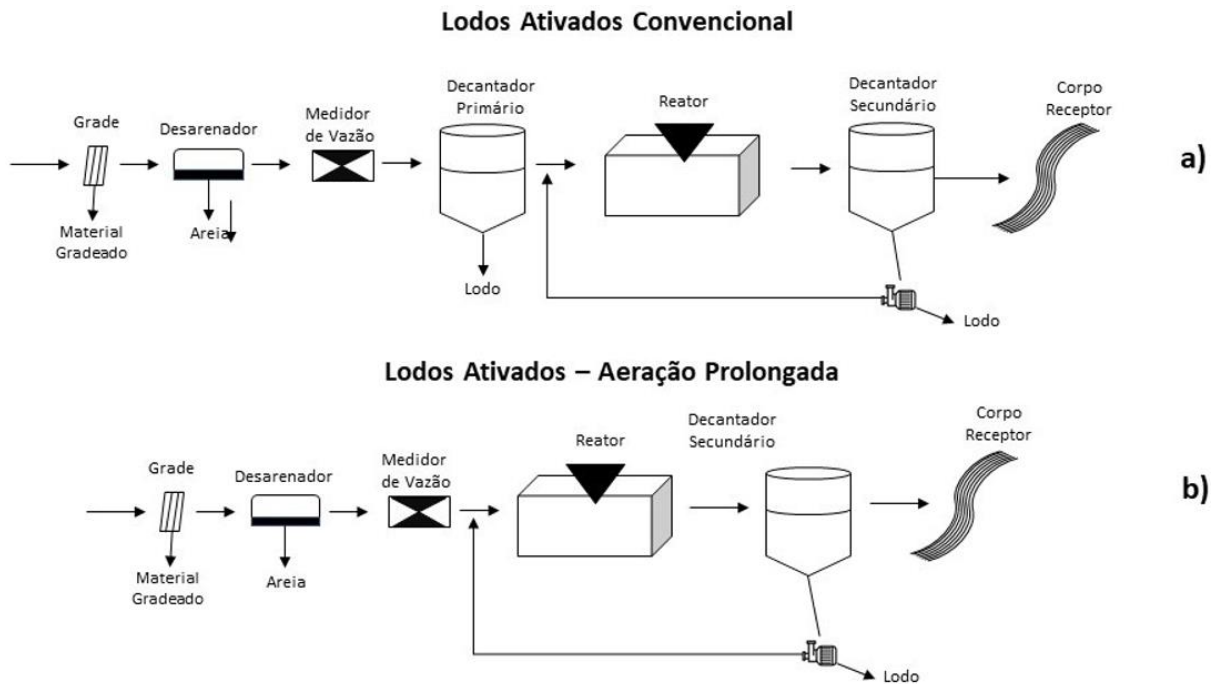
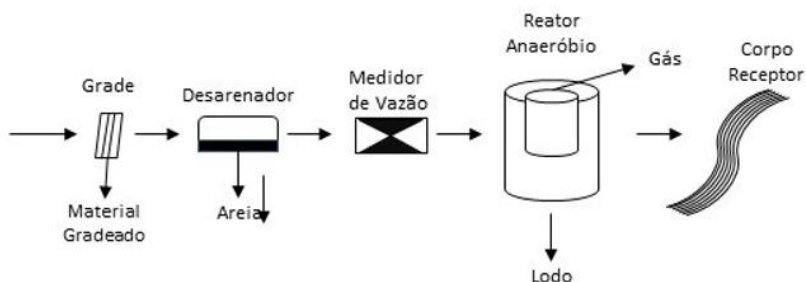


Figura 3 - Tratamento preliminar, tratamento primário (ou não) e tratamento biológico por lamas ativadas. Adaptado de [7]. a) Lodos Ativos Convencional ou Lamas Ativadas Convencional; b) Lodos Ativos – Aeração Prolongada ou Lamas Ativadas – Aeração Prolongada.

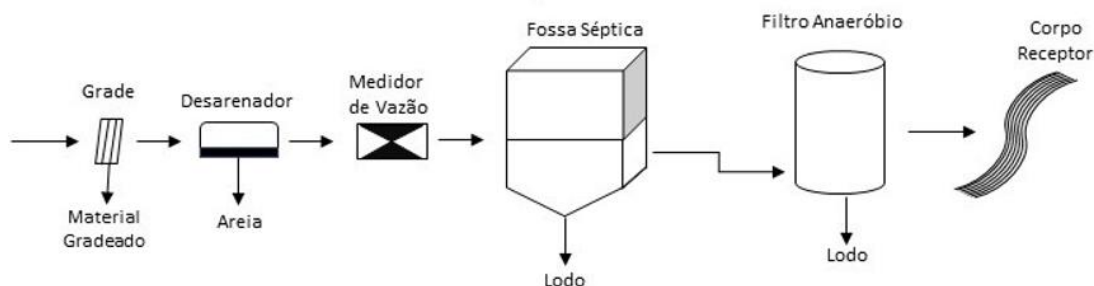
Existe ainda para o tratamento secundário, o tratamento anaeróbico que é mostrado na Figura 4. A biomassa anaeróbia, assim como no tratamento biológico aeróbico, se desenvolver consumindo a matéria orgânica do efluente. Diante do fato da biomassa permanecer por grande período de tempo no tratamento, os próprios microrganismos se consomem, não necessitando de uma etapa posterior para biodigestão dos mesmos.

Reator Anaeróbio de Manta de Lodo



a)

Sistema Fossa Séptica – Filtro Anaeróbio



b)

Figura 4 - Tratamento primário e biológico anaeróbico. Adaptado de [7]. a) Reator Anaeróbio de Manta de Lodo; b) Sistema Fossa Séptica – Filtro Anaeróbio.

A fase final do tratamento, chamada de tratamento terciário, ou como também é conhecida, etapa de refinamento, ainda não é muito utilizada nas estações de tratamento onde os recursos são escassos. Nesta fase acontece a desinfecção e a retirada de nutrientes. A desinfecção pode ser feita por meio de vários processos, os mais comuns são: cloração, radiação ultravioleta, ozonização e dosagem de hipoclorito [8].

2.2 Origem e produção de lamas nos sistemas de tratamento de águas residuárias

Todo tratamento de esgoto gera subprodutos, os detritos que são interceptados pelas grades, caixa de areia e caixa de gordura, ou seja, tratamento preliminar, devem ser destinados a aterros sanitários.

Para sistemas de tratamento de águas residuárias que desfrutam de decantadores primários, são geradas as lamas primárias, compostas por sólidos sedimentáveis e quando utilizados coagulantes químicos são chamadas de lamas químicas. Em seguida, no tratamento biológico, a própria biomassa que utilizou os

nutrientes do esgoto para se desenvolver gera o lodo secundário, ou lodo biológico. As lamas primárias e secundárias podem ser tratadas juntamente, e quando misturadas são chamadas de lamas mistas. E ainda por fim, quando existente, o tratamento terciário gera a chamada lama terciária. Essas lamas, mesmo que 95% de sua composição seja água, são retiradas do processo para que o efluente final tenha concentrações pequenas de sólidos em suspensão [7].

As fases do sistema e a produção de seus subprodutos estão contidas no diagrama da Figura 5. As lamas provenientes de estações de tratamento de águas residuais domésticas, urbanas e de outras estações de tratamento de águas residuais de composição similar às águas residuais domésticas e urbanas são chamadas de lamas de depuração, assim como as lamas de fossas sépticas e de tratamentos de águas residuais de atividades agropecuárias [9].

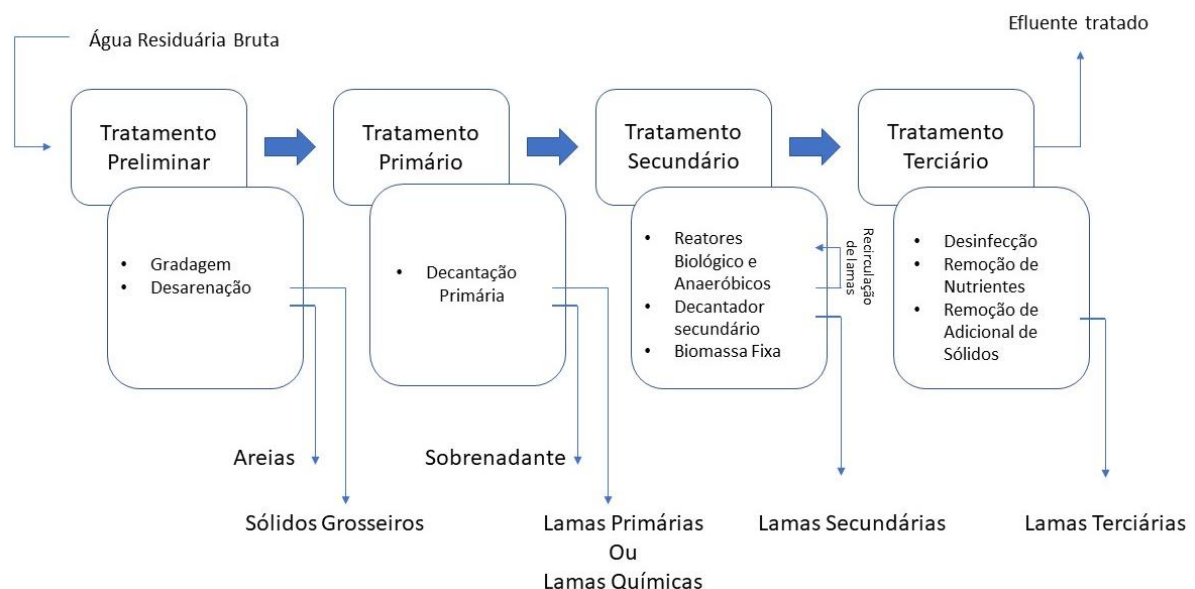


Figura 5 – Fases do sistema de tratamento de esgoto e seus subprodutos [10].

A percentagem de sólidos nas águas residuárias urbanas é de apenas 0,1% [3]. Cerca de 60 a 80% dos sólidos das lamas são sólidos orgânicos, representados pela fração volátil, e de 20 a 40% são sólidos inorgânicos [11].

Quanto melhor um efluente é tratado mais lama é gerada, pois as impurezas da água são basicamente materiais sólidos, quanto menos desses materiais estiverem presentes na água maior será seu grau de pureza.

2.3 Características físico-químicas e geração per capita de lamas

Nos tratamentos que utilizam lodos ativados por aeração prolongada como tratamento biológico, cada kg de Carência Química de Oxigênio (CQO) que entra no sistema gera cerca de 0,50 a 0,55 kg de sólidos em suspensão, ou seja, 0,5 a 0,55 kgSS/kgCQO. Nas lamas ativadas convencionais essa geração pode chegar a 0,80 kgSS/kgCQO, enquanto para lagoas aeradas facultativas não deve passar de 0,13. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a biomassa nas lamas ativadas fica pouco tempo em tratamento, não havendo permanência suficiente para digestão do lodo no próprio tanque. Já nas lagoas a biomassa fica por anos no processo e, portanto, consomem a si próprias, convergindo a água e gases. Em média uma pessoa gera 0,1 kgCQO por dia, como a remoção de CQO tem relação com produção de lodo, a geração per capita de sólidos suspensos pode ser determinada [7].

A geração de lama de cada processo e geração per capita podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características e quantidade de lama produzida em vários sistemas de tratamento de água residuária [7].

Sistema	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida (dirigido à etapa de tratamento do lodo)			
	kgSS / kgDQO aplicada	Teor de Sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d) (a)	Volume de lodo (L/hab.dia) (b)
Tratamento primário (convencional)	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Tratamento primário (tanques sépticos)	0,20 - 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Lagoa facultativa	0,12 - 0,32	5 - 15	12- 32	0,1 - 0,25
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa				
Lagoa anaeróbia	0,20 - 0,45	15 - 20	20 - 45	0,1 - 0,3
Lagoa facultativa	0,06 - 0,10	7 - 12	6 - 10	0,05 - 0,15
Total	0,26 - 0,55	-	26 - 55	0,15 - 0,45
Lagoa aerada facultativa	0,08 - 0,13	6 - 10	8 - 13	0,08 - 0,22
Lagoa aerada mistura completa - lagoa sediment.	0,11 - 0,13	5 - 8	11 - 13	0,15 - 0,25
Tanque séptico + filtro anaeróbio				
Tanque séptico + filtro anaeróbio	0,20 - 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Filtro anaeróbio	0,07 - 0,09	0,5 - 4,0	7 - 9	0,2 - 1,8
Total	0,27 - 0,39	1,4 - 5,4	27 - 39	0,5 - 2,8
Lodos ativados convencional				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos ativados - aeração prolongada				
Filtro biológico de alta carga	0,50 - 0,55	0,8 - 1,2	40 - 45	3,3 - 5,6
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,20 - 0,30	1 - 2,5	20 - 30	0,8 - 3,0
Total	0,55 - 0,75	1,5 - 4,0	55 - 75	1,4 - 5,2
Biofiltro aerado submerso				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Reator UASB				
UASB + pós-tratamento aeróbio ©	0,12 - 0,18	3 - 6	12 - 18	0,2 - 0,6
Lodo anaeróbio (UASB)	0,12 - 0,18	3 - 4	12 - 18	0,3 - 0,6
Lodo aeróbio (lodos ativados) (d)	0,08 - 0,14	3 - 4	8 - 14	0,2 - 0,5
Total	0,20 - 0,32	3 - 4	20 - 32	0,5 - 1,1

A densidade das lammas de depuração é em média, segundo Qasim apud Berco, (2013) [12], $1,02 \text{ g.cm}^{-3}$ para lammas primarias e $1,005$ para lammas secundárias advindas de tratamento por lammas ativadas, e para os sólidos contidos nessas lammas $1,4$ e $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ respectivamente.

2.4 Tratamento de lamas

As lamas logo após serem retiradas do tratamento das águas residuárias também passam por tratamento antes de serem dispostas para qualquer que seja seu uso posterior.

O gerenciamento completo das lamas possui seis etapas que podem ser vistas no fluxograma da Figura 6, mas pode ser utilizado somente alguns deles, conforme o necessitado. As lamas provenientes de lagoas de estabilização, reatores anaeróbicos e lamas ativadas com aeração prolongada, por exemplo, já saem estabilizadas, visto que o grande tempo de detenção da lama já é suficiente para que os próprios microrganismos se consumam, necessitando apenas eliminar umidade para serem dispostas, e higienização caso seu destino não seja aterros sanitários ou incineração.

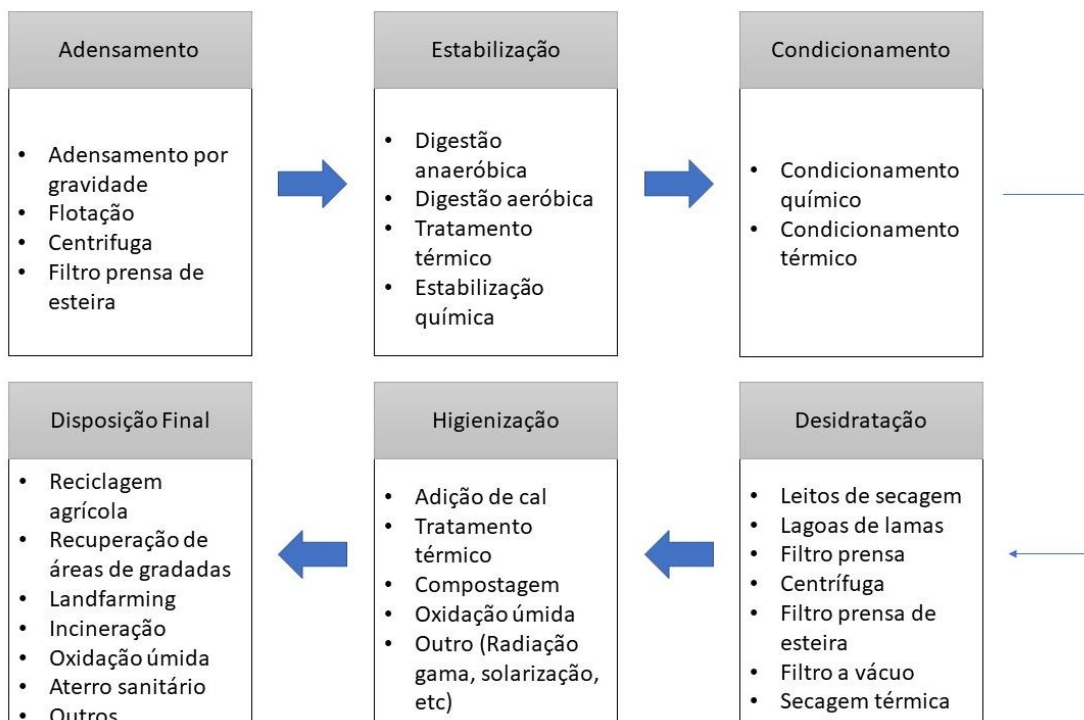


Figura 6 – Etapas de tratamento de lamas e principais processos utilizados [7].

Como as lamas são dotadas maioritariamente de água, antes da etapa de estabilização, deve-se adotar uma etapa de adensamento para que não ocupem volumes inoperáveis. O adensamento consiste em aglomerar as partículas de solo.

A estabilização tem como principal tarefa a remoção da matéria orgânica biodegradável presente no lodo, evitando assim a propagação de odores desagradáveis. Logo após essa etapa, tem-se a etapa de condicionamento, onde por

adição de produtos químicos propicia uma melhor desidratação na seguinte fase, que é chamada de desidratação. Nessa fase, o objetivo é remover a maior quantidade de água possível, pois quanto menor o volume alcançado nessa etapa, menores serão os gastos posteriores com transporte e deposição. Chegando a penúltima etapa do tratamento das lamas, tem-se a higienização, ou também conhecida como desinfecção, essa etapa é necessária dependendo do destino da lama, visto que os patógenos não são retirados em níveis aceitáveis na etapa digestória. Por último a lama deve ter um fim adequado, pois cada utilização final requer um nível específico de tratamento [7].

Para utilização das lamas de depuração em solo agrícola, deve-se seguir o Decreto-Lei n.º 276/2009 que estabelece o regime de utilização, destinado a evitar efeitos nocivos à saúde humana, água, solos, vegetação e para os animais frente a utilização das mesmas.

2.5 Desidratação de lamas

A desidratação das lamas tem como objetivo diminuir a umidade e conseqüentemente o volume das mesmas, podendo ter várias razões para a utilização de tal processo [11], como:

- Diminuição de custos de transporte, visto que diminuirá seu volume;
- A lama desidratada é mais facilmente manuseada;
- Aumento do poder calorífico, facilitando a incineração (Menor umidade);
- Diminuição de odores e decomposição;
- Diminuição de lixiviado em aterros sanitários.

Os processos de desidratação podem ser naturais ou mecânicos, ou seja, desidratadas por fenômenos como a evaporação e a percolação que acontecem de forma natural e espontânea, ou por equipamentos que utilizam energia, seja ela de qualquer fonte, para acelerar esses processos ou retirar, forçadamente, a água do meio. Os processos naturais são mais simples e baratos, porém podem precisar de muito espaço e muito tempo para que os mesmos resultados finais sejam iguais aos de um método mecânico que em poucas horas e com pouco espaço apresentam, em

controversa os processos mecânicos são mais caros, e alguns necessitam de um bom condicionamento da lama afluyente [3].

O estado físico da água presente nas lamas tem influência na desidratação, segundo Gonçalves apud Reali, (1999) [13]. O grau de dificuldade de retirada de água da lama é: Água livre como a mais fácil, água intersticial ou capilar em segundo, água vicinal em terceiro e por último, o estado físico onde se encontra a maior dificuldade para retirada da mesma da lama, é chamada de água de hidratação. A água livre não está associada com as partículas sólidas, por isso a maior facilidade de retirada da lama. A água capilar está ligada mecanicamente, presa aos interstícios dos flocos. Já a água vicinal é constituída por múltiplas camadas de H₂O ligadas as partículas sólidas por meio de pontes de hidrogênio e, por último, a água de hidratação que também está ligada quimicamente, no interior das partículas sólidas.

2.5.1 Leitões de secagem (resumo)

Os leitões de secagem são sistemas simples, que utilizam efeitos naturais para a desidratação das lamas. Consistem em expor o resíduo húmido sob um leito drenante, onde ocorre os processos de evaporação e drenagem. Os leitões de secagem serão melhor explicados no Capítulo 2.6.

2.5.2 Lagoas de lodo

As lagoas de lodo consistem na mesma simplicidade dos leitões de secagem, a lama é exposta para secar naturalmente em um reservatório. A diferença com o primeiro se dá, pois, as lagoas de lodo não contem leito drenante que permite o escoamento de lixiviados, sendo assim só recorre a evaporação como meio de desidratação.

2.5.3 Filtração forçada

A desidratação por filtração forçada pode se dividir em três categorias: Filtro prensa, filtro a vácuo e prensa desaguadora [14].

No filtro prensa é aplicada uma diferença de pressão em uma câmara revestida internamente por mantas filtrantes contendo lama. Dessa câmara, após introduzir pressão, escoam o líquido filtrado e em seu interior retém a parte sólida da lama. Ao contrário do filtro prensa, o filtro a vácuo retém as partículas sólidas em uma manta filtrante do lado de fora de um tambor exposto a um tanque com lama, introduzindo pressão negativa no interior do tambor. Após algum tempo a manta é raspada para retirada dos sólidos.

O filtro prensa de esteiras, ou prensa desaguadora, utiliza esteiras com manta filtrante onde a lama é introduzida na parte superior e filtrada por gravidade seguida de compactação mecânica.

2.5.4 Centrífuga

Existem vários tipos de centrífuga, todas seguem o mesmo princípio de separação de fases (sólido - líquido), utilizam a força centrífuga para acelerar o processo de sedimentação. A vantagem da centrífuga relativamente a outros equipamentos de desidratação é que produz um resíduo final mais consistente e com menos odor e ocupa um espaço menor. As desvantagens são os custos energéticos mais elevados que os demais métodos segundo Spelman apud Andreolli et al, (2000) [15], contudo esses custos energéticos, com as novas tecnologias, nos últimos anos estão diminuindo [16].

2.5.5 Secagem térmica

A secagem térmica, de forma simplificada, é a retirada de umidade agregada a um sólido através da vaporização de forma artificial. Em um secador é atribuído energia térmica para aquecimento da lama, a uma temperatura inferior à de destruição

da matéria orgânica, a fim de não alterar suas características. Com o aquecimento da lama a água incorporada é evaporada, restando assim a fração sólida.

2.6 Leitos de secagem

2.6.1 Geral

Os leitos de secagem são sistemas simples utilizados para desidratação de lamas, utilizam apenas fatores naturais para a secagem. Normalmente são tanques retangulares de pouca profundidade, com uma leve inclinação de fundo de forma a conduzir lixiviados para um local de escape. No interior dos tanques é construído um meio de enchimento poroso, constituído de diferentes granulometrias de areia e brita, que serve de suporte para a lama e também como um filtro para a água presente no sistema, seja ela originária da lama ou de precipitação. A água percolada, normalmente, volta para a entrada de efluentes da ETAR.

O processo ocorre em batelada e a cada ciclo requer a retirada do lodo seco, para uma melhor eficiência. A Figura 7 mostra a interação dos fenômenos naturais com os leitos de secagem.

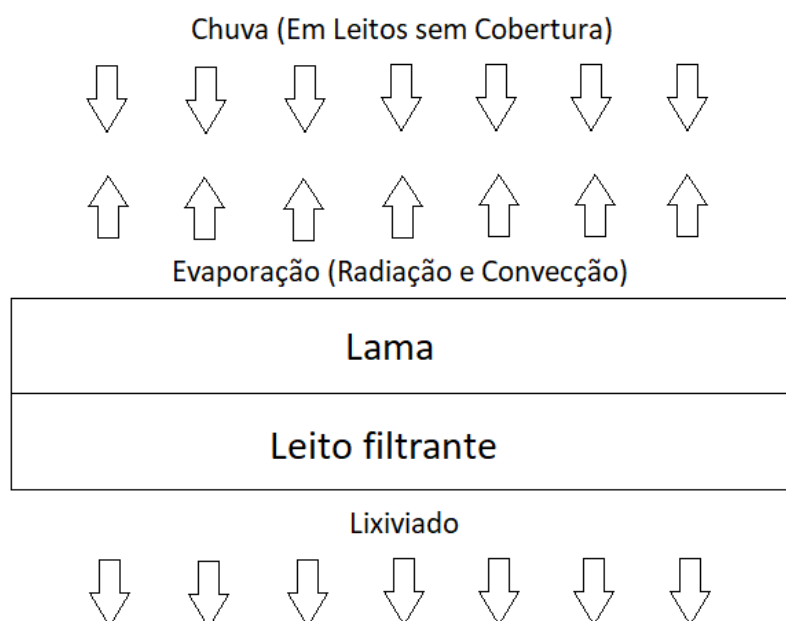


Figura 7 – Interação dos leitos de secagem com o ambiente [14].

Durante o processo de desidratação de lamas por meio de leitos de secagem, a degradação da matéria orgânica não é considerável, mas o processo reduz significativamente a concentração de microrganismos patogênicos nas lamas. Isso ocorre devido a incidência de radiação solar e também pela diminuição da disponibilidade de água ao decorrer do processo, visto que alguns microrganismos necessitam de água para locomoção e reprodução [10].

2.6.2 Construção

Podemos dividir a construção dos leitos em três partes:

- Tanques;
- Sistema de drenagem;
- Meio drenante.

A remoção das lamas secas do interior dos leitos de secagem é feita manualmente ou mecanicamente, para ambos se prevê a construção de um caminho de asfalto até próximo aos leitos, de forma a entrar veículos e facilitar a retirada do material.

2.6.3 Tanques

Os tanques são, normalmente, retangulares ou quadrados, rasos e impermeáveis, e construídos em concreto. Segundo as recomendações de Metcalf & Eddy [11], os tanques devem apresentar cerca de 6 m de largura e de 6 a 30 m de comprimento. Esses valores podem variar dependendo do método de remoção das lamas desidratadas, se a retirada desse material for feita mecanicamente as dimensões adotadas devem assegurar a movimentação dos equipamentos no interior dos leitos.

Normalmente as estações de tratamento possuem mais de um leito de secagem interligados relativamente ao sistema de drenagem, como mostra a Figura 8.

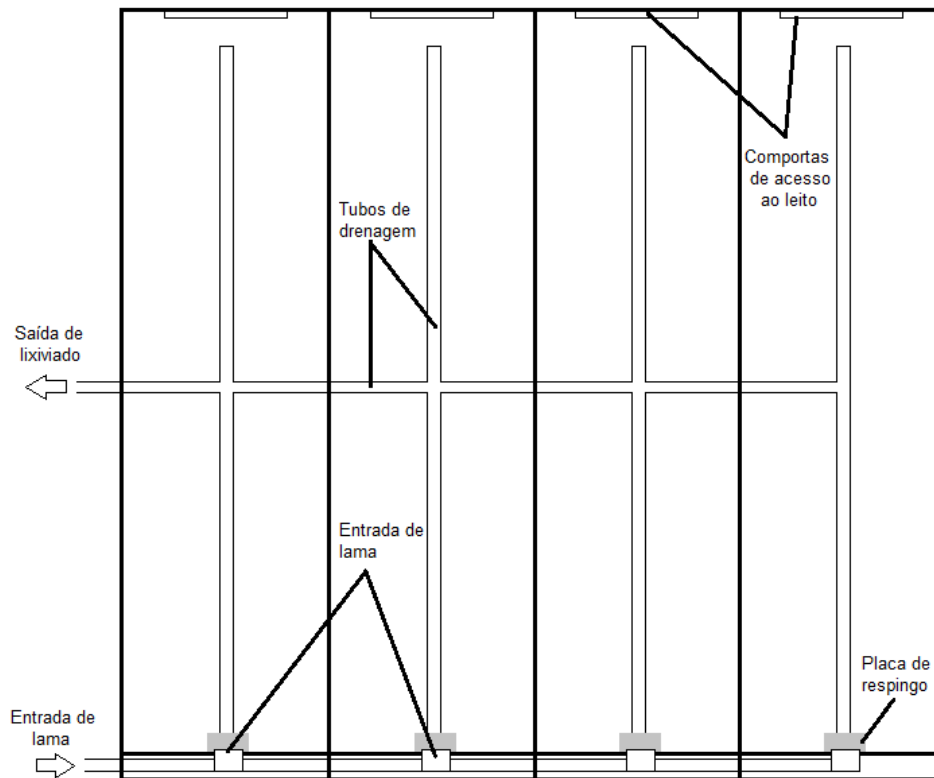


Figura 8 – Conjunto de leitos de secagem de lamas convencionais [11].

O número de leitos é definido de acordo com as quantidades de lama a se desidratar e da espessura da camada de lama a se utilizar. Geralmente é construído um leito a mais do que o calculado, isso serve para situações de imprevistos.

2.6.4 Sistema de drenagem

O sistema de drenagem serve para retirada do efluente que foi percolado através do meio drenante, este sistema, exposto na Figura 8, deve captar o efluente igualmente, para isso é utilizado tubos, com pequenos furos, transversais que se conectam a um tubo principal. Os tubos devem ser cobertos por brita e ter declive mínimo de 1% para escoamento do líquido, os diâmetros não devem ser menores do que 100 mm e também os tubos não devem ficar a uma distância entre eles maior do que 6 m [11].

2.6.5 Meio drenante

O meio drenante, ou meio de enchimento, serve de suporte para a camada de lama e também é responsável pela percolação da água existente nas lamas ou água de precipitação. Para um efetivo sistema de separação da parte sólida da líquida, o meio drenante deve conter granulometrias e materiais adequadas nas diferentes camadas, isso evita colmatção e conseqüentemente um mau funcionamento do sistema [10].

O perfil do meio drenante de um leito de secagem, segundo Matcalf & Eddy [11], deve conter, de cima para baixo, um camada de 200 a 300 mm de areia com granulometria entre 0,3 e 0,75 mm, uma de 75 mm de brita fina, outra de 75 mm de brita média e ainda uma última com 75 a 150 mm de brita grossa. Outros autores apresentam outras granulometrias diferentes, um exemplo está na Figura 9.

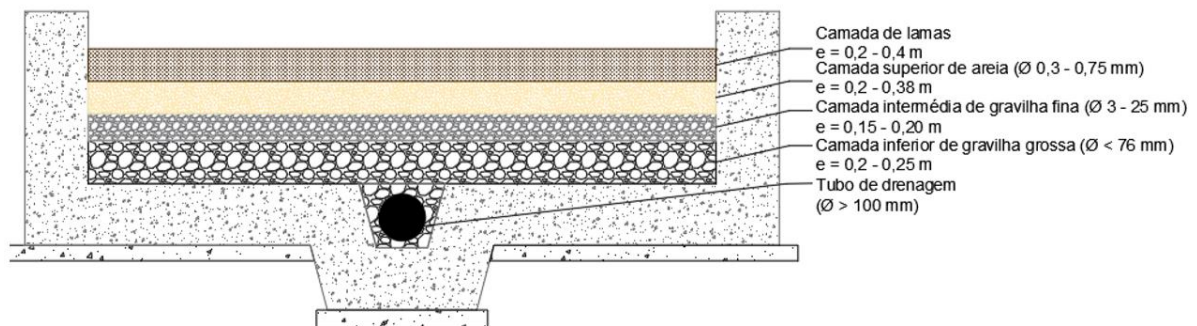


Figura 9 – Conjunto de leitos de secagem de lamas convencionais [17].

Em alguns casos se utiliza uma camada de tijolos entre a camada de lama e a de areia, isso facilita a operação da remoção da lama seca, propiciando uma menor remoção da camada de areia. Além disso, ajuda na distribuição uniforme da lama para todo o leito, sem que em alguns pontos a camada de areia se deforme [18].

2.6.6 Operação

Embora os leitos de secagem possuam uma operação simples, alguns cuidados devem ser tomados. Também existem algumas maneiras de otimizar ou implementar o processo.

A não ser que seja a primeira utilização dos leitos de secagem, os mesmos exigem uma preparação para o início de um novo ciclo, essa preparação consiste em retirar materiais remanescentes dos ciclos passados, adição de areia para completar a camada superficial caso tenha tido perdas da mesma e também seu nivelamento. É recomendado substituir regularmente a camada de areia para minimizar o processo de colmatação.

Após a limpeza, as lamas são introduzidas para o interior dos leitos, ou por bombagem, que deve ser controlada por válvulas a fim de evitar danos a camada superficial do meio de preenchimento, ou por canais abertos, que por gravidade levam a lama até os leitos, pequenas lajes de concreto devem ser construídas sob as entradas para evitar também danos ao meio drenante, como é mostrado na Figura 8. As tubagens de alimentação dos leitos de secagem, prioritariamente devem ser confeccionadas de ferro fundido ou plástico resistente [10].

Após alguns dias de exposição ao clima as lamas podem ser revolvidas, esse processo pode ser feito manualmente ou com auxílio de máquinas. Esse revolvimento busca, segundo Metcalf & Eddy [11], uma melhor evaporação, já que uma crosta superior é formada dificultando a interação da umidade do interior da camada de lama com o ambiente.

Ao fim do processo a lama deve ser retirada, e esse processo também pode ser feito de forma braçal ou com auxílio mecânico. Essa lama é transferida para um meio de transporte onde receberá seu devido destino.

Algumas artimanhas podem ser utilizadas a fim de otimizar o processo, como por exemplo:

- Aplicação de condicionadores químicos para aumentar o volume de água livre e conseqüentemente agilizar a drenagem quando um volume inesperado de lama necessita de desidratação [19];
- Em períodos chuvosos adicionar uma cobertura aos leitos [20];
- Aplicar camadas de diferentes espessuras em diferentes épocas para atender a condições meteorológicas [10].

Em um estudo feito para avaliar a viabilidade econômica do tratamento de lamas por meio de leitos de secagem ao invés de filtro prensa, chegou-se à conclusão

de que haveria uma redução de custos mensais de R\$ 24.000,00 para R\$ 8.650,00, correspondente apenas a operação [21].

2.6.7 Processo

O tempo de permanência das lamas em leitos de secagem depende das características, condições climáticas e da espessura da camada de lama a se aplicar. A maioria dos autores, incluindo Metcalf e Eddy [11], dizem que as camadas de lamas a serem aplicadas em cada ciclo devem conter espessuras entre 200 e 300 mm, mas segundo Turovskiy & Mathai [17], 400 mm de lama também podem ser utilizadas mediante condições meteorológicas favoráveis. A determinação da espessura da camada de lama a se adotar se deve a fatores como volume da mesma a se tratar e a duração do ciclo, camadas com maiores dimensões demoram mais para secar e devido ao longo tempo é prejudicial à manutenção dos leitos, porém secam uma maior quantidade de material e requerem menos trabalho operacional.

O processo de desidratação por meio dos leitos acontece inicialmente, prioritariamente, por percolação. O volume de efluente retirado por percolação vai diminuindo de acordo com o decaimento do percentual de água livre, à medida que essa parcela de água vai se esgotando as partículas sólidas da lama vão se depositando na camada superficial de areia colmatando a mesma, nesse momento a lama adota uma consistência pastosa [18].

Em alguns ciclos a drenagem pode ocorrer de forma mais rápida do que em outros, quando isso é observado, ou seja, quando a água é drenada rapidamente num curto período, ao final do processo as lamas tendem a apresentar valores de Teor de Sólidos (TS) uniformes em toda a camada. Quando o inverso acontece e a drenagem ocorre lentamente, observa-se valores de TS variados em diferentes profundidades da camada de lama [10].

Após os primeiros dias, o principal meio de retirada de umidade da lama é por evaporação através da superfície de contato da lama com o ambiente. A maioria dos autores sugerem que o processo continue até que valores de TS estejam próximos aos 30% e Andreoli et al [18] sugere que as lamas não devem permanecer nos leitos quando os valores de TS superarem os 35%, isso porque segundo o autor o demasiado tempo de permanência das lamas nos leitos pode promover o crescimento

de vegetação que atrapalha a remoção das lamas secas. Com condições meteorológicas favoráveis, depois de 10 a 15 dias do início do processo, valores de 60% de remoção de umidade devem ser observado [11]. Conseqüentemente a remoção de água das lamas, os volumes das mesmas também diminuem, apresentando valores entre 50 e 80% de redução [22].

As ocorrências de alguns eventos acontecem ao decorrer do processo, como a formação de uma camada seca e dura na superfície da lama exposta a maior radiação solar, essa casca dificulta a entrada da radiação solar ao interior da camada dificultando também a evaporação da água ali presente. Esse inconveniente pode ser desfeito através do revolvimento da camada de lama ou caso o mesmo seja inviável, segundo Bennamoun apud Lampreia, (2017) [10], o problema é amenizado à medida que o tempo passa e a desidratação proporciona a formação de fissuras superficiais, essas permitem então a entrada de radiação ao interior da camada, favorecendo a evaporação da água.

A incidência de precipitação sobre os leitos, afeta a desidratação maleficamente, visto que o intuito é a retirada de água do meio. A precipitação não altera uniformemente o processo ao longo do tempo, na fase inicial a água da chuva aumenta o Teor de Umidade (TH) da lama atrasando o processo, entretanto quando ocorre em fases mais avançadas, quando as lamas já apresentam um grau de desidratação visível e existam fissuras em sua superfície, a água é rapidamente drenada sem alterar significativamente o TH das lamas [10].

2.7 Modelação Matemática

O processo de desidratação de lamas em leitos de secagem envolve fenômenos de transferência de calor e massa. Em virtude da complexidade da interação desses fenômenos, se faz necessário adotar algumas considerações genéricas, como por exemplo, não considerar as trocas térmicas entre as lamas e as paredes laterais dos tanques. Também considerar que as lamas contêm as mesmas características ao longo da superfície e que no processo de evaporação a água é tratada ao todo como água livre, não considerando forças de capilaridade a que as moléculas de água sofrem. Relativamente ao sólidos, não se considera a perda de partículas ao decorrer do processo.

Deve-se considerar os leitos de secagem como sistemas fechados, denominados volumes de controle. A inserção de energia térmica no sistema faz com que a água mude do estado físico que se encontra (Líquido), para gasoso, no qual tende a atravessar as fronteiras do sistema e deixa-lo. Para a determinação do volume de água que sai do sistema, deve-se contabilizar a saída da água drenada, somada a água evaporada e diminuída a precipitação que adentra ao leito, esse cálculo é denominado balanço hídrico.

2.7.1 Balanço Hídrico

As três formas de movimentação da água entre o volume de controle e o ambiente externo podem ser mensuradas, para isso a massa inicial de água no volume de controle deve ser determinada, isso pode ser feito a partir do volume da camada de lama, do valor aproximado da massa volúmica e também do Teor de Sólidos (TS) da mesma. O valor aproximado para massa volúmica de lamas estabilizadas é entre 1007 e 1020 kg.m⁻³ [11].

O cálculo da entrada de água ao sistema proveniente de precipitações pode ser feito, de forma simples, a partir da multiplicação da altura de água precipitada pela área superficial do tanque. De forma também simples, a água drenada pode ser mensurada por recipientes com escala volumétrica, na saída do sistema. A terceira forma de movimentação da água, a evaporação, é a mais complicada de ser estimada, essa depende da interação de fenômenos de transferência de calor e massa.

2.7.2 Transferência de Calor e Massa

A transferência de calor, segundo Incropera, et al. [23], “é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”. Sempre que existir diferença de temperatura entre extremidades de um mesmo objeto, ou entre dois objetos separados, haverá transferência de calor.

Existem três tipos de transferência de calor, a condução, a convecção e a radiação. A condução acontece quando há um gradiente de temperatura em um sólido ou em um líquido, esse meio tende a ficar por completo a uma única temperatura em

todo o seu volume. A convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, onde necessariamente deve existir uma diferença de temperatura. Por último, a troca de calor por radiação, essa não necessita de um meio material para se propagar e todas as superfícies sólidas, líquidas e os gases, emitem e absorvem radiação térmica [23].

A partir da lei de Stefan-Boltzmann, Equação (1), é possível determinar a taxa de emissão de radiação (q''_{rad} , unidade W) de um corpo negro. A constante de Stefan-Boltzmann (σ), cujo valor é $5,675 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$, a temperatura da superfície em questão levantada a quarta potência (T_{sl}^4 , unidade K^4) e a área de troca de calor do elemento (superfície da camada de lama) (A_s , unidade m^2) aparecem na equação.

$$q''_{rad} = \sigma \times T_{sl}^4 \times A_s \quad (1)$$

Os corpos negros possuem coeficiente de emissividade igual a 1, outros materiais não são emissores perfeitos e seu coeficiente, portanto é menor do que 1. Cada material possui um coeficiente de emissão (ϵ , adimensional) e um de absorção (α , adimensional) próprio, com esses valores podemos encontrar a taxa de emissão por radiação ($q''_{emissão}$, unidade W) ou a taxa de absorção por radiação ($q''_{absorção}$, unidade W) referentes a cada um, acrescentando-os a Equação (1), como pode ser visto na Equação (2) e Equação (3).

$$q''_{emissão} = \epsilon \times \sigma \times T_{sl}^4 \times A_s \quad (2)$$

$$q''_{absorção} = \alpha \times \sigma \times T_{sl}^4 \times A_s \quad (3)$$

Na literatura não se encontra um valor para os coeficientes de absorção ou emissão das lamas, sendo assim os valores para solos minerais terrestres devem se aproximar devido à proximidade de cor. Segundo Martinez Apud Lampreia [10], os valores de absorvidade da radiação solar para os solos minerais terrestres são de 0,4 a 0,8 e o valor para emissividade varia entre 0,6 e 0,9.

A taxa de transferência de calor por convecção ($q''_{convecção}$, unidade W) aderida a desidratação de lamas acontece entre um fluido em movimento, no caso o ar, e uma superfície, que é a lama. Por convenção, o calor transferido por convecção entre o ar e as lamas é calculado considerando convecção natural através de placas horizontais.

A taxa de transferência de calor entre esses dois elementos pode ser calculada pela lei de Newton do arrefecimento, Equação (4), onde aparece o coeficiente de troca de calor por convecção (h , unidade $W.m^{-2}.K^{-1}$), a área superficial (A_s , unidade m^2) entre a lama e o ambiente e a diferença de temperatura (ΔT , unidade K) da superfície da lama (T_{sl} , unidade K) e do ambiente (T_{ar} , unidade K ou $^{\circ}C$).

$$q''_{convecção} = h \times A_s \times (\Delta T) \quad (4)$$

O coeficiente h define uma relação de proporcionalidade entre o fluxo de calor, a área superficial onde ocorre a troca de calor, e a ΔT [24]. Para convecção natural, o h pode ser determinado pela Equação (5), onde relaciona o número de Nusselt (Nu , adimensional), condutividade térmica (k , unidade $W.m^{-1}.K^{-1}$) do fluido e o comprimento da superfície (L_c , unidade m), que é A_s dividida pelo Perímetro da superfície (P_s , unidade m), Equação (6).

$$h = \frac{k}{L_c} \times Nu \quad (5)$$

$$L_c = \frac{A_s}{P_s} \quad (6)$$

O número de Nusselt é um coeficiente adimensional médio de troca de calor por convecção. Esse coeficiente é encontrado, como pode ser visto na Equação (7), relacionando o número de Prandtl (Pr , adimensional), que segundo Braga Filho [24], “é definido como a razão entre a difusão de momentum e a difusão térmica para o fluido em repouso ou durante escoamento laminar”, e o número de Rayleigh (Ra , adimensional). O número de Prandtl está entre a faixa de 0,7 a 1 para gases, o que é o caso nos leitos de secagem, que trocam calor com o ar [24].

$$Nu = 0,679 \times \frac{Pr}{(0,952 + Pr)^{\frac{1}{4}}} \times (Ra)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Para a determinação do número de Rayleigh, deve-se multiplicar o número de Prandtl e o número de Grashof (Gr , adimensional), Equação (14). Esse número é

adimensional e está em função do empuxo, forças viscosas e força de inércia. A Equação (8) mostra como o número de Grashof é calculado.

$$Gr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times L_c^3}{\vartheta^2} \quad (8)$$

Nesta expressão, g é a aceleração da gravidade em $m.s^{-2}$, ϑ a viscosidade cinemática do fluido dada em $m^2.s^{-1}$, no caso o ar, e β o coeficiente de expansão volumétrica [K^{-1}], esse coeficiente pode ser calculado, para o ar, como mostra a Equação (9), considerando o ar como um gás perfeito. A unidade de β é K^{-1} , ou seja, a temperatura (T) deve ser atribuída em Kelvin.

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (9)$$

Com a transferência de calor para o interior dos leitos, a água contida na lama tende a mudar de estado físico, passando de líquida para vapor. Essa mudança de estado requer uma taxa de transferência de energia, que depende da massa do material (m , unidade kg), da entalpia do material (ΔH , unidade $J.kg^{-1}$) e da variação de temperatura da camada de lama e do ar. A Equação (10) mostra a taxa de energia descrita anteriormente. A transferência de energia gera uma transferência de massa de água do interior do tanque para o ambiente.

$$q''_{transição} = \frac{m \times \Delta H}{\Delta T} \quad (10)$$

Reescrevendo a Equação (10) encontramos a massa de água potencialmente evaporada. A Equação (11) mostra a equação anterior reescrita.

$$m = \frac{q''_{transição} \times \Delta T}{\Delta H} \quad (11)$$

A taxa de transferência de calor de transição ($q''_{transição}$, unidade W), é a soma de todas as taxas de transferência de calor anteriormente descritas, assim como é mostrado na Equação (12).

$$q''_{transição} = q''_{absorção} - q''_{emissão} \pm q''_{convecção} \quad (12)$$

A temperatura da superfície das lamas (T_{sl} , unidade K) depende da temperatura do ar, a Equação (13) mostra como isso é calculado segundo a literatura [25]. Adotou-se a temperatura de 2 centímetros da superfície, visto que a parte superficial é onde ocorre a evaporação.

$$T_{sl} = -4,56 + 1,36T_{ar} \quad 13)$$

3.2 Amostragem

As amostras foram coletadas da saída de lamas mistas da estação de tratamento de efluentes. Foram coletados, aproximadamente, 2 m³ de lama com um caminhão tanque e em seguida essa lama foi transferida para o interior dos tanques. Foi adicionado a cada leito as quantidades pré-determinadas (Tabela 1).

Tabela 1 – Quantidade de lamas em cada leito de secagem.

Leito	Quantidade de lama (m³)
1	0,2
2	0,2
3	0,3
4	0,3
5	0,2
6	0,2

3.3 Montagem da Estação de Tratamento de Lamas Por Leitos de Secagem

A estação de tratamento foi composta por 6 leitos, genericamente chamados de tanque 1, tanque 2 e assim sucessivamente, todos expostos ao ambiente sem qualquer edificação próxima, a fim de garantir que os fenômenos meteorológicos não sofressem interferências.

3.3.1 Tanques

Para a elaboração dos leitos de secagem foram utilizados tanques com 1 metro quadrado de base e 1 metro de altura, de material impermeável, sem tampa, e com apenas uma saída na parte inferior, por onde foi captado o lixiviado em galões de 25 litros. No centro de cada tanque foi introduzido uma barra de ferro com escala métrica para a realização da medida da altura da camada de lama. A Figura 11 ilustra um dos tanques, todos foram instalados com uma leve inclinação, voltada para a saída, a fim de garantir o direcionamento do efluente lixiviado até a mesma.

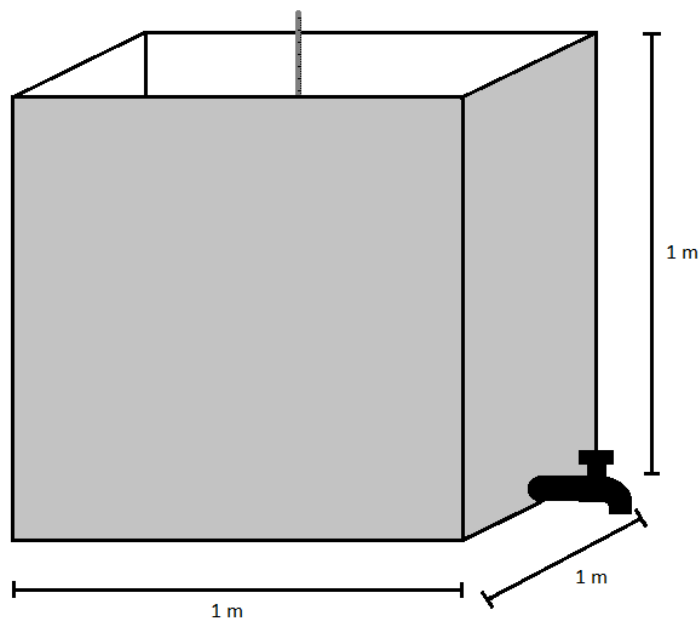


Figura 11 – Tanque utilizado para construção dos leitos.

3.3.2 Leito Drenante

Após a acomodação dos tanques no terreno foram adicionados os materiais constituintes do leito drenante, fazendo-se adaptações [17]. Foram construídos 2 diferentes tipos de leitos, variando entre eles os materiais. Do tanque 1 ao tanque 4 foram utilizadas duas granulometrias de brita (8-12 mm e 20-32 mm) e uma de areia (Até 0,6 mm), e no tanque 5 e 6 duas granulometrias de brita (8-12 mm e 20-32 mm), e uma camada de resíduos de cortiça picado (Figura 12).



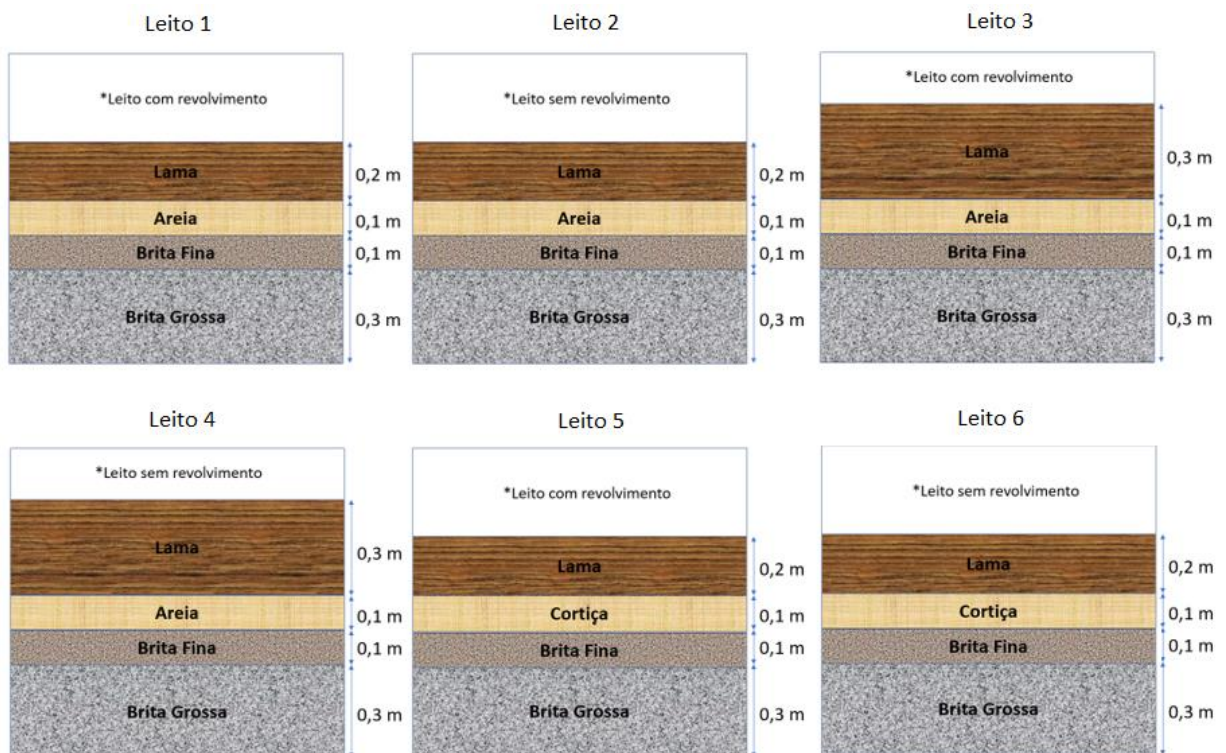
Figura 12 – Leitos drenantes.

3.4 Ensaios

Dentro do mesmo período, cada tanque teve sua própria configuração, diferenciando-se dos demais: No leito drenante, quantidade de lama ou camada de lama com ou sem revolvimento.

Os tanques 1 e 2 eram, de forma geral, iguais. Acima da camada drenante foram adicionados 0,2 m de lama em cada um. O que diferenciava esses dois tanques é que o tanque 1 tinha revolvimento da camada de lama e o tanque 2 não. Esse revolvimento foi feito diariamente no mesmo horário, com o auxílio de um mastro de metal, e tinha como intuito a mistura da parte superficial da lama que tende a ficar mais seca do que o restante.

Do mesmo modo, o tanque 3 e 4 também eram iguais na montagem, recebendo cada um 0,3 m de lama, diferenciando-se na operação, onde o tanque 3 recebeu e o tanque 4 não o revolvimento. Os tanques 5 e 6 também seguiram o padrão e receberam 0,2 m de lama cada. Tudo isso é melhor observado na Figura 13.



* Leito com ou sem revolvimento durante os ensaios.

Figura 13 – Configuração dos leitos de secagem para ambos os ciclos.

Os ensaios foram realizados de acordo com a Tabela 2. O tratamento feito no tanque 1 no primeiro ciclo recebeu o nome de T1 - 1, o T significa tratamento e o número após a letra significa o leito, seguido do número que representa o ciclo. Por exemplo, T5 - 2 quer dizer tratamento do leito 5 no segundo ciclo. Para o ciclo 2, os tanques 5 e 6 tiveram a substituição da camada de cortiça por areia, as causas serão explicadas na seção de resultados.

Tabela 2 – Planejamento experimental.

Tratamento	Leito	Material
T1 - 1	1	Areia e Britas
T2 - 1	2	Areia e Britas
T3 - 1	3	Areia e Britas
T4 - 1	4	Areia e Britas
T5 - 1	5	Cortiça e Britas
T6 - 1	6	Cortiça e Britas
T1 - 2	1	Areia e Britas
T2 - 2	2	Areia e Britas
T3 - 2	3	Areia e Britas
T4 - 2	4	Areia e Britas
T5 - 2	5	Areia e Britas*
T6 - 2	6	Areia e Britas*

* No ciclo 2 a camada de cortiça dos tanques 5 e 6 foram substituídas por areia, o motivo é debatido na seção de resultados e discussões.

3.5 Coleta, Análise dos Parâmetros de Qualidade e Parâmetros de Controle

Os parâmetros de qualidade analisados foram, sólidos totais (ST) das lamas, sólidos suspensos totais (SST) do lixiviado, Coliformes Totais (CT) das lamas, Carência Química de Oxigênio (CQO) do lixiviado, pH das lamas e pH do lixiviado.

Os volumes de amostras para análises laboratoriais foram coletados de acordo com os dias da semana, a rotina de análises e quantidades a serem coletadas estão expostas na Tabela 3, para as lamas, e na Tabela 4, para o lixiviado.

As amostras foram coletadas do meio da camada de lama, adicionando-as em tubos de 55 mL. Logo em seguida os tubos foram levados para o Laboratório de Processos Químicos (LPQ) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança

- ESTiG no IPB, onde imediatamente todas as análises foram realizadas, exceto aos sábados e domingos, que foram mantidas refrigeradas até que pudessem ser feitas na segunda-feira.

A coleta do lixiviado foi feita a partir dos galões coletores da saída dos tanques. Foram transferidos 300 mL do líquido para frascos e levados para os devidos procedimentos laboratoriais. Todos os ensaios foram realizados em triplicata, exceto os sólidos totais das lamas e sólidos suspensos totais do lixiviado, que foram feitos em duplicata, devido a indisponibilidade da quantidade necessária de utensílios laboratoriais para tal.

Tabela 3 – Rotina de análises laboratoriais das lamas e quantidades coletadas em cada dia da semana

Parâmetro	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
ST	110 mL	110mL	110mL	110mL	110mL	110mL	110mL
pH	-	-	110mL	-	-	-	-
CT	-	-	55mL	-	-	-	-
Total	110mL	110mL	275mL	110mL	110mL	100mL	100mL

Tabela 4 – Rotina de análises laboratoriais dos lixiviados e quantidades coletadas em cada dia da semana

Parâmetro	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
SST	-	100mL	-	-	100mL	-	-
pH	-	197,5mL	-	-	197,5mL	-	-
CQO	-	2,5mL	-	-	2,5mL	-	-
Total	0	300mL	0	0	300mL	0	0

Além das análises de qualidade, foram realizadas medições do volume de lixiviado e diminuição da espessura da camada de lama. A medição do volume de lixiviado, referente aos galões coletores, foi feita através de uma proveta graduada de 1 litro, diariamente nos mesmos horários das demais coletas, após essa medição o líquido foi descartado. Com a escala métrica do interior dos leitos, foram feitas as medições da diminuição da camada de lama, também observando para cada dia, no mesmo horário o quanto a escala apontava.

As análises dos parâmetros de qualidade em laboratório foram executadas seguindo a metodologia que descreve Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998) [26], exceto para coliformes totais que foi utilizado a metodologia descrita pela ISO 9308-1 (2014) [27].

Todos os dados meteorológicos foram fornecidos pela estação meteorológica do IPB, são eles: Temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e pluviosidade. Esses dados são horários.

3.6 Modelação Matemática

3.6.1 Geral

A modelação matemática foi feita a partir dos dados meteorológicos referentes ao período em questão de cada ciclo, utilizando as equações convenientes (Figura 15) para determinação do volume de água potencialmente evaporada dos leitos, para cada dia, e também a partir dos dados experimentais para a determinação do volume de água drenado inicial e drenado relativamente à precipitação. Ao estimar o volume de água perdido pelo leito, seja ele drenado ou evaporado, e sendo conhecida a massa inicial de sólidos presente no leito, podemos estimar a massa de sólidos e a espessura da camada de lama para cada dia. As unidades e valores dos parâmetros e constantes utilizados para a modelação se encontram no Anexo I, as constantes utilizadas foram para a temperatura de 15 °C, a fim de facilitar os cálculos, visto que os valores não mudam significativamente para temperaturas diferentes.

A Figura 14 mostra o fluxograma das folhas de cálculo criadas para a elaboração da modelação (Anexo II). Primeiramente os dados meteorológicos (umidade relativa, radiação solar, temperatura e precipitação) referentes ao período foram introduzidos no Excel, na Folha de Cálculo A, posteriormente alguns desses dados eram utilizados para determinação da água potencialmente evaporada (Folha de Cálculo B), são eles a radiação solar, a temperatura e também a umidade relativa. A precipitação foi utilizada na Folha de Cálculo D, que também incorpora os valores da concentração inicial de teor de sólidos da lama (TS) determinados em laboratório, da camada de lama referente ao leito e também aos dados da Folha de Cálculo C (fatores de multiplicação; ver explicação nas secções seguintes). A Folha de Cálculo D foi o último passo da modelação, e permite calcular o TS e espessura da camada de lama ao longo do experimento.

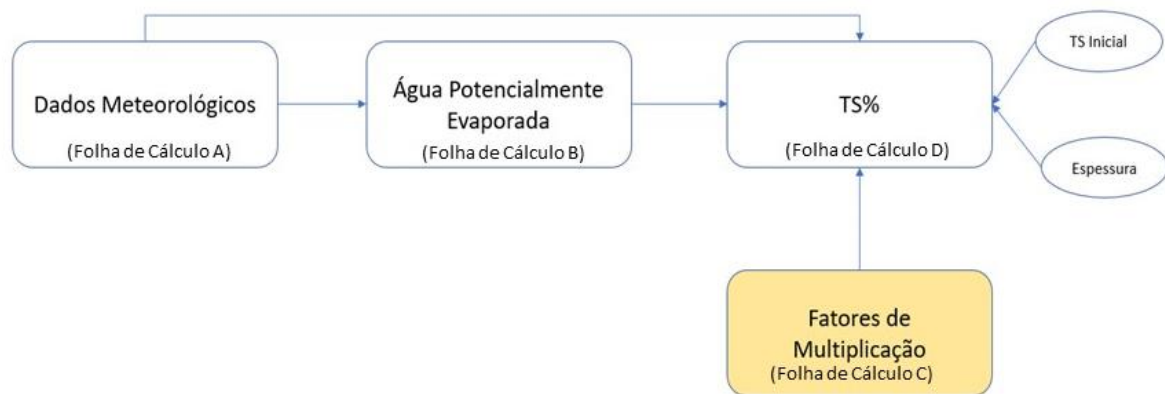


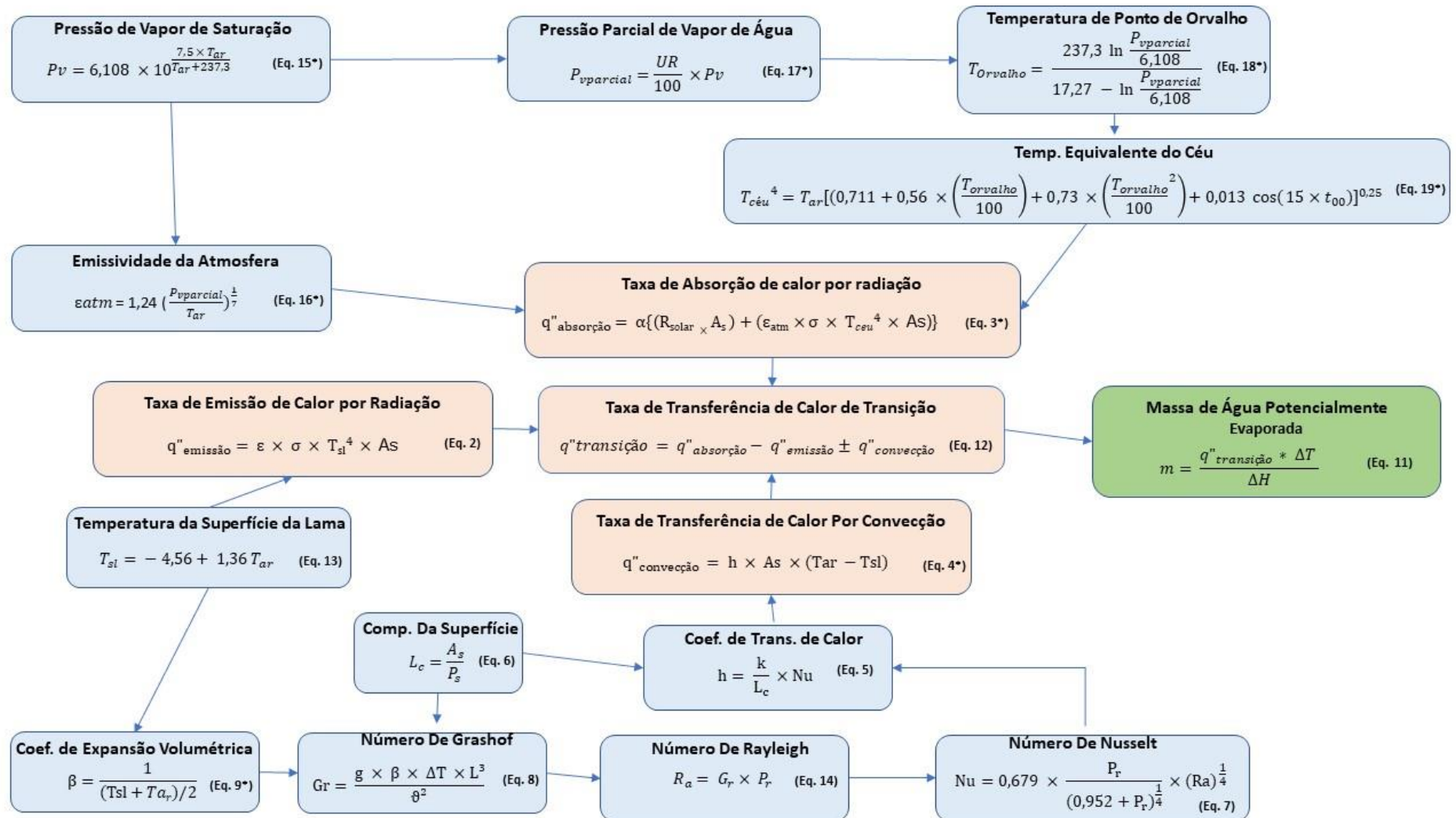
Figura 14 – Etapas do processo de modelação

Os dados experimentais serviram para a elaboração do modelo obtido. A modelação foi feita em 5 estágios, sendo que, nas secções seguintes, se apresenta uma descrição detalhada para cada um deles.

3.6.2 Água Potencialmente Evaporada

A partir dos dados meteorológicos de cada período, foi determinado o volume de água potencialmente evaporada (Anexo II, Folha de Cálculo B). Um conjunto de equações de transferência de calor e de massa foram utilizadas, de modo a obter a massa de água evaporada.

A Figura 15 mostra o esquema utilizado na Folha de Cálculo B; uma explicação detalhada das equações pode ser encontrada no Capítulo 2.7.2, sendo que foram feitas algumas modificações, de forma a relacionar os dados meteorológicos com as mesmas.



Obs: * Representa as equações que foram alteradas para relacionar os fatores climáticos as mesmas.

Figura 15 – Fluxograma do balanço energético

Na Equação (12), a taxa de absorção de calor por radiação ($q''_{\text{absorção}}$, unidade W) refere-se à quantidade de energia que as lamas absorvem, ou seja, é a energia que é adicionada ao sistema; Taxa de emissão de calor por radiação ($q''_{\text{emissão}}$, unidade W) diz respeito a radiação que é emitida pelas lamas, portanto energia que deixa o sistema; Taxa de transferência de calor por convecção ($q''_{\text{convecção}}$, unidade W) gera seu próprio sinal, visto que a Equação (4*) gera resultados com sinais positivos ou negativos de acordo com a interação do ambiente com a lama. Se a variação de temperatura (ΔT , unidade °C) for mantida sempre como a diferente entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície de lama ($T_{\text{ar}} - T_{\text{sl}}$), os valores são positivos quando o sistema recebe calor e negativo na situação oposta. Por exemplo, nas situações em que a temperatura ambiente é menor do que a da camada de lama, a energia tende a sair do sistema, e no caso, o ΔT da equação faz com que o valor obtido para $q''_{\text{convecção}}$ seja negativo, fazendo assim com que a subtração ocorra na Equação (12). A Equação (13) foi abordada de uma apresentação de aula [25].

Na Equação (3), aplicando as modificações necessárias para que a Temperatura do Ar (T_{ar}), Umidade Relativa do Ar (UR, unidade %) e a Radiação Solar (R_{solar} , unidade W) pudessem ser relacionadas, foi obtida a Equação (3*). Para isso, as Equações 15*, 16*, 17*, 18* e 19* foram utilizadas, onde esses fatores ambientais, anteriormente referidos, foram utilizados [10].

Segundo Berdahl e Martin [28], a variável tempo a partir da meia noite (t_{00}), dada em horas, da Equação (19*), corresponde ao número de horas desde a meia noite até a hora em que se pretende determinar a temperatura equivalente do céu ($T_{\text{céu}}$). Este valor não influencia significativamente o volume de água evaporada, pelo que se adotou uma constante de 18 horas. Na Equação (2), para o coeficiente de emissão (ϵ) foi utilizado um valor de 0,6 e para o de absorção (α) 0,8.

Aplicando essa série de equações para cada dia de cada ciclo, pode-se obter o volume de água potencialmente evaporada.

3.6.3 Água Drenada Relativamente à Água Inicial do Sistema

Usando os dados do primeiro ensaio experimental, foi estimada a percentagem de água que é drenada por dia relativamente à água inicial do sistema (até ao 10º dia

já se havia registrado, aproximadamente, 60% da drenagem de água sem que tenha ocorrido pluviosidade. Esta estimativa foi usada para o segundo ensaio experimental, para a componente água drenada face a água inicial do sistema, a que acresce uma nova variável para estimar o volume de água drenada em função da pluviosidade. O volume médio da água drenada (relativo ao volume inicial de água) por dia foi obtido com leitos cuja espessura da camada de lama é igual.

Na prática, para os tanques 1, 2, 5 e 6, com igual espessura da camada de lama, foi determinado o valor médio do volume de água drenada no primeiro dia e a % que represente face ao valor inicial, e assim sucessivamente para os dias restantes. Desta forma, para 30 dias, foram obtidos fatores que facilmente podem ser multiplicados pelo volume inicial de água do ciclo, de modo a obter o volume de água drenada por dia - fatores de multiplicação (1), que constam na Folha de Cálculo C, Anexo II.

3.6.4 Água Drenada Relativamente à Água Precipitada Sobre o Leito e Água Evaporada Real do Sistema

Como a água que deixava o sistema relativa à água inicial foi estimada, a drenagem da água precipitada sobre o leito pode ser mais facilmente estimada, e da mesma forma que a saída de água por evaporação, foi modelada a partir de análise gráfica.

Foram feitos gráficos dos teores de sólidos experimental e também dos teores de sólidos teóricos. A modelação seguiu o princípio de que as duas curvas deveriam ficar o mais próximo possível entre elas e entre os tanques de mesma espessura de lama, independente o ciclo. Para isso dividiu-se o teor de sólidos em intervalos, onde para cada um deles, fatores de multiplicação para drenagem (fator de multiplicação 2) e para evaporação (fator de multiplicação 3) foram atribuídos de modo a aproximar a curva teórica à experimental.

Foram criadas tabelas no Excel (Figura 16), onde de forma automatizada o teor de sólidos era atualizado, utilizando os fatores de multiplicação de acordo com o teor de sólidos do dia anterior. Por exemplo, se o teor de sólidos do dia 1 fosse de 4%, a modelação utilizava para o dia 2 os fatores de multiplicação referentes a faixa de teor de sólidos em questão, e se por exemplo para o dia 2 o teor de sólidos passasse a

ser 15%, a modelação utilizava para o dia 3 os fatores de multiplicação da faixa onde esses 15% estava inserido e assim sucessivamente.

20 Cm - Com Revolvimento											
dia	Entrada de Água	Saída de Água					Massa de água (kg)	Massa de Sólidos (kg)	Massa de Lama (kg)	Espessura da Camada de Lamas (cm)	TS%
	Precipitação (L)	Drenada (L)	Fator de Multiplicação	Evaporada Potencial (L)	Evaporada Real (L)	Fator de Multiplicação					
							192,55	9,45	202	20	4,68
1	0,00	48,14	1,00	8,64	7,78	0,90	136,63	9,45	146,09	15	6,47
2	0,00	38,51	0,70	8,46	3,38	0,40	94,74	9,45	104,19	11	9,07
3	0,00	19,25	0,70	8,27	3,31	0,40	72,18	9,45	81,63	9	11,58
4	0,00	9,63	0,40	8,04	2,41	0,30	60,14	9,45	69,59	8	13,58
5	0,00	6,74	0,40	7,87	2,36	0,30	51,04	9,45	60,49	7	15,63
6	0,00	2,89	0,40	7,26	2,18	0,30	45,98	9,45	55,43	6	17,06
7	0,00	1,93	0,40	6,05	1,82	0,30	42,23	9,45	51,69	6	18,29
8	0,20	1,04	0,40	7,04	2,11	0,30	39,28	9,45	48,73	6	19,40
9	0,00	0,96	0,40	6,49	1,95	0,30	36,37	9,45	45,82	5	20,63
10	15,60	5,64	0,30	5,87	2,06	0,35	44,27	9,45	53,72	6	17,60
11	0,00	0,96	0,40	7,46	2,24	0,30	41,07	9,45	50,52	6	18,71
12	0,00	0,77	0,40	7,68	2,30	0,30	38,00	9,45	47,45	6	19,92
13	0,00	0,77	0,40	8,34	2,50	0,30	34,72	9,45	44,18	5	21,40
14	0,00	0,77	0,30	8,54	2,99	0,35	30,97	9,45	40,42	5	23,39
15	0,00	0,77	0,30	9,34	3,27	0,35	26,93	9,45	36,38	4	25,98
16	0,00	0,77	0,30	8,87	3,11	0,35	23,05	9,45	32,50	4	29,08
17	0,00	0,77	0,30	8,25	2,89	0,35	19,39	9,45	28,85	4	32,77
18	0,00	0,77	0,20	7,53	1,88	0,25	16,74	9,45	26,19	3	36,09
19	0,00	0,77	0,20	8,75	2,19	0,25	13,78	9,45	23,23	3	40,69
20	0,00	0,77	0,10	7,78	1,94	0,25	11,07	9,45	20,52	3	46,07
21	0,20	0,60	0,10	3,22	0,81	0,25	9,86	9,45	19,32	3	48,94
22	3,60	0,94	0,10	3,85	0,96	0,25	11,56	9,45	21,02	3	44,98
23	0,00	0,58	0,10	5,38	1,35	0,25	9,64	9,45	19,09	3	49,51
24	0,00	0,39	0,10	7,96	1,99	0,25	7,26	9,45	16,72	2	56,55
25	0,00	0,39	0,10	8,23	2,06	0,25	4,82	9,45	14,28	2	66,22
26	0,40	0,43	0,10	4,98	1,00	0,20	3,80	9,45	13,26	2	71,32
27	9,60	1,35	0,10	1,76	0,35	0,20	11,71	9,45	21,16	3	44,68
28	2,80	0,67	0,10	3,02	0,76	0,25	13,08	9,45	22,54	3	41,94
29	0,00	0,39	0,10	5,78	1,44	0,25	11,26	9,45	20,71	3	45,65
30	0,00	0,39	0,10	7,39	1,85	0,25	9,02	9,45	18,48	3	51,17

Figura 16 - Modelação de teor de sólidos (Folha de Cálculo D)

Cada célula da Figura 16 é melhor explicada na Figura 17. O teor de sólidos inicial das lammas deve ser determinado em laboratório e a partir da espessura da camada de lama inicial, a massa de lama pode ser determinada, já que as dimensões do tanque (1 m²) e a densidade média de lammas de depuração são conhecidos.

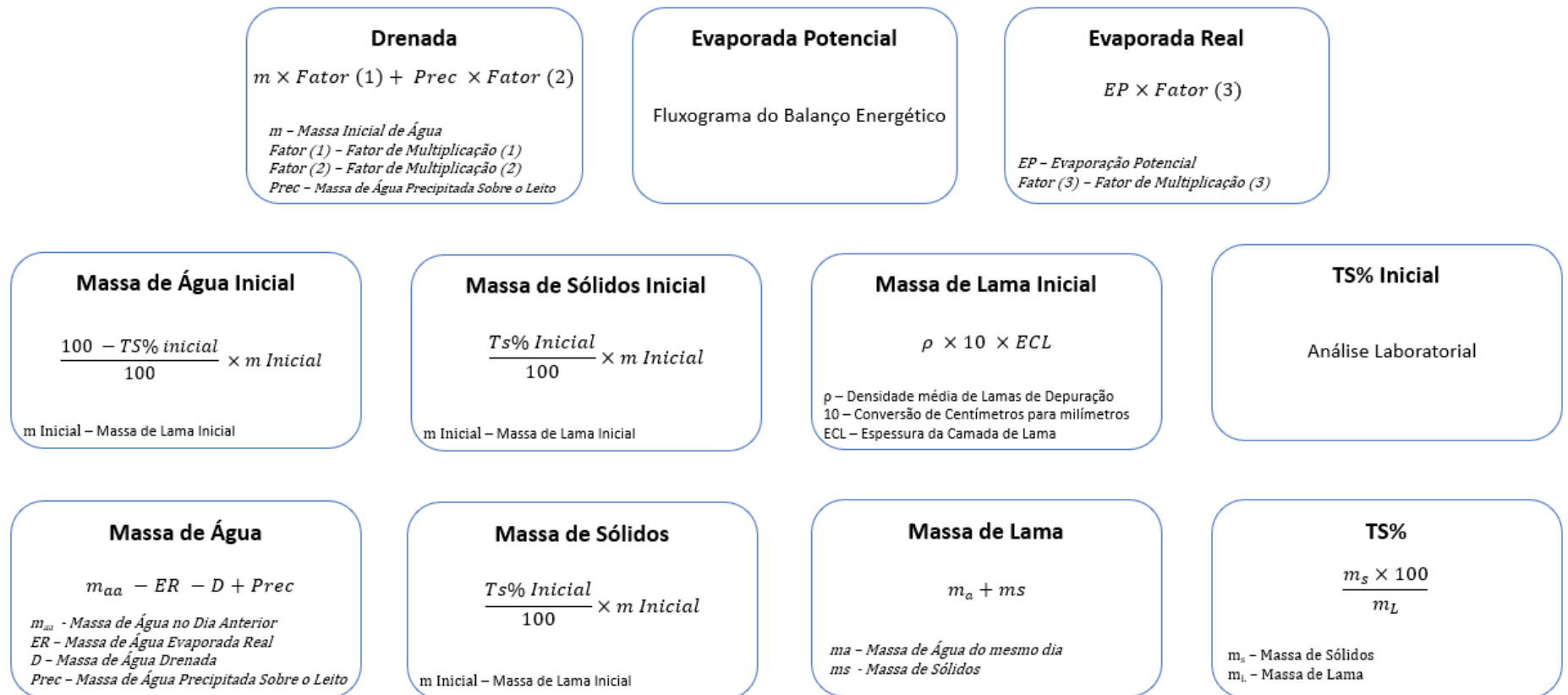


Figura 17 - Descrição das células do Excel

3.6.5 Espessura da Camada de Lama

Para estimar a espessura da camada de lama, a fim de verificar a redução de volume da mesma, foram utilizados o peso específico da água (ρ_a) e o peso específico dos sólidos (ρ_s) contido em lamas de depuração. Considerou-se que a massa de sólidos fosse a mesma ao longo do experimento e como anteriormente se estimou a massa de água que saia do sistema, sabia-se também a massa de água que restava nele, assim podendo determinar o volume que esses elementos ocupavam no tanque.

Como os tanques possuíam 1 m² de área da base, cada centímetro de altura da camada de lama corresponde a um volume de 10 litros. Dividindo a massa de água por seu peso específico e multiplicando por 10, para correção de unidades, encontra-se então o volume que a água ocupa no tanque e se os mesmos cálculos forem feitos para os sólidos, somando-os aos valores da água, encontra-se o volume da lama. Para correção dos valores, visto que uma quantidade de ar fica contido na camada de lama, adicionou-se 1 centímetro nos valores. A Figura 18 mostra a equação atribuída às células referentes a “Espessura da Camada de Lamas (cm)” da folha de cálculo do Excel utilizada para a modelação que é apresentada na Figura 16.

Espessura da Camada de Lamas

$$\frac{m_a}{\rho_a \times 10} + \frac{m_s}{\rho_s \times 10} + 1$$

m_a - Massa de Água no Dia
m_s - Massa de sólidos no Dia
ρ_a - Densidade da Água
ρ_s - Densidade dos Sólidos

Figura 18 - Célula do Excel "Espessura da Camada de Lamas"

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o presente estudo, esperou-se a obtenção de uma equação que retratasse a realidade, a qual pudesse indicar se uma região é favorável ou não para a utilização de leitos de secagem na desidratação de lamas. Também se esperava que a cortiça, um resíduo, promovesse benefícios ao lixiviado.

Neste capítulo os dados serão, primeiramente, explanados nas secções 4.1 e 4.2 para cada ciclo e, posteriormente, na secção 4.3 serão apresentados os resultados da modelação matemática. O eixo horizontal de todos os gráficos indica o dia do experimento.

Os resultados para coliformes totais não foram considerados no trabalho devido a erros de diluições nas determinações laboratoriais. Portando não foram obtidos dados quantitativos, porém foi possível observar que a concentração de coliformes totais diminuiu no final dos dois ciclos, já que inicialmente a quantidade de unidades formadoras de colônias era extremamente grande, sendo impossível a contagem das mesmas, enquanto no fim do experimento esse número era reduzido a poucas colônias.

4.1 Primeiro Ciclo de Desidratação

Os dados apresentados nessa secção são as médias dos resultados experimentais e são apresentados relativamente ao dia de experimento, ou seja, os dados iniciais correspondem ao dia 0, o dia 28/05 corresponde ao dia 1, o dia 29/05 ao dia 2 e assim sucessivamente. Todos os dados experimentais do ciclo 1 estão contidos no Anexo III.

4.1.1 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos (Tabela 5), com exceção da precipitação, no ciclo 1 foram calculados com média horária feita das 14 horas do dia anterior até as 14 horas do dia em questão. A precipitação foi calculada somando todos os valores horários do mesmo período referido anteriormente, que corresponde a 24 horas cada.

Tabela 5 - Dados meteorológicos do ciclo 1

Data	Dia	Temp. média (°C)	Humidade (%)	Precipitação (mm)	Radiação (W.m ⁻²)
28/mai	1	16,05	54,46	0	317,71
29/mai	2	18,58	55,08	0	318,04
30/mai	3	20,91	52,42	0	317,88
31/mai	4	22,94	47,92	0	315,83
01/jun	5	22,42	42,13	0	308,21
02/jun	6	21,33	43,42	0	283,08
03/jun	7	17,10	69,04	0	228,17
04/jun	8	12,07	69,29	0,24	251,46
05/jun	9	10,75	65,00	0	228,83
06/jun	10	10,14	78,29	18,72	205,71
07/jun	11	10,91	68,42	0	264,08
08/jun	12	15,01	58,96	0	280,63
09/jun	13	13,39	64,67	0	300,46
10/jun	14	14,58	54,33	0	310,29
11/jun	15	12,05	54,04	0	333,13
12/jun	16	12,98	57,04	0	318,63
13/jun	17	12,80	61,00	0	296,08
14/jun	18	13,29	64,29	0	271,42
15/jun	19	15,23	61,29	0	319,63
16/jun	20	18,89	54,38	0	294,50
17/jun	21	15,97	60,25	0,24	124,13
18/jun	22	15,95	83,83	4,32	146,54
19/jun	23	16,10	72,63	0	201,63
20/jun	24	16,87	66,88	0	295,50
21/jun	25	18,73	56,13	0	310,13
22/jun	26	19,48	56,71	0,48	196,46
23/jun	27	17,25	87,29	11,52	75,29
24/jun	28	14,52	88,00	3,36	113,33
25/jun	29	19,17	74,54	0	224,04
26/jun	30	21,35	66,50	0	288,04

4.1.2 Dados do Experimento

4.1.2.1 Volume Lixiviado

O volume lixiviado dos leitos, no ciclo 1, estão inseridos na Figura 19. Pode-se observar que os tanques com a mesma espessura de lama, são eles os tanques 1, 2, 5 e 6 com 20 cm e tanques 3 e 4 com 30 cm, possuem aproximadamente o mesmo volume de água drenado acumulado. Em certos dias, como por exemplo o dia 10, onde ocorreu precipitação de 18,72 mm, alguns tanques lixiviaram uma quantidade maior de água do que outros. Possivelmente os leitos onde ocorre um pico de saída de água possuem fissuras onde a mesma percorre em um caminho preferencial, esgotando-se mais facilmente, visto que os leitos com maior espessura de lama esse

pico não ocorre, já que possuem maiores quantidades de sólidos e dificultam a formação de fissuras com extensão até a camada drenante.

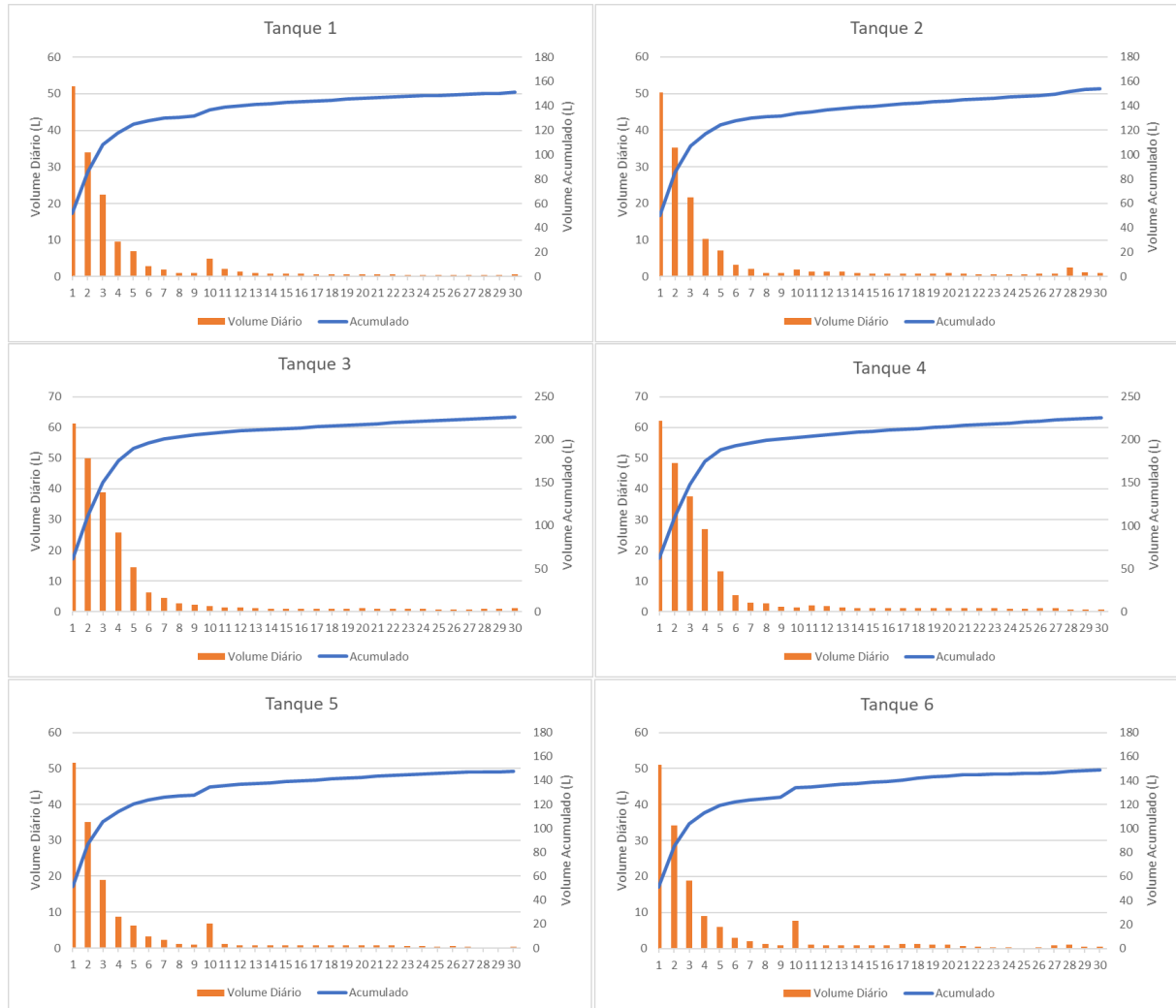


Figura 19 - Volume de água lixiviado experimental do ciclo 1

Cerca de 60-65% da água presente na lama, inicialmente colocada nos leitos, foi drenada nos primeiros cinco dias de experimento.

Nos primeiros 4 dias a medição do volume de lixiviado foi feita mais de uma vez no dia, visto que o volume de 25 litros dos galões que recolhiam o mesmo era inferior ao montante escorrido, já que no dia 1 os valores drenados ultrapassam 25 litros para todos os tanques, assim como no dia 2. Nos dias 3 e 4 apenas os leitos, cuja camada de lama era de 30 cm (leitos 3 e 4), necessitou a medição de volume mais de uma vez ao dia.

4.1.2.2 Teor de Sólidos (Lama)

O TS foi calculado a partir dos resultados que foram determinados de sólidos totais, fazendo-se a divisão dos mesmos pelo peso específico dos sólidos presente na lama ($1,3 \text{ g.cm}^{-2}$). A Figura 20 mostra os gráficos de teor de sólidos do ciclo 1.

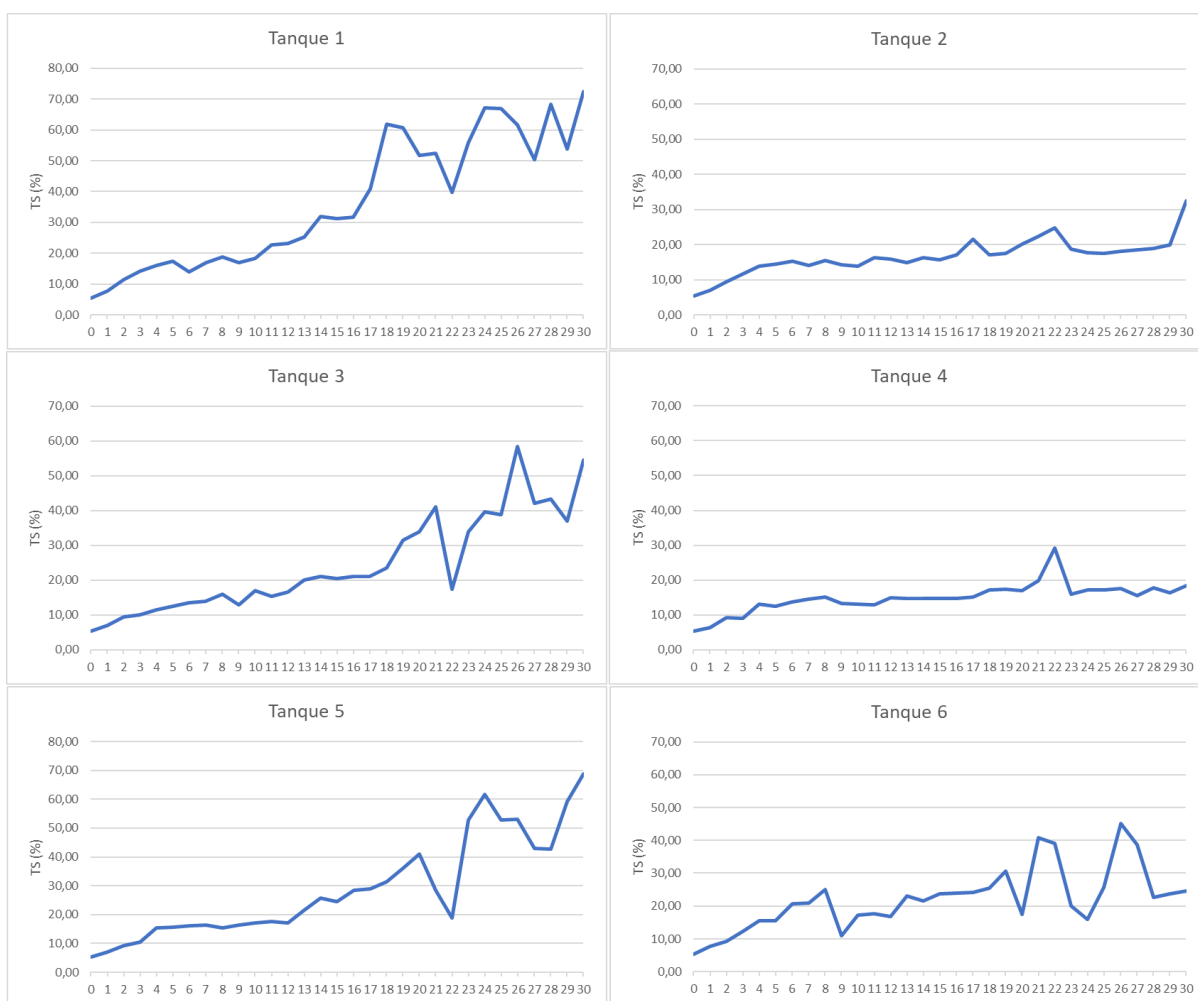


Figura 20 - Teor de sólidos experimental do ciclo 1

Observa-se um comportamento de aumento do teor de sólidos para todos os leitos, porém os leitos onde ocorreram revolvimento (Tanques 1, 3 e 5) obtiveram valores superiores, isso ocorre certamente porque nos leitos onde o revolvimento não aconteceu uma crosta se formou na camada superficial, dificultando a evaporação da umidade presente no interior da lama. Observa-se também, e já era esperado, que os leitos onde uma menor camada de lama foi imposta que a eficiência na desidratação foi maior, esse fato deve-se também a maior dificuldade de evaporação, porém agora

atrelado a profundidade das lamas, já que a radiação solar consegue aquecer predominantemente a parte mais superior da camada.

O tratamento T1 - 1, esse que se refere ao tanque 1 da Figura 20, foi o qual obteve maior valor de TS, passando dos 70%, porém todos os tratamentos onde ocorreu revolvimento os valores foram elevados. A literatura, diz que a percentagem de TS ideal para retirada das lamas dos leitos é de aproximadamente 30%, não devendo ultrapassar os 35% [15].

Os tanques 5 e 6 possuíam cortiça na composição de seus leitos drenantes e observa-se que o tratamento T6 - 1 obteve valores, para TS, superiores aos demais tratamento onde não ocorreu revolvimento, esse fato pode ter ocorrido porque a cortiça possuía granulometria maior do que a da areia utilizada nos demais leitos e favorecido a infiltração de água.

4.1.2.3 Espessura da Camada de Lama

A altura da camada de lama tem relação direta com o volume do material, observa-se na Figura 21 que todos os leitos obtiveram redução de, aproximadamente, 50% do valor inicial já no quinto dia de experimento e chegando a mais de 85% no tanque 3 ao final do ciclo.

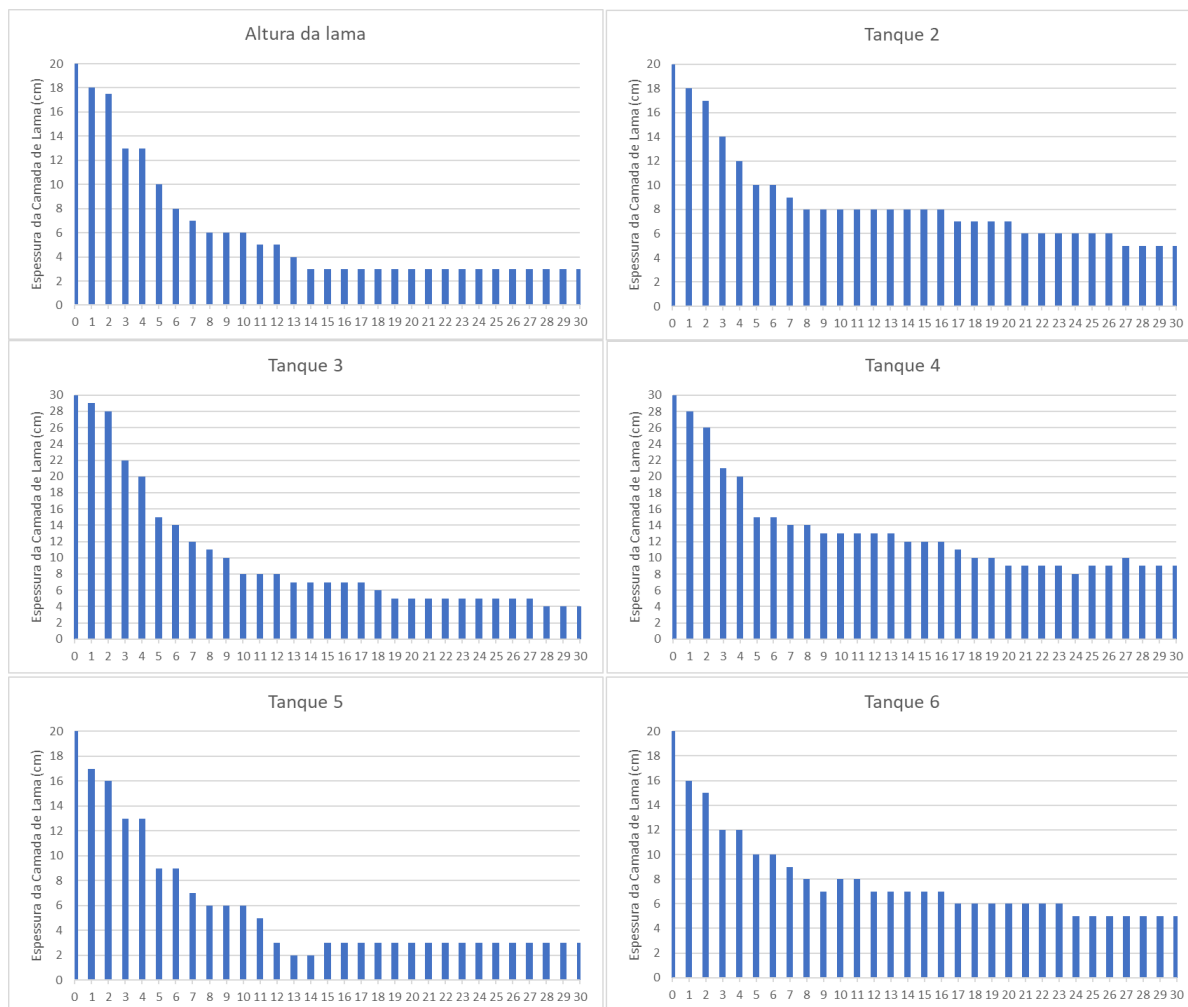


Figura 21 - Espessura da camada de lamas do ciclo 1

No tanque 5, observa-se que os menores valores ocorreram nos dias 13 e 14 e após isso os valores foram todos superiores. Possivelmente, para esses dois dias, ocorreram erros na coleta de dados ou na inserção dos mesmos na tabela onde os resultados eram guardados.

4.1.2.4 CQO do Lixiviado

Observa-se na Tabela 6 que inicialmente todos os tanques possuíam concentrações de CQO, no lixiviado, em torno de 800-830 mg.L⁻¹. Na segunda semana os leitos 5 e 6, os quais continham cortiça na camada drenante, obtiveram significativa redução do parâmetro, porém a seguir os resultados encontrados não

torna a cortiça um elemento eficiente no tratamento do lixiviado, já que os valores voltam a subir.

Tabela 6 - CQO do ciclo 1

Tanque 1			Tanque 2			Tanque 3			Tanque 4			Tanque 5			Tanque 6		
Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)
29/05	2	800,1	29/05	2	800,1	29/05	2	814,4	29/05	2	814,4	29/05	2	829,8	29/05	2	829,8
04/06	8	817,2	04/06	8	814,0	04/06	8	819,1	04/06	8	854,8	04/06	8	421,1	04/06	8	580,6
07/06	11	759,1	07/06	11	43,1	07/06	11	781,0	07/06	11	3015,6	07/06	11	827,7	07/06	11	1243,1
11/06	15	107,6	11/06	15	70,2	11/06	15	795,1	11/06	15	427,7	11/06	15	329,9	11/06	15	593,8
14/06	18	80,3	14/06	18	-112,6	14/06	18	611,2	14/06	18	129,6	14/06	18	305,4	14/06	18	164,4
18/06	22	320,3	18/06	22	-80,4	18/06	22	80,7	18/06	22	-52,8	18/06	22	64,6	18/06	22	248,8
21/06	25	-90,1	21/06	25	-146,0	21/06	25	125,0	21/06	25	138,8	21/06	25	169,6	21/06	25	211,0
25/06	29	-99,7	25/06	29	664,3	25/06	29	-48,6	25/06	29	45,2	25/06	29	107,2	25/06	29	1628,0
26/06	30	-5,9	26/06	30	8,9	26/06	30	178,3	26/06	30	310,3	26/06	30	53,0	26/06	30	1487,1

Observa-se também que alguns picos de CQO ocorreram posteriormente a precipitações, principalmente nos leitos onde o revolvimento não ocorria. Esse fato possivelmente ocorreu devido a perturbação da camada sólida pela chuva, dissolvendo os sólidos e os arrastando para os recipientes coletores na saída dos tanques.

Alguns valores aparecem negativos porque o lixiviado apresentava pequena carga orgânica e a curva utilizada para determinação das concentrações não era capaz de avaliar concentrações tão pequenas de CQO.

O efluente deve ser tratado para lançamento a meios hídricos, visto que não atende a legislação em vigor em muitos casos. O Decreto-Lei n.º 152/97 determina valores para lançamento menores do que 125 mg.L⁻¹ ou percentagem mínima de redução de 75% do parâmetro.

4.1.2.5 Sólidos Suspensos Totais do Lixiviado

Os valores máximos de sólidos suspensos totais definidos pelo Decreto-Lei n.º 152/97 como limite para lançamento em meio receptor, dependendo do caso em específico, é de 35 ou 60 mg.L⁻¹, valores esses que não são atendidos (Figura 22).

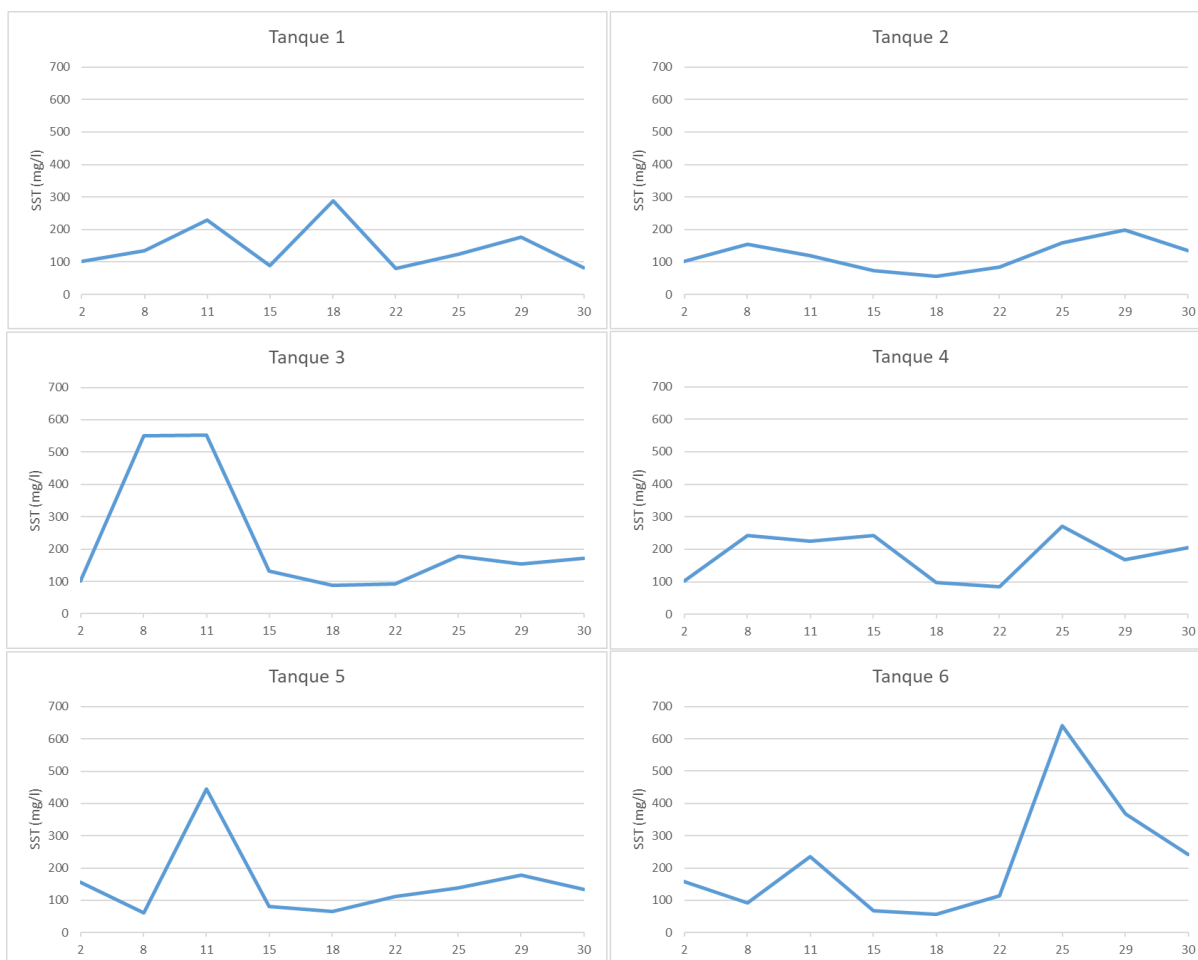


Figura 22 - Sólidos suspensos totais do lixiviado do ciclo 1

Os picos ocorrem, assim como para CQO, após precipitações e também, assim como para CQO, as causas são as mesmas.

4.1.2.6 pH (Lama)

O pH das lamas seguiram um padrão, como observado na Figura 23. Primeiramente o pH diminui de quase 6 para valores próximos de 5, depois voltam a subir e novamente acontece um decréscimo a valores novamente próximos a 5.

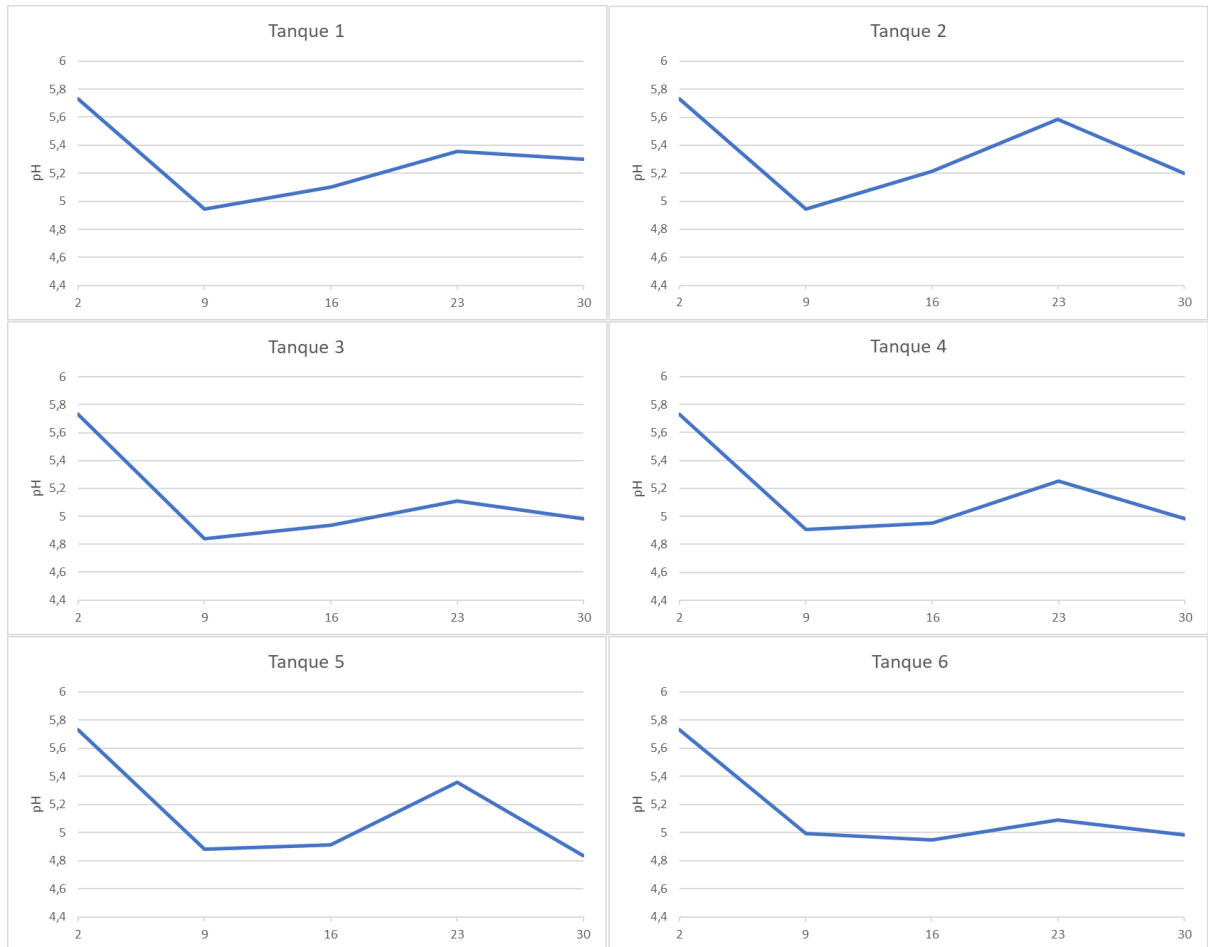


Figura 23 - pH das lamas no ciclo 1

4.1.2.7 pH (Lixiviado)

O pH do lixiviado para todos os tanques tende a se aproximar de 8 (Figura 24). O comportamento dos tanques 1, 2, 3 e 4 foi aproximadamente o mesmo, no começo do experimento era em torno de 7 e aproximou-se de 8 ao final.

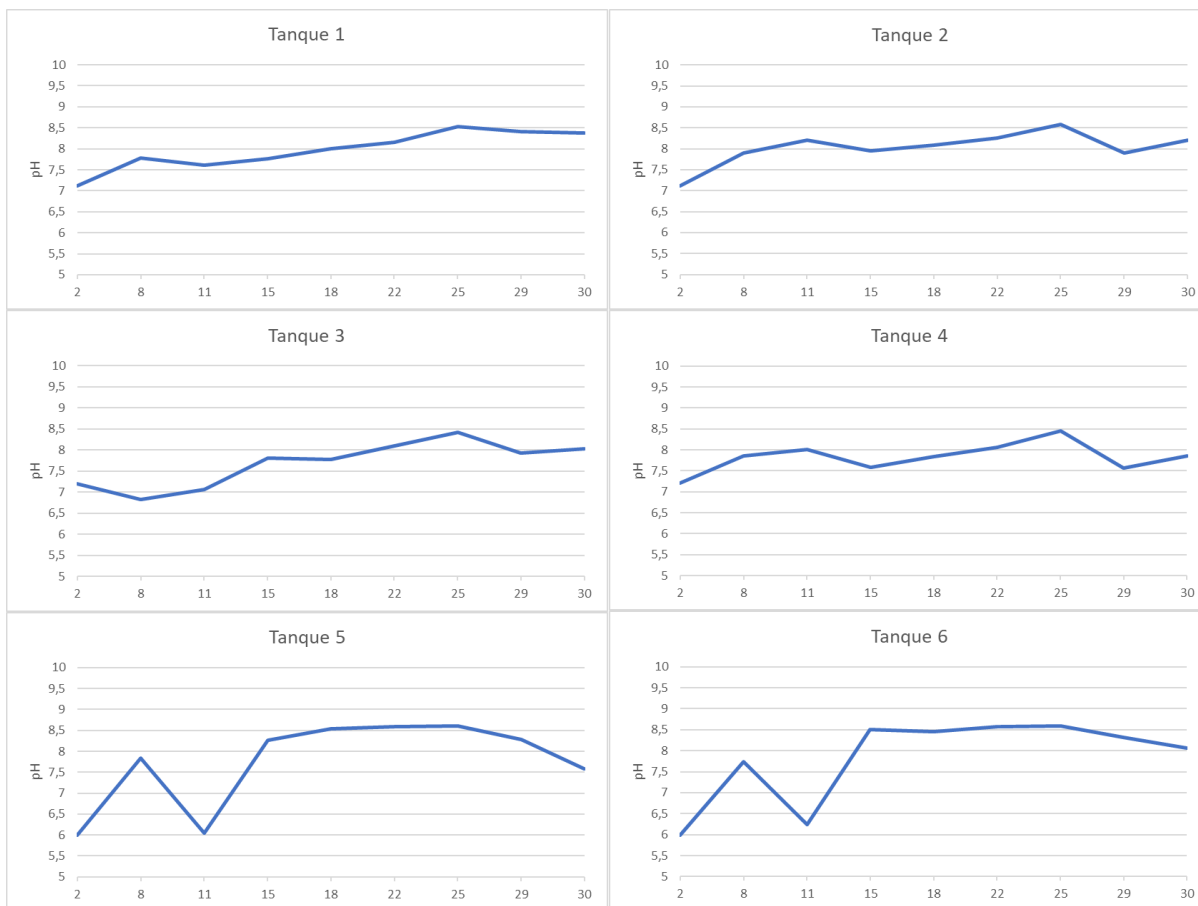


Figura 24 - pH do lixiviado no ciclo 1

Os tanques 5 e 6, os quais possuíam cortiça, ao iniciar-se o processo de desidratação de lamas era mais ácido do que os demais tanques, aproximadamente 6, porém ao fim do processo os valores foram iguais. Esse fato pode ter ocorrido devido à falta da camada de areia que possui um efeito tampão [29].

4.2 Segundo Ciclo de Desidratação

Assim como a seção anterior, os dados apresentados nessa seção seguem os mesmos padrões de apresentação e todos eles estão contidos no Anexo IV.

No segundo ciclo de desidratação, os leitos 5 e 6 sofreram alteração em sua composição do meio drenante. Como a cortiça não apresentou resultados positivos relativamente ao tratamento do lixiviado, substituiu-se a mesma por uma camada de 10 centímetros de areia como nos outros leitos.

4.2.1 Dados Meteorológicos

Do mesmo modo que no ciclo 1, os dados meteorológicos, com exceção da precipitação, foram calculados com média horária, agora feita, das 18 horas do dia anterior até as 18 horas do dia considerado. A precipitação foi calculada somando esses valores. Os dados encontram-se a seguir (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados meteorológicos do ciclo 2

Dia	dia	Temp. média (°C)	Humidade (%)	Precipitação (mm)	Radiação (W.m ⁻²)
17/out	1	13,29	81,64	2,2	70,38
18/out	2	11,76	85,83	33,8	21,67
19/out	3	10,76	73,46	0	121,46
20/out	4	7,64	80,38	0	114,25
21/out	5	8,74	78,55	11,2	142,67
22/out	6	9,31	85,57	10,8	28,63
23/out	7	10,26	83,80	2,4	80,25
24/out	8	13,36	80,70	0	124,33
25/out	9	11,82	78,71	0,2	140,42
26/out	10	12,70	81,00	0	72,58
27/out	11	13,59	83,81	0	81,96
28/out	12	14,78	85,35	0,6	64,46
29/out	13	14,02	91,00	2,4	32,50
30/out	14	14,95	87,81	0,2	57,79
31/out	15	16,74	87,05	5,8	49,21
01/nov	16	14,28	84,10	5,4	51,33
02/nov	17	11,72	82,62	4,2	95,96
03/nov	18	12,00	85,95	4,8	59,38
04/nov	19	9,05	80,81	1,6	64,75
05/nov	20	9,53	81,21	0	67,75
06/nov	21	8,10	85,67	4,4	73,21
07/nov	22	5,85	80,19	0,4	97,13
08/nov	23	6,92	85,85	2,8	31,29
09/nov	24	7,33	75,19	0	62,29
10/nov	25	9,90	76,95	0	108,54
11/nov	26	7,71	79,05	0,2	48,54
12/nov	27	11,72	82,29	15	102,13
13/nov	28	6,10	84,05	10,2	49,58
14/nov	29	4,64	77,76	1,2	111,46
15/nov	30	4,56	77,33	0	62,63

Relativamente ao primeiro ciclo, a precipitação e a umidade foram superiores em quase todos os dias, ao contrário dos demais fatores meteorológicos. Visto isso, alguns acontecimentos já são esperados para o ciclo 2, como a menor eficiência na desidratação, além da redução da qualidade dos fatores ambientais avaliados.

4.2.2 Dados do Experimento

4.2.2.1 Volume Lixiviado

Observa-se na Figura 25 que assim como no ciclo 1, os leitos com a mesma espessura da camada de lama drenaram, aproximadamente, o mesmo volume de água.

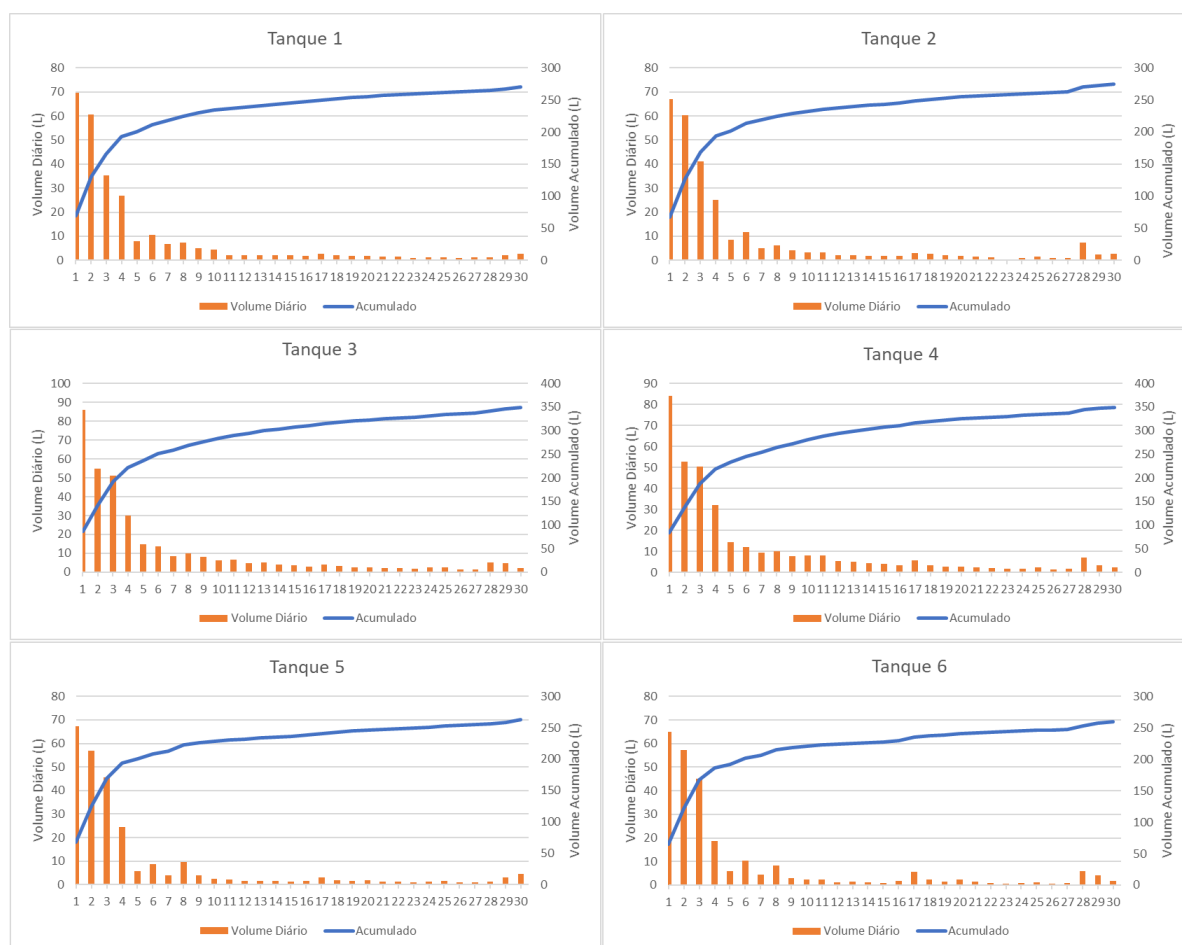


Figura 25 - Volume de água lixiviado experimental do ciclo 2

Novamente nos primeiros 4 dias a medição do volume de lixiviado foi feita mais de uma vez no mesmo dia, para evitar transbordo dos recipientes de recolha. Porém no ciclo 2 os tanques 1, 2, 5 e 6 também necessitaram de recolha mais de uma vez no dia 3, e os tanques 1 e 2 no dia 4 também.

Durante o ciclo 2 ocorreu precipitação de quase 120 mm, distribuída em 21 dos 30 dias do período (Tabela 7). Sendo assim, o volume de água drenado foi superior ao inicialmente contido no sistema. Ocorre, no ciclo 2, a dificuldade de calcular o

volume de água que deixou os tanques relativo à água inicial, devido a quantidade de dias onde ocorreu precipitação.

4.2.2.2 Teor de Sólidos (Lama)

Como era esperado, o teor de sólidos para todos os leitos no ciclo 2 foram inferiores ao ciclo 1 devido a meteorologia do período, e também a lama que possuía um menor teor de sólidos inicial, porém esse segundo elemento não influenciou tanto quanto o primeiro, já que no dia 1 do ciclo 2 os valores de TS já superavam os 5% para todos os tanques.

A maior das diferenças entre os ciclos ocorreu para o tanque 1, onde no final do ciclo 1 chegou a 72,58% de TS e no fim do segundo apenas 7,99%. Obtendo assim aproximadamente 89% a menos de teor de sólidos. Os resultados de TS para o ciclo 2 podem ser observados na Figura 26.



Figura 26 - Teor de sólidos experimental do ciclo 2

O teor de sólidos para os tanques 5 e 6 foram melhores do que os demais, isso pode ter ocorrido devido a camada de areia ser nova. Mesmo com a lavagem dos leitos após o primeiro ciclo a areia contida nos mesmos pode ter tido remanescentes de partículas sólidas e colmatado de forma mais rápida no segundo ciclo.

Observa-se também que na incidência de maior quantidade de precipitação o revolvimento prejudica a desidratação das lamas, os tanques onde não ocorrem a perturbação das lamas os valores de TS são ligeiramente maiores do que os que ocorrem, a fenômeno deve-se a atribuição de água no interior da camada de lama quando feito o revolvimento.

4.2.2.3 Espessura da Camada de Lama

As espessuras da camada de lamas do ciclo 2 estão contidas na Figura 27. Pode-se notar que mesmo com o TS baixo, a espessura da camada de lama sofre significativa redução, reduzindo cerca de 50% do volume inicial de lamas já no terceiro ou quarto dia de experiência, mostrando que os leitos de secagem podem ser utilizados também em regiões úmidas quando o intuito é a diminuição do volume de lamas.

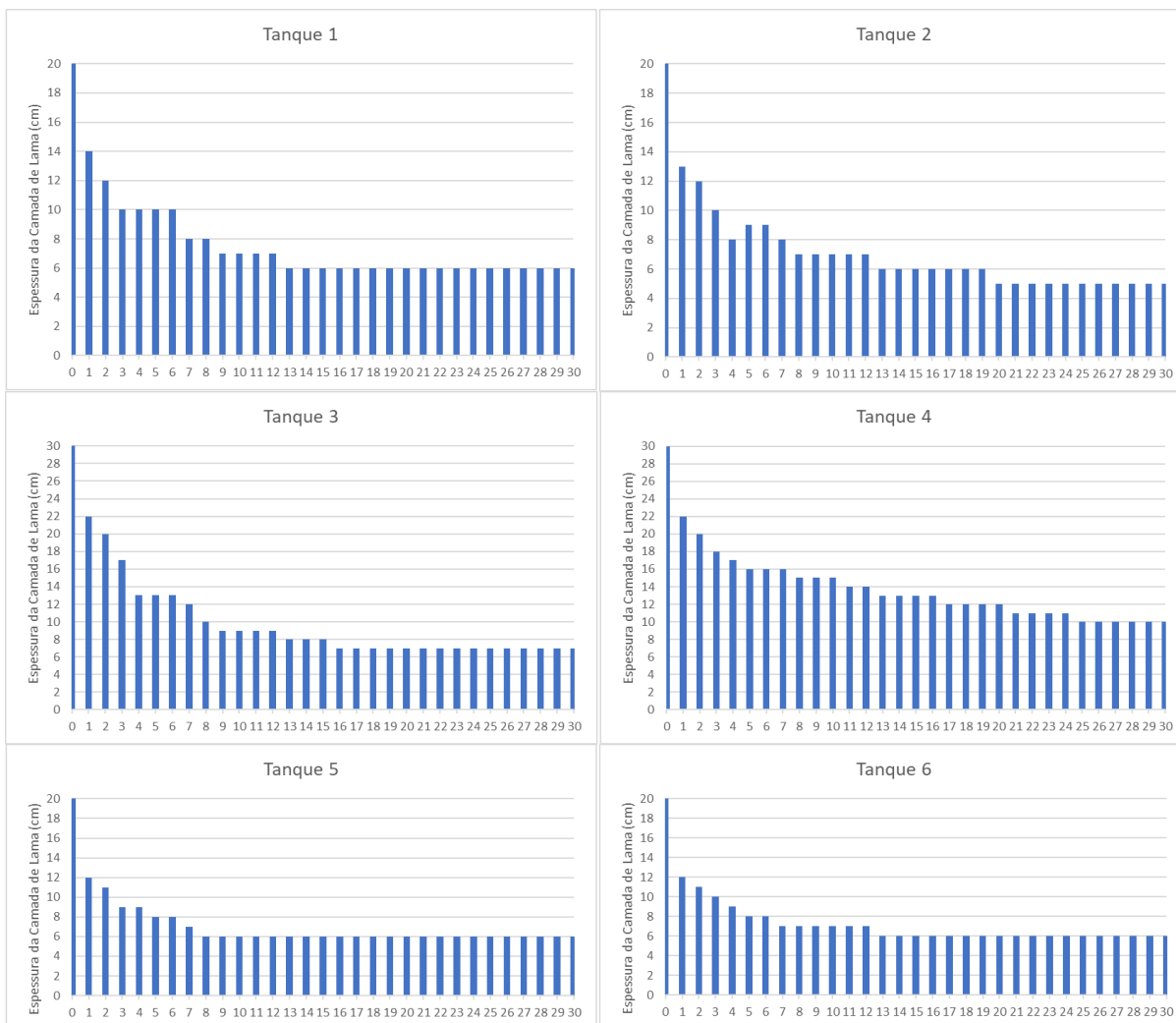


Figura 27 - Espessura da camada de lamas do ciclo 2

Para os leitos com 20 centímetros de camada inicial de lama, a partir do décimo dia, já não se observa grandes variações da camada de lama e para os com 30 cm, o leito 4 teve maior variação ao longo do tempo do que o leito 3.

4.2.2.4 CQO do Lixiviado

A CQO do lixiviado no ciclo 2 encontra-se na Tabela 8, houve um aumento na concentração inicial relativamente ao ciclo 1. Esse aumento pode ser devido ao dia em que as análises foram feitas, já que no ciclo 1 a coleta foi feita no segundo dia do experimento e no ciclo 2 as amostras foram coletadas no dia 1, ou também devido a maior concentração de matéria orgânica nas lamas que pode ter ocorrido.

Tabela 8 - CQO do ciclo 2

Tanque 1			Tanque 2			Tanque 3			Tanque 4			Tanque 5			Tanque 6		
Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)	Data	Dia	CQO (mg/l)
17/10	1	41324,4	17/10	1	44920,0	17/10	1	45457,8	17/10	1	47066,7	17/10	1	43404,4	17/10	1	67875,6
20/10	4	10168,9	20/10	4	6768,9	20/10	4	31595,6	20/10	4	18115,6	20/10	4	7720,0	20/10	4	32506,7
24/10	8	2422,2	24/10	8	12848,9	24/10	8	36542,2	24/10	8	13262,2	24/10	8	8257,8	24/10	8	23724,4
27/10	11	-737,8	27/10	11	4413,3	27/10	11	1088,9	27/10	11	-173,3	27/10	11	4595,6	27/10	11	8786,7
10/11	25	-2373,3	10/11	25	-2622,2	10/11	25	102,2	10/11	25	-880,0	10/11	25	-995,6	10/11	25	12066,7
14/11	29	18391,1	14/11	29	39422,2	14/11	29	25520,0	14/11	29	39315,6	14/11	29	9373,3	14/11	29	17217,8
15/11	30	-142,2	15/11	30	10604,4	15/11	30	28448,9	15/11	30	2768,9	15/11	30	6262,2	15/11	30	17182,2

Nota-se uma queda na CQO nos dias 11 e 25, em tais dias não ocorreu chuvas, o que evidencia ainda mais a interferência da precipitação nos picos de aumento de CQO. Assim como no ciclo 1, o ciclo 2 não segue um padrão de melhora estável do parâmetro, e não cumpre a legislação em vigor em muitos dias.

Os valores negativos possuem as mesmas explicações dos valores negativos do ciclo 1.

4.2.2.5 Sólidos Suspensos Totais do Lixiviado

A Figura 28 retrata os sólidos suspensos totais do lixiviado no ciclo 2, observa-se que não há um padrão entre os leitos, porém o ciclo 2 em alguns casos, como o tanque 4 obteve resultados melhores relativamente ao mesmo leito no ciclo 1. Mesmo assim o ciclo 2 também não cumpre o Decreto-Lei n.º 152/97, evidenciando a necessidade de tratamento do lixiviado de leitos de secagem.

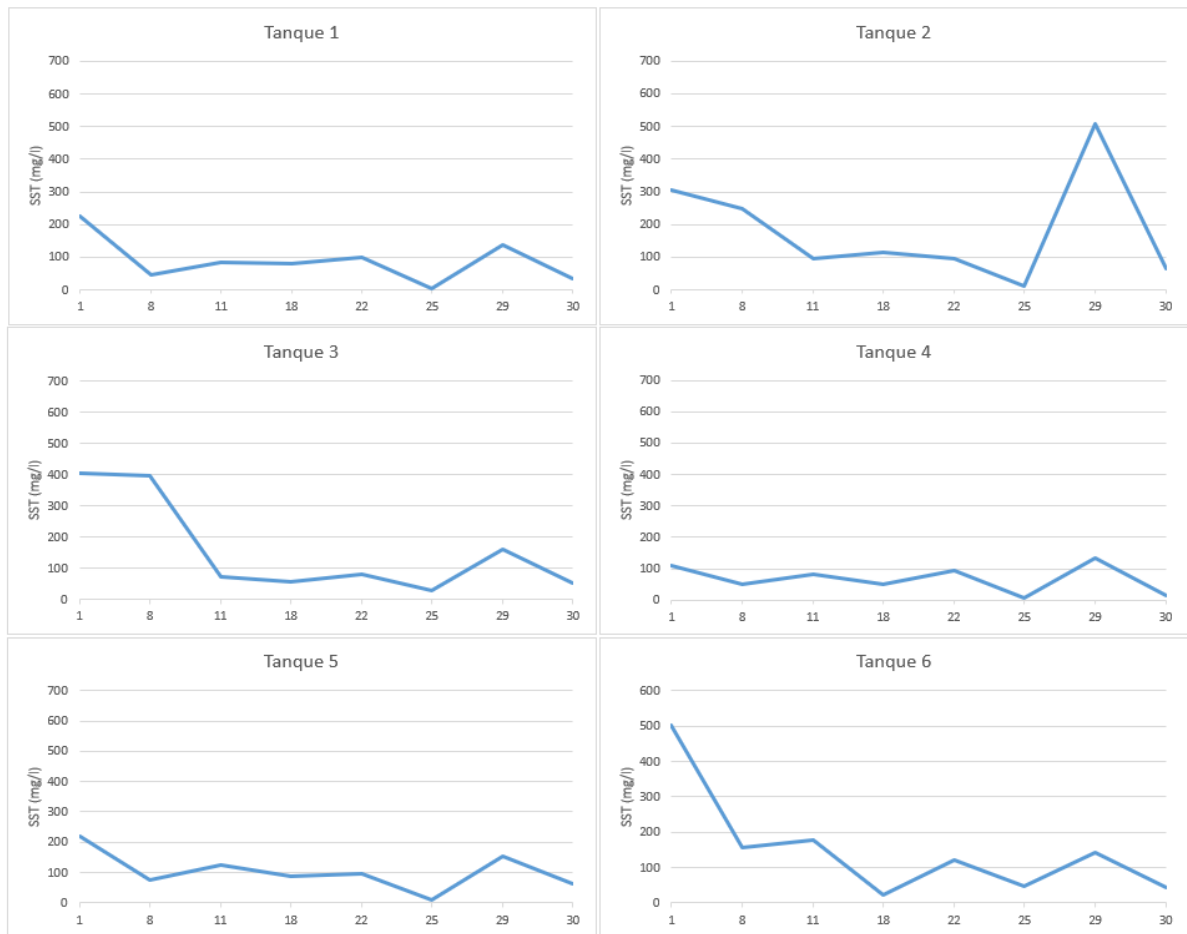


Figura 28 - Sólidos suspensos totais do lixiviado do ciclo 2

4.2.2.6 pH (Lama)

O pH das lamas no ciclo 2 seguiu o mesmo padrão do ciclo 1, para todos os tanques, como pode-se observar na Figura 29. Primeiramente o pH tende a cair e logo em seguida volta a subir, esse decréscimo no início do processo tem a ver com a decomposição microbiana que libera ácidos orgânicos [30].

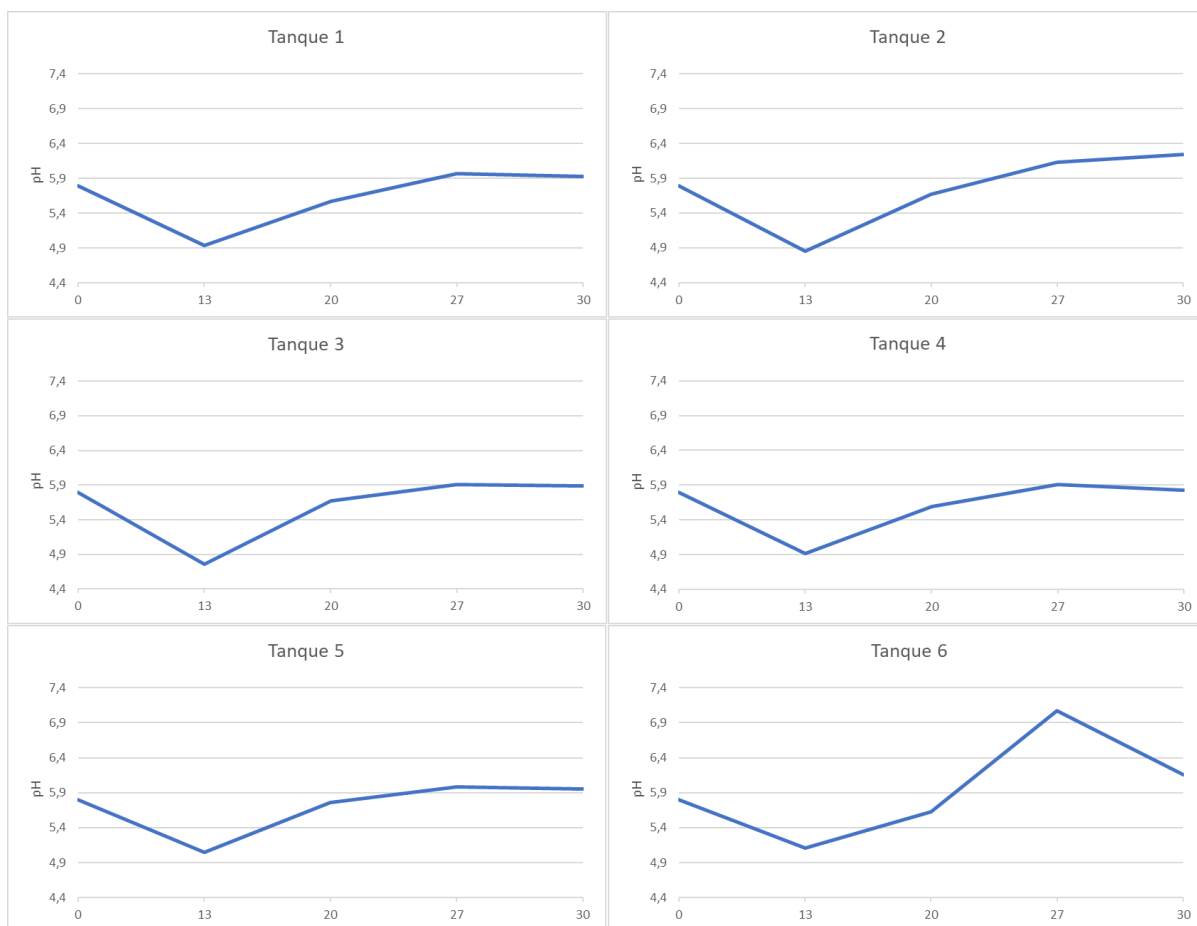


Figura 29 - pH das lamas no ciclo 2

4.2.2.7 pH (Lixiviado)

Assim como o pH das lamas, o pH do lixiviado no ciclo 2 seguiu os mesmos padrões do ciclo 1. A Figura 30 mostra esse pH para todos os tanques, observa-se que o pH de ambos os tanques tendem a valores próximos a 8. Como já mencionado anteriormente, a areia possui um poder de tamponamento, isso se confirma já que foi adicionado areia aos leitos 5 e 6 e os valores não caíram como no ciclo 1, onde cortiça estava no lugar.

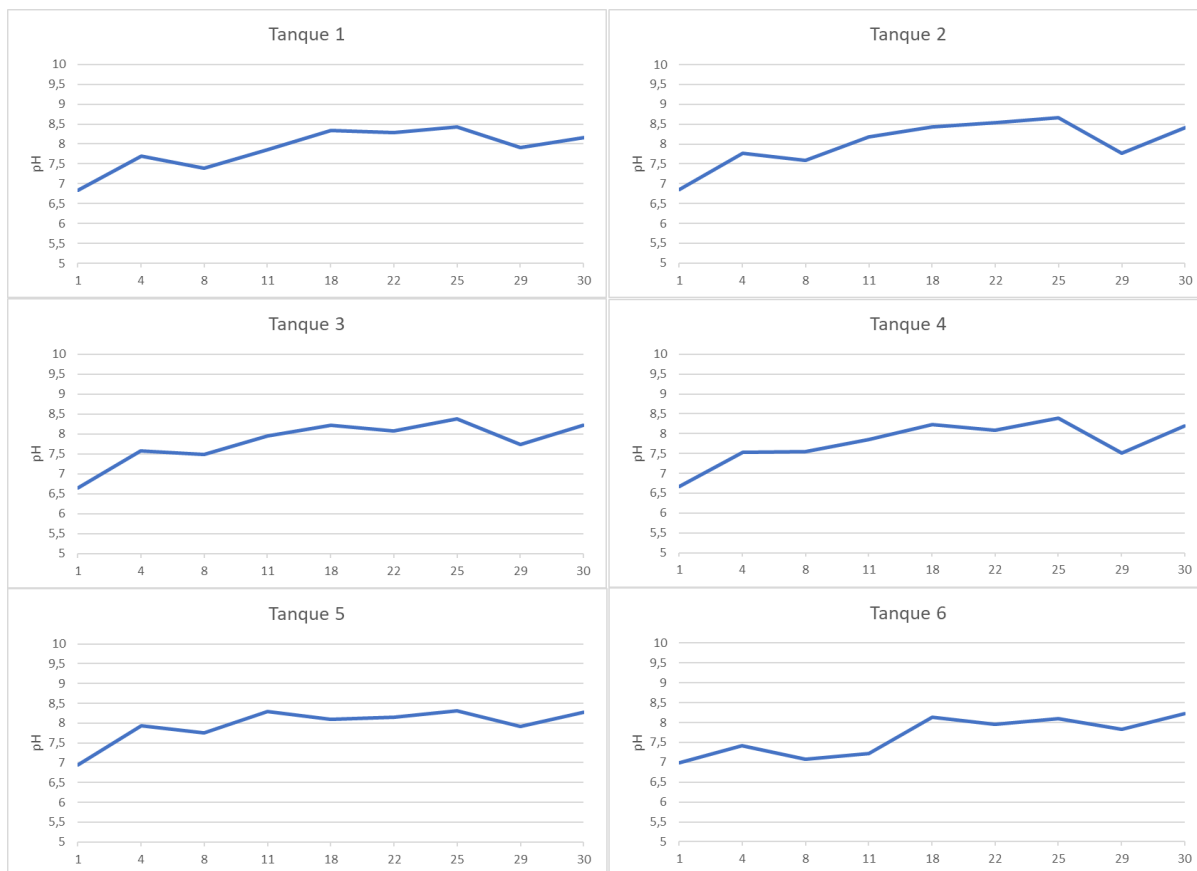


Figura 30 - pH do lixiviado no ciclo 2

4.3 Modelação

Nesta seção serão abordados os resultados da modelação matemática elaborada, as curvas obtidas pelo modelo serão tratadas como curvas teóricas, enquanto as curvas experimentais se referem aos dados obtidos experimentalmente. Os layouts das folhas de cálculo do Excel utilizadas para a modelação estão disponíveis no link do Anexo II, as células em amarelo são as que devem ser substituídas, caso necessite fazer uma nova modelação.

4.3.1 Água Potencialmente Evaporada

A evaporação possui influência da umidade relativa do ar e da temperatura, porém a radiação solar é quem predomina sobre o fenômeno. Como já esperado o

ciclo 1 obteve valores maiores de água potencialmente evaporada já que a radiação média do período é mais do que 4 vezes a do ciclo 2.

A Figura 31 mostra a massa de água potencialmente evaporada para cada dia no ciclo 1 e também a radiação média de cada dia. Da mesma forma a Figura 32 mostra os valores para o ciclo 2.

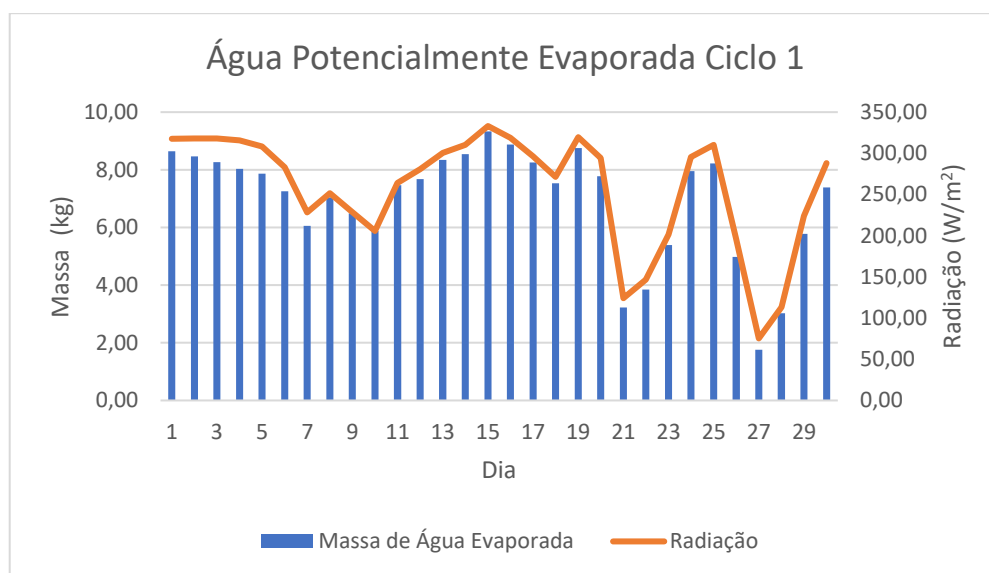


Figura 31 - Água potencialmente evaporada no ciclo 1

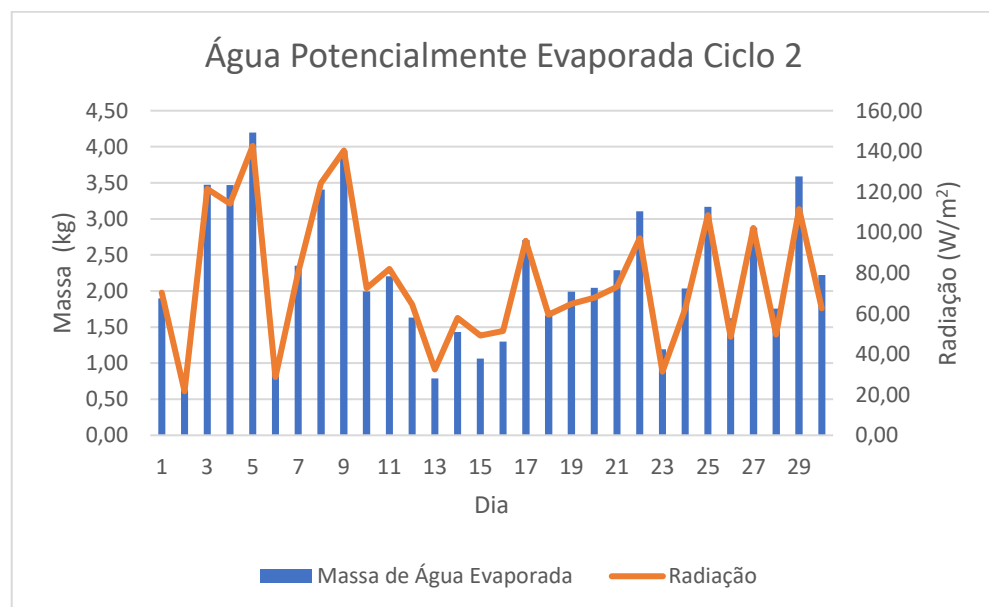


Figura 32 - Água potencialmente evaporada no ciclo 2

Esse foi o primeiro passo da modelação, já que a água evaporada calculada não se traduz na água que realmente evaporou do sistema, porque os cálculos consideram

uma situação ideal, onde a camada exposta ao ambiente fosse composta apenas de água. Nas secções a seguir as devidas correções foram estipuladas de acordo com o TS em que as lamas se encontravam.

4.3.2 Água Drenada relativamente à Água Inicial do Sistema

A água drenada da inicial contida no sistema foi calculada com os dados do ciclo 1, pois nesse período ocorreu precipitação em poucos dias, o que possibilitou a determinação do padrão de drenagem nos leitos, referindo-se apenas a água presente nas lamas.

A Tabela 9 se refere aos leitos com 20 centímetros de camada de lama inicial, enquanto a Tabela 10 aos leitos com 30 cm.

Tabela 9 - Água drenada da inicial para leitos de 20 cm

Data	Dia	Rain	Média Drenado	Fator de Multiplicação 1
28/05	1	0,00	26,63	25,0%
29/05	2	0,00	17,97	20,0%
30/05	3	0,00	10,52	10,0%
31/05	4	0,00	4,84	5,0%
01/06	5	0,00	3,41	3,5%
02/06	6	0,00	1,57	1,5%
03/06	7	0,00	1,10	1,0%
04/06	8	0,20	0,58	0,5%
05/06	9	0,00	0,48	0,5%
06/06	10	15,60	3,05	0,5%
07/06	11	0,00	0,65	0,5%
08/06	12	0,00	0,59	0,4%
09/06	13	0,00	0,49	0,4%
10/06	14	0,00	0,43	0,4%
11/06	15	0,00	0,41	0,4%
12/06	16	0,00	0,40	0,4%
13/06	17	0,00	0,42	0,4%
14/06	18	0,00	0,42	0,4%
15/06	19	0,00	0,43	0,4%
16/06	20	0,00	0,45	0,4%
17/06	21	0,20	0,39	0,3%
18/06	22	3,60	0,33	0,3%
19/06	23	0,00	0,30	0,3%
20/06	24	0,00	0,25	0,2%
21/06	25	0,00	0,21	0,2%
22/06	26	0,40	0,23	0,2%
23/06	27	9,60	0,34	0,2%
24/06	28	2,80	0,36	0,2%
25/06	29	0,00	0,24	0,2%
26/06	30	0,00	0,33	0,2%

Para os tanques com 20 cm se observa que até o dia 10, dia esse que uma precipitação considerável caiu sobre os leitos, a média de drenagem dos leitos era utilizada quase que exatamente, apenas aproximando os valores para melhor manuseio e visualização dos mesmos. Já nos dias onde ocorreu, ou dias que sucedem outros que ocorreu precipitação, a drenagem aumentou e uma aproximação, com base no dia anterior feita até que os valores voltassem a cair novamente.

Tabela 10 - Água drenada da inicial para leitos de 30 cm

Data	Dia	Rain	Média Drenado	Fator de Multiplicação 1
28/05	1	0,00	21,35	20,0%
29/05	2	0,00	17,05	15,0%
30/05	3	0,00	13,23	13,0%
31/05	4	0,00	9,11	9,0%
01/06	5	0,00	4,74	5,0%
02/06	6	0,00	2,01	2,0%
03/06	7	0,00	1,28	1,3%
04/06	8	0,20	0,92	0,9%
05/06	9	0,00	0,68	0,7%
06/06	10	15,60	0,56	0,5%
07/06	11	0,00	0,57	0,5%
08/06	12	0,00	0,54	0,5%
09/06	13	0,00	0,43	0,4%
10/06	14	0,00	0,36	0,3%
11/06	15	0,00	0,36	0,3%
12/06	16	0,00	0,37	0,3%
13/06	17	0,00	0,36	0,3%
14/06	18	0,00	0,33	0,3%
15/06	19	0,00	0,35	0,3%
16/06	20	0,00	0,39	0,3%
17/06	21	0,20	0,37	0,3%
18/06	22	3,60	0,33	0,3%
19/06	23	0,00	0,34	0,3%
20/06	24	0,00	0,31	0,3%
21/06	25	0,00	0,29	0,3%
22/06	26	0,40	0,34	0,3%
23/06	27	9,60	0,31	0,3%
24/06	28	2,80	0,29	0,2%
25/06	29	0,00	0,29	0,2%
26/06	30	0,00	0,31	0,2%

Para os leitos com 30 cm, visto que os valores drenados nos dias de precipitação não variaram como os leitos com menor camada de lama, admitiu-se que parte da água se incorporou nas mesmas, diminuindo esse efeito. Então se utilizou valores ligeiramente menores do que as médias dos tanques para corrigi-lo.

Como o período inicial foi completamente sem precipitação e levando em conta que a maior parte da água foi drenada nesse período, os valores que foram estimados não causam grande impacto mesmo se mal estipulados.

4.3.3 Água Drenada Relativamente à Água Precipitada Sobre o Leito e Água Evaporada Real do Sistema

Aplicando a modelação antes feita para os leitos e então sabendo o volume de água drenada referente a água inicialmente contida no sistema, a partir do teor de sólidos experimental, foi-se aplicando fatores de multiplicação de modo que a curva de TS teórica ficasse próxima a real.

Encontrou-se a necessidade de dividir os leitos em categorias, já que as diferentes características entre eles refletem no comportamento da desidratação dos mesmos, portanto foram divididos em 4 diferentes categorias: Leitos de 20 cm de camada de lama com revolvimento; Leitos de 30 cm de camada de lama com revolvimento; Leitos de 20 cm de camada de lama sem revolvimento; Leitos com 30 cm de camada de lama sem revolvimento.

A Tabela 11 apresenta os fatores de multiplicação determinados para a drenagem para os leitos de 20 e 30 cm com revolvimento, enquanto a Tabela 12 retrata os fatores de evaporação, para os mesmos leitos.

Tabela 11 - Fatores de multiplicação de drenagem para leitos com revolvimento (Fator de multiplicação 2)

20cm		30cm	
Fator de Multiplicação	TS%	Fator de Multiplicação	TS%
1,00	<5	1,00	<5
0,70	5_10	0,60	5_10
0,40	10_20	0,20	10_20
0,30	20-30	0,20	20-30
0,20	30-40	0,20	30-40
0,10	40-50	0,20	40-50
0,10	50-60	0,15	50-60
0,10	>60	0,10	>60

Os fatores de multiplicação de drenagem da água precipitada sobre o leito diminuem em função do TS devido a capacidade de absorção da lama conforme esse fator aumenta, fazendo assim com que parte da água fique contida na camada de lama e evapore posteriormente.

Tabela 12 - Fatores de multiplicação de evaporação para leitos com revolvimento (Fator de multiplicação 3)

20cm		30cm	
Fator de Multiplicação	TS%	Fator de Multiplicação	TS%
0,90	<5	0,80	<5
0,40	5_10	0,40	5_10
0,30	10_20	0,35	10_20
0,35	20-30	0,35	20-30
0,25	30-40	0,35	30-40
0,25	40-50	0,30	40-50
0,25	50-60	0,25	50-60
0,20	>60	0,20	>60

Nota-se que para o fator de multiplicação 3 (Tabela 12), os valores foram iguais, independente da espessura da camada de lama, tal fato em leitos com revolvimento se deve a formação de torrões de lama, onde independente a espessura da camada os torrões se formaram quando o TS começar a se elevar e em seus interiores a evaporação acontece de maneira mais difícil, explicando porque quanto maior o TS menor o fator de evaporação.

Para os leitos sem revolvimento, os fatores de multiplicação estão contidos na Tabela 13, para drenagem.

Tabela 13 - Fatores de multiplicação de drenagem para leitos sem revolvimento (Fator de multiplicação 2)

20cm		30cm	
Fator de Multiplicação	TS%	Fator de Multiplicação	TS%
1,00	<5	1,00	<5
0,80	5_10	0,80	5_10
0,70	10_20	0,70	10_20
0,40	20-30	0,40	20-30
0,30	30-40	0,30	30-40

Os intervalos de TS são interrompidos em 40% devido aos dados experimentais não ultrapassarem tais valores, portanto não se conseguia modelar corretamente para valores superiores a esse.

Na Tabela 14 os fatores encontrados para a evaporação estão expostos.

Tabela 14 - Fatores de multiplicação de evaporação para leitos sem revolvimento (Fator de multiplicação 3)

20cm		30cm	
Fator de Multiplicação	TS%	Fator de Multiplicação	TS%
0,70	<5	0,70	<5
0,30	5_10	0,30	5_10
0,20	10_20	0,20	10_20
0,05	20-30	0,05	20-30
0,05	30-40	0,05	30-40

Chegou-se também em valores iguais para os fatores 3 de leitos sem revolvimento, esse fato possivelmente acontece devido a formação de uma camada de lama mais seca na parte superior das lamas, o que dificulta a evaporação da água que se encontra nas camadas subsequentes.

4.3.4 Espessura da Camada de Lama

As espessuras das camadas de lama para os leitos no ciclo 1 se encontram na Figura 33.

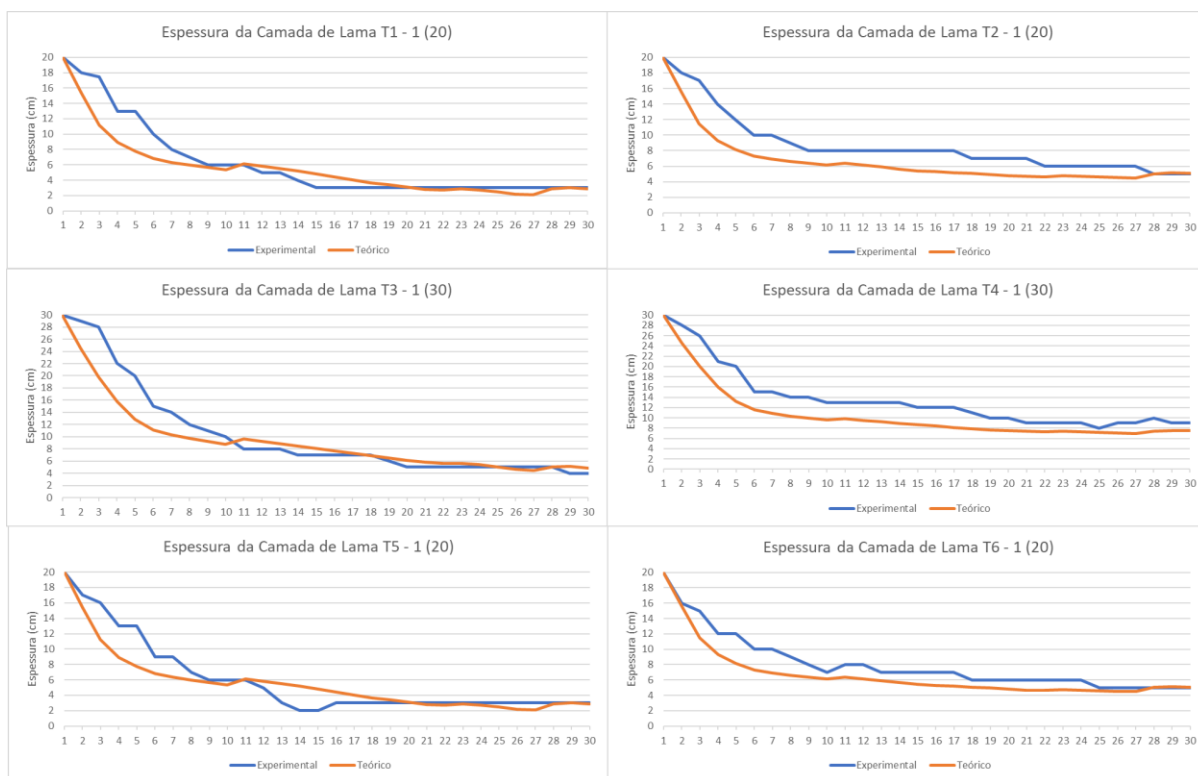


Figura 33 - Modelação da espessura da camada de lama no ciclo 1

A espessura teórica se aproximou da experimental, porém existe uma diferença na qual a teórica decresce ligeiramente mais rápido. A curva teórica, encontrada através da modelação, considera nulo a quantidade de ar que fica inserida na camada de lama e apesar da soma de 1 centímetro para essa compensação, o valor não é suficiente nos primeiros dias, porém ao fim do ciclo os valores tendem a se igualar na maioria dos leitos.

A Figura 34 apresenta os resultados para o ciclo 2, e nota-se que os valores foram mais próximos da realidade, com exceção do leito 3 que teve uma discrepância dos demais relativamente à curva teórica.

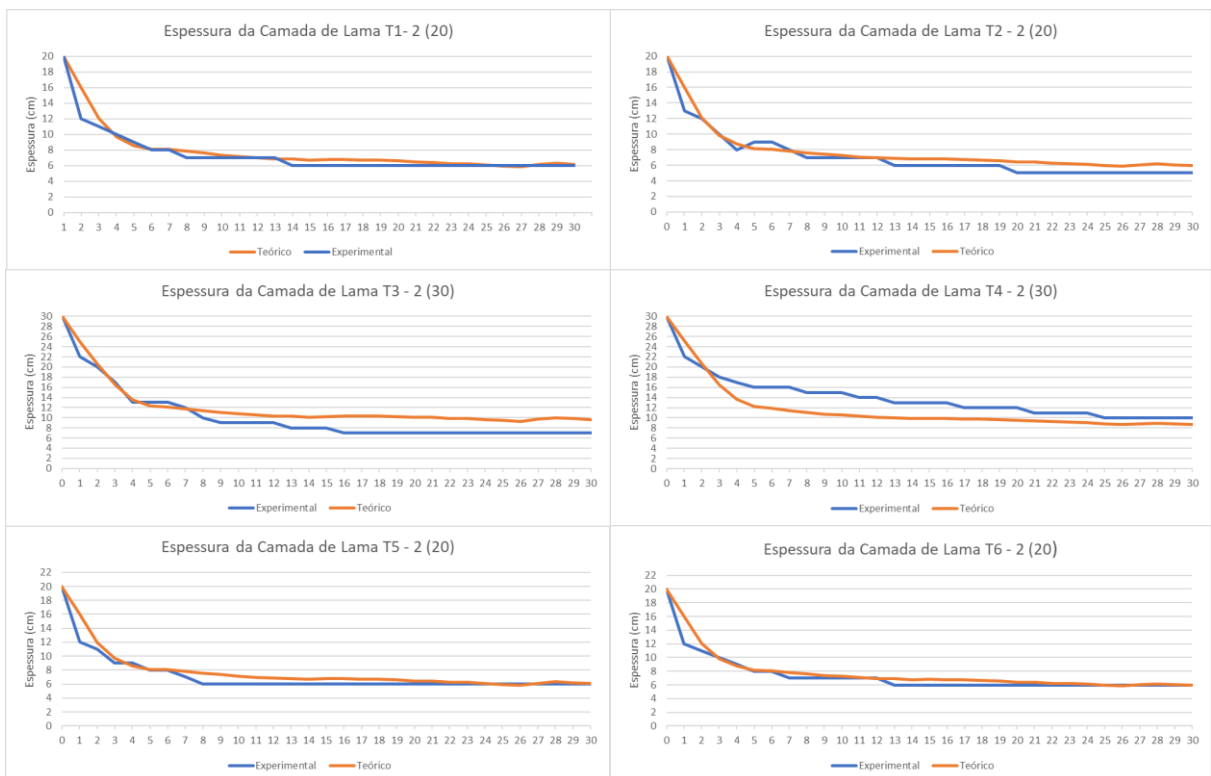


Figura 34 – Modelação da espessura da camada de lama no ciclo 2

Um fenômeno que pode ser observado é a contribuição da precipitação na compactação das lamas, visto que no ciclo 1 a partir do dia 10, onde ocorreu uma precipitação considerável, a maioria dos leitos obteve uma maior aproximação das curvas. No ciclo 2, como houveram precipitações espalhadas durante o ciclo, as curvas são mais próximas, evidenciando ainda mais a influência das chuvas na compactação das lamas.

4.3.5 Teor de Sólidos

Os resultados da modelação do teor de sólidos serão apresentados dividindo os tanques em grupos, os quais para todos os leitos de cada grupo se utilizou os mesmos fatores de multiplicação: O primeiro grupo será para os tanques com 20 cm de camada de lama e que receberam revolvimento (tanques 1 e 5 do primeiro ciclo e tanques 1 e 5 do segundo ciclo), o segundo para os tanques que também receberam revolvimento, porém com 30 cm de camada de lama (tanque 3 do ciclo 1 e tanque 3 do ciclo 2). O terceiro grupo é para os leitos que possuíam 20 cm de camada de lama sem revolvimento (tanques 2 e 6 do ciclo 1 e tanques 2 e 6 do ciclo 2) e por último o quarto grupo, em que os leitos não receberam revolvimento e possuíam 30 cm (tanque 4, de ambos os ciclos). O primeiro grupo é mostrado a seguir na Figura 35.

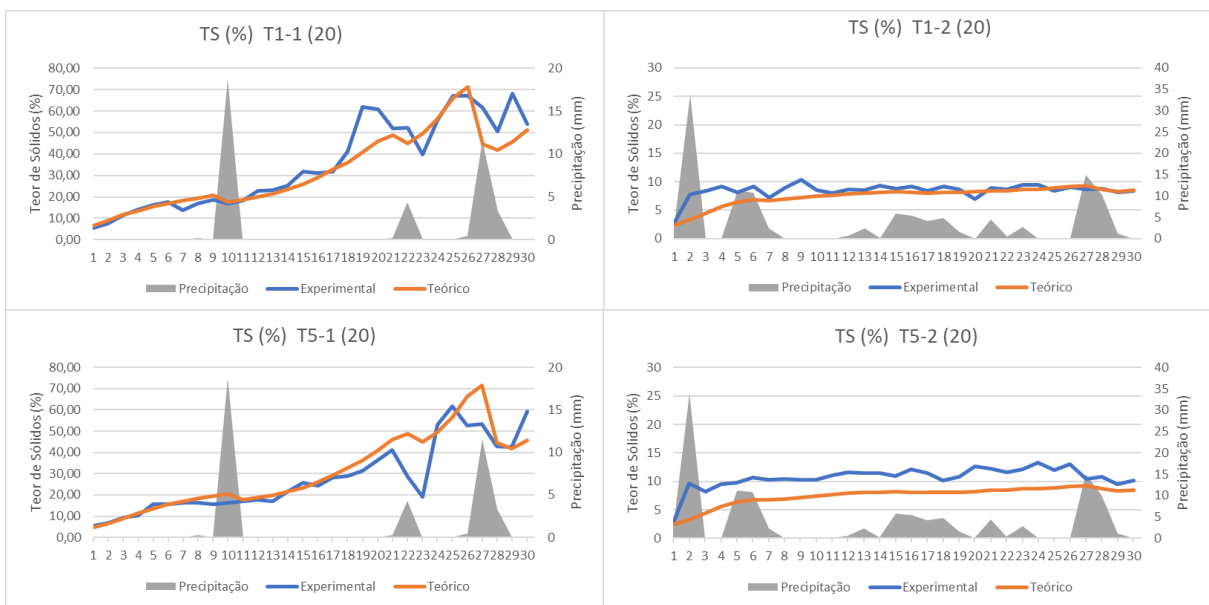


Figura 35 - Modelação do TS para os leitos de 20 cm com revolvimento

Os gráficos localizados a esquerda da figura são referentes ao leito 1 do primeiro ciclo na parte superior e ao leito 5 do ciclo 1 na parte inferior, nota-se uma aproximação das curvas teóricas e experimentais em grande parte do período. Um pico de diminuição de TS experimental acontece após uma precipitação entre os dias 22 e 23, esse pico não é acompanhado pela curva teórica, principalmente no leito 5. Tal fato acontece porque a chuva causa diminuição no TS, já que grande parte dessa água é absorvida pela lama e evaporada posteriormente. A modelação não prevê esse acúmulo de umidade superficial que facilita a evaporação da mesma, portanto a

modelação ao invés de considerar que essa água absorvida fique contida nas lamas e se evapore de forma mais rápida do que o fator de evaporação prevê para o intervalo de TS, considera que a mesma seja drenada imediatamente, não diminuindo agressivamente o TS das lamas após precipitações, porém logo em seguida os valores de TS voltam a se aproximar.

Os gráficos do lado direito se referem novamente aos leitos 1 e 5, porém do ciclo 2. Observa-se, como já dito antes, a maior quantidade de precipitação no período, porém como as lamas não atingem valores altos de TS, não acontecem grandes variações após queda de chuva. Nota-se uma melhor eficiência do tratamento T5 – 2, já que obteve valores experimentais superiores a 12% de TS, enquanto o tratamento T1 – 2 obteve valores próximos a 10%.

A Figura 36 mostra o leito 3 para o ciclo 1, no lado esquerdo, e para o ciclo 2, no lado direito.

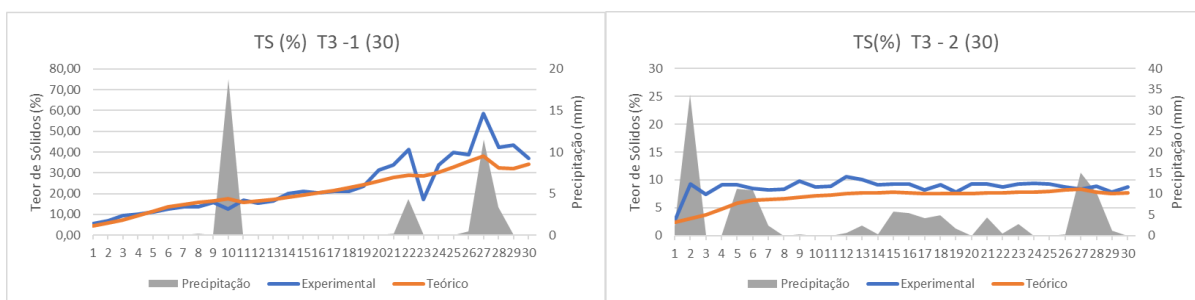


Figura 36 - Modelação do TS para os leitos de 30 cm com revolvimento

Observa-se uma aproximação das curvas nos dois gráficos, seguindo os mesmos padrões já explicados anteriormente relativamente à interação do TS com a precipitação.

Para o tratamento T6 – 1, onde foi utilizado cortiça, houveram maiores TS e também maiores variações com relação as precipitações como é mostrado na Figura 37. Os gráficos dessa imagem se referem aos leitos com 20 cm e sem revolvimento.

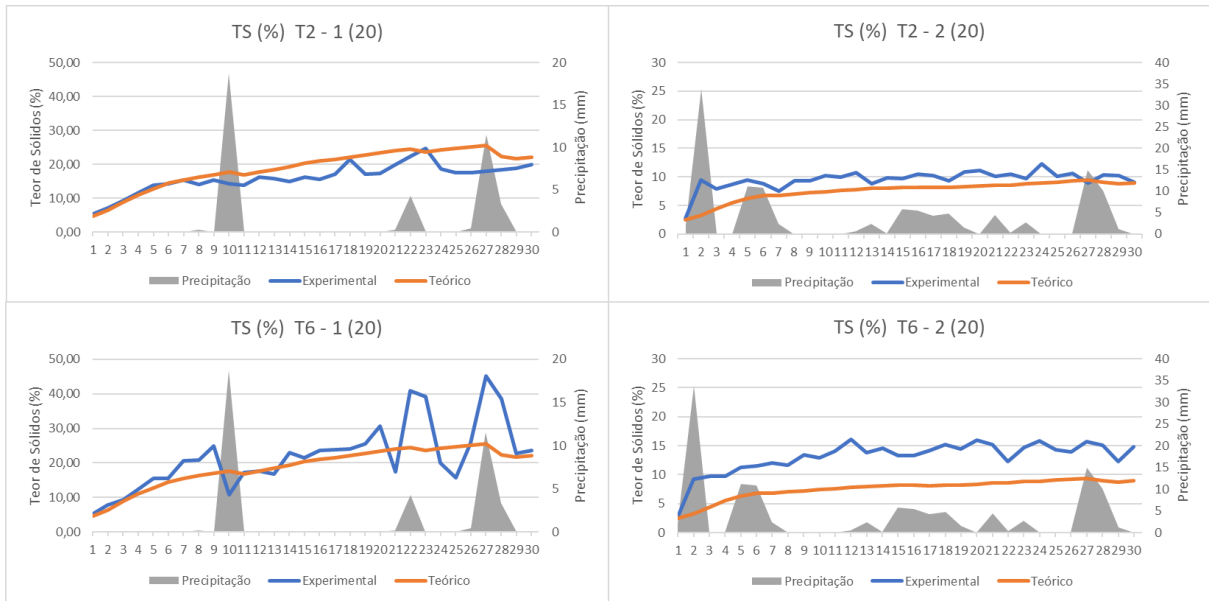


Figura 37 - Modelação do TS para os leitos de 20 cm sem revolvimento

A variação de TS relativamente às chuvas não seguiram os mesmos padrões dos leitos com revolvimento, repara-se que a maioria dos picos de diminuição de TS acontece nos dias posteriores a precipitação, talvez porque a crosta formada superficialmente dificulte a imediata infiltração da água.

Nota-se também a maior diferença entre as curvas experimentais e teóricas dos leitos 5 e 6 do ciclo 2, da Figura 35 e da Figura 37, respectivamente. Os dois casos aconteceram no ciclo 2, e possivelmente ocorreu uma melhor desidratação das lamas porque ao se adicionar lama aos dois leitos ocorreu uma perturbação da camada de areia, por motivos operacionais. O problema foi solucionado nos demais leitos diminuindo a aceleração do caminhão, o que tinha relação com a velocidade em que as lamas saiam da mangueira do mesmo.

A Figura 38 mostra o último grupo de leitos, os com 30 centímetros e sem revolvimento.

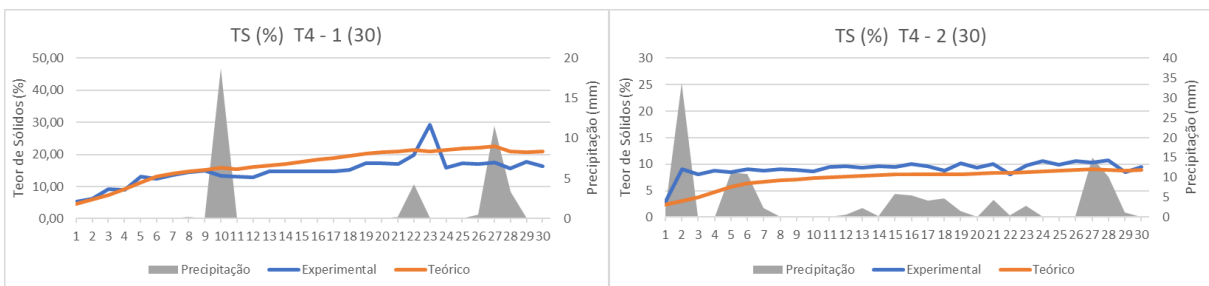


Figura 38 - Modelação do TS para os leitos de 30 cm sem revolvimento

Também se observa uma aproximação das curvas, e o mesmo padrão da interação da precipitação no tratamento T4 – 1, onde o TS era maior.

Como a curva teórica, para todos os leitos de cada grupo, recebia os mesmos fatores de multiplicação, a mudança apresentada entre os ciclos, aconteceu em função das diferenças climáticas e do teor de sólidos inicial das lamas. Os leitos onde ocorriam revolvimento obtiveram melhores valores para TS e a modelação acompanhou esses valores mais fielmente entre todo o processo, principalmente para os leitos com 20 cm.

Ao fim da modelação de TS, modelou-se o volume total de água drenada do sistema, utilizando a água drenada, referente a inicial, somando-a ao volume de água drenada da precipitada sobre os leitos.

A Figura 39 e a Figura 40, referem-se a água drenada explicada anteriormente, sendo para o ciclo 1 e ciclo 2, respectivamente.

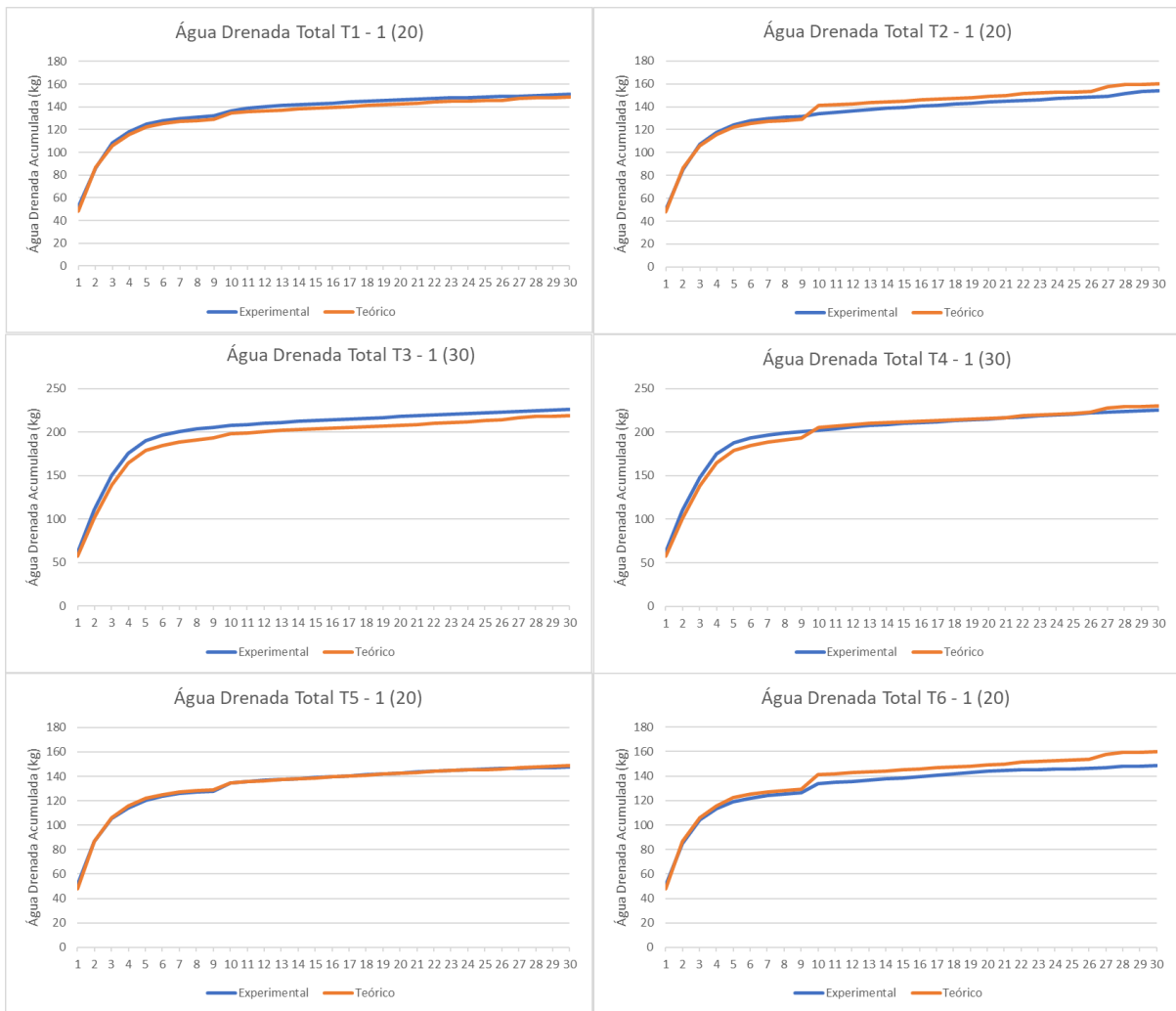


Figura 39 - Modelação da água total drenada acumulada no cliço 1

Nota-se que as curvas resultantes da modelação e as experimentais são muito próximas. Os tanques 2, 4, 5 e 6, ao fim do processo de desidratação de 30 dias, obtiveram valores para a curva teórica maiores em relação a curva experimental e os tanques 1 e 3 valores menores como se pode ver na Figura 39, porém os valores são próximos e são consideravelmente satisfatórios.

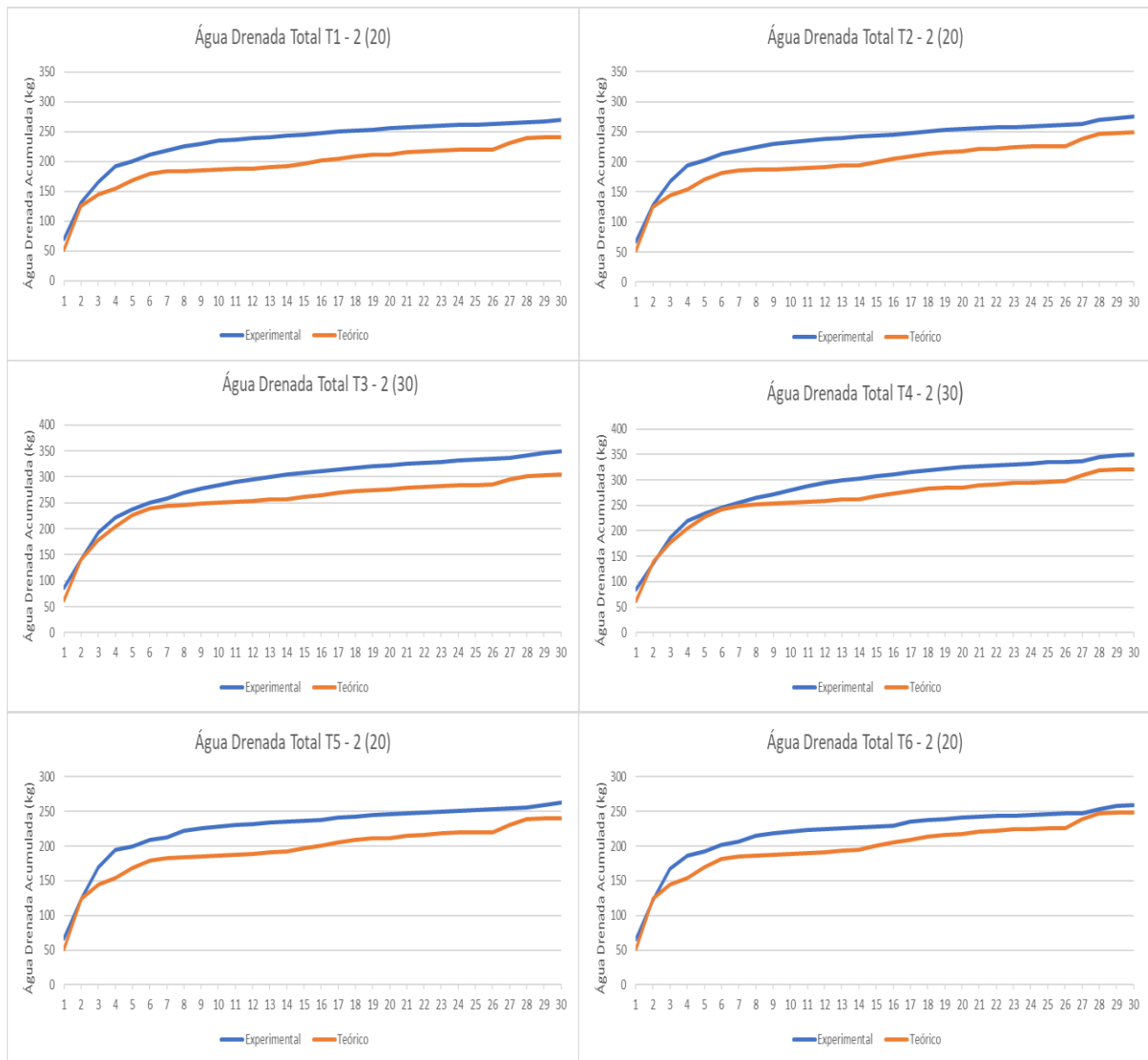


Figura 40 - Modelação da água total drenada acumulada no ciclo 2

No ciclo 2 a curva teórica ao decorrer do processo, encontra-se a baixo da experimental, porém esse efeito já era esperado. A modelação não considera a diferença de água drenada relativa à inicial em meio as diferentes condições meteorológicas, portanto no ciclo 2 o volume de água drenada teórico relativo à inicial deveria ser um pouco maior, já que no período um maior volume de água permaneceu no sistema, visto que a evaporação foi menor.

5 SIMULAÇÃO

Para efeitos demonstrativos, uma simulação foi feita utilizando a modelação elaborada anteriormente, uma estação de tratamento hipotética foi dimensionada para atender 2000 pessoas na cidade de Fortaleza, localizada no estado da Bahia no Brasil, onde as temperaturas e radiação solar são elevadas ao longo de todo o ano.

O volume de lama gerado pode ser calculado com dados contidos no Quadro 1, Portanto se considerarmos que o sistema de tratamento secundário escolhido para a ETAR fosse lamas ativadas convencionais, o volume de lama diário, gerado por habitante, seria de 3,1 a 8,2 litros. Para a simulação se adotou que cada pessoa gera 5 litros de lama diariamente, totalizando, 10 m³ de lama por dia. Os leitos foram dimensionados para operarem com 20 cm de camada de lama e possuírem 5 metros de largura e 20 de comprimento [11]. Portanto, cada leito teria capacidade para desidratar 20 m³, referente a produção de lama de 2 dias da ETAR.

Os dados meteorológicos utilizados são, do dia 1 ou dia 20, do mês de janeiro de 2020 [31]. O TS inicial considerado é de 5%, o equivalente à média de lamas de depuração.

A Figura 41 mostra os resultados de TS e espessura da camada de lama encontrados pela simulação, todos os cálculos estão contidos no Anexo V.

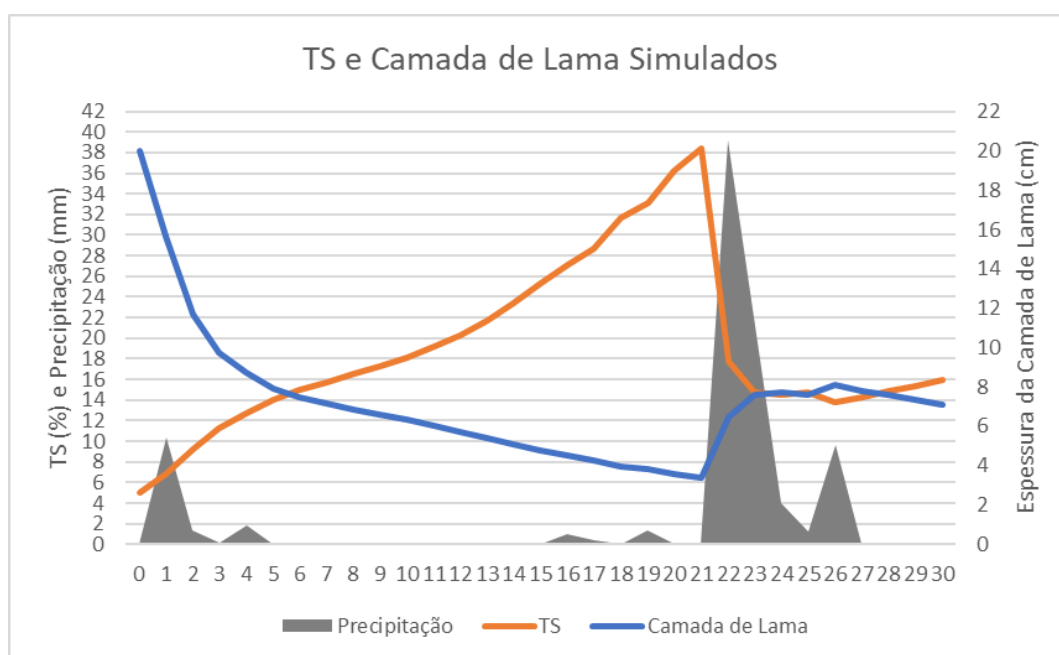


Figura 41 - Teor de sólidos e espessura da camada de lama simulados

Nota-se que dia 17 os valores de TS estão próximos de 30%, valor que muitos autores indicam como ideal para finalizar o processo, no mesmo dia camada de lama continha 1/5 da espessura inicial, tendo então 80% de redução de volume. Se aproximarmos o fim do processo para o dia 15, onde o valor de TS é 25%, em um mês com condições meteorológicas parecidas com os 15 primeiros dias, pode-se realizar 2 ciclos.

Para um período de 15 dias precisaríamos de 8 leitões, já que cada leito consegue suprir 2 dias de produção de lama da ETAR. Como se aconselha um leito extra para possíveis imprevistos, o ideal seria a construção de 9 leitões com as dimensões propostas anteriormente.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como já esperado, os resultados experimentais de TS e diminuição do volume de lamas do ciclo 1 foram melhores do que o do ciclo 2, devido aos fatores meteorológicos do período, evidenciando a melhor adequação de leitos de secagem para tratamento de lamas em localidades quentes e pouco úmidas. Também já era esperado que os leitos onde o revolvimento era realizado os resultados seriam melhores do que os leitos onde não era.

Esperava-se a criação de um biofilme na camada de cortiça, e que esse biofilme pudesse melhorar a qualidade do lixiviado, porém esse efeito não aconteceu. Talvez se a camada de cortiça fosse colocada abaixo de uma camada de areia os resultados teriam sido outros. Ainda se tratando de qualidade do lixiviado, o mesmo deve ser tratado antes de retornar a corpos hídricos.

A diminuição da quantidade de unidades formadoras de colônias de coliformes totais nas lamas não pôde ser expressa quantitativamente, porém de forma visual foi possível a conclusão de que o número era menor no fim do experimento, comprovando a capacidade do sol em reduzir esses microrganismos.

A modelação matemática elaborada se comportou bem em diferentes condições climáticas, acompanhando a concentração experimental de TS em praticamente todos os dias do experimento. Um ponto a se melhorar é sobre a maior evaporação da água absorvida nas lamas de água precipitada sobre os leitos quando o TS se encontra em valores mais altos, a modelação elaborada não previa esse fator, corrigindo-o de forma simplista ao considerar que essa água, que posteriormente seria evaporada, fosse drenada.

Para trabalhos futuros, sugere-se, para a modelação, que mais um fator de multiplicação seja incorporado a modelação, no qual possa considerar água evaporada da que é precipitada sobre os leitos e absorvida pelas lamas, assim corrigindo o problema encontrado quando ocorria chuvas em estágios mais avançados do processo, além de um estudo mais aprimorada de como a água relativa à inicial deixa os leitos perante as diferentes condições meteorológicas. Outra sugestão é a determinação diretamente de TS em laboratório, para que não necessite a conversão de sólidos totais em teor de sólidos, evitando assim os erros

experimentais que ocorrem na determinação de sólidos totais e também na conversão, visto que se utiliza a densidade média de sólidos de lamas.

Sugere-se também a utilização de outro software para a elaboração do modelo, buscando automatizar e facilitar a utilização da modelação. Ao realizar outros ciclos experimentais, também é sugerido a realização de análises de diferentes profundidades da camada de lama, para o estudo da possibilidade da retirada de lama dos leitos em diferentes momentos.

REFERÊNCIAS

- [1] ONU - Organização das Nações Unidas, “Conferências de meio ambiente e desenvolvimento sustentável: um miniguia da ONU | ONU Brasil,” 2017. [Online]. Available: <https://nacoesunidas.org/conferencias-de-meio-ambiente-e-desenvolvimento-sustentavel-miniguia-da-onu/>. [Accessed: 16-Sep-2019].
- [2] M. von Sperling, "*Princípios básicos do tratamento de esgotos*". (*Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 2*). 1996.
- [3] M. von Sperling, "*Biological wastewater treatment*" - Volume 1: *Wastewater characteristics, treatment and disposal*, vol. 45, no. 05. 2007.
- [4] P. R. S. Coimbra and C. L. Achon, “Lodo de reatores UASB: desaguamento através de protótipos de Leito de Drenagem,” *Rev. Nac. Gerenciamento Cid.*, pp. 28–42, 2016.
- [5] C. L. Achon, P. R. S. Coimbra, and E. Kellner, “Influência da manta geotêxtil e altura da camada de lodo no desaguamento de lodo anaeróbio em leito de drenagem,” vol. 24, no. 4, pp. 849–860, 2019.
- [6] R. T. D’Azevedo, “Tecnologias de tratamento de águas residuais urbanas,” 2009. [Online]. Available: http://naturlink.pt/article.aspx?menuid=6&cid=94055&bl=1&viewall=true#Go_1. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [7] M. von Sperling and R. Franci, “Lodo de esgotos: características e produção,” in *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*, UFMG, Ed. 2001, pp. 15–65.
- [8] “REVISTA TAE - Desinfecção de água: os principais sistemas disponíveis no mercado.” [Online]. Available: <http://www.revistatae.com.br/5230-noticias>. [Accessed: 28-Feb-2020].
- [9] Decreto-Lei 276/2009, “Decreto-Lei 276/2009, 2009-10-02 - DRE,” 2009. [Online]. Available: <https://dre.pt/pesquisa/-/search/490974/details/maximized>. [Accessed: 17-Sep-2019].
- [10] E. de C. Lampreia, “Simulação matemática da desidratação de lamas de ETAR em leitos de secagem,” 2017.
- [11] Metcalf and Eddy, "*Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*," 3a ed. Tr. McGraw-Hill, 1995.

- [12] V. Berco, “Análise qualitativa de lamas de etar e competitividade económica dos processos de tratamento e escoamento: Caso da ETAR da Guia,” Universidade Técnica de Lisboa, 2013.
- [13] M. A. P. Reali, “Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA,” *REALI, MAP al*, pp. 21–39, 1999.
- [14] J. S. Cordeiro, “Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA,” *REALI, MAP al*, pp. 107–124, 1999.
- [15] C. V. Andreoli, C. Hoppen, and O. S. Mäder Netto, “Desidratação do lodo aeróbio e séptico através do uso de centrifuga tipo decanter, com e sem o uso de polieletrólitos.” 21º Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, João Pessoa, 2000.
- [16] M. A. P. Reali, P. L. Jorge, and J. S. Cordeiro, “Desidratação de lodo por centrifugação. In: REALI, M. A. P. (coord.) Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA,” *REALI, MAP al*, pp. 85–106, 1999.
- [17] I. S. Turovskiy and P. K. Mathai, "*Wastewater sludge processing*". John Wiley and Sons, 2006.
- [18] C. V. Andreoli and F. von Sperling, Marcos Fernandes, “Biological wastewater treatment - Volume 6: Sludge.” IWA Publishing, Londres, 2007.
- [19] J. T. NOVAK and J. H. O`BRIEN, “Conditioning of chemical sludges,” *Water Pollut. Control Fed.*, vol. 46, no. 10, p. 2397, 1975.
- [20] A. S. Melo, “Contribuição para o dimensionamento de leitos de secagem de lodo,” 2006.
- [21] T. de A. Rodrigues, “Análise da viabilidade técnica e econômica de um leito de secagem de lodo gerado no tratamento de drenagem ácida de mina (DAM),” Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, 2016.
- [22] T. da C. C. Hazel, “Gestão de lamas fecais em sistemas urbanos de saneamento local,” 2015.
- [23] F. P. Incropera and et al, "*Fundamentos de transferência de calor e de massa*," Sexta Edição. 2007.
- [24] W. Braga Filho, "*Transmissão de calor*". São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

- [25] P. C. Sentelhas and L. R. Angelocci, "Temperatura do ar e do solo LCE 306-Meteorologia Agrícola." 2012.
- [26] APHA, "*Standard methods for the examination of water and wastewater*," 20th ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 1998.
- [27] ISO 9308-1, "Water quality – Enumeration of *Escherichia Coli* and coliform bacteria – Membrane filtration method for waters with low bacterial background flora." Switzerland, 2014.
- [28] P. Berdahi and M. Martin, "Emissivity of clear skies," *Sol. Energy*, vol. 32, no. 5, pp. 663–664, Jan. 1984.
- [29] A. L. Tonetti, "Pós-tratamento de efluente anaeróbio por filtros de areia." Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [30] A. P. C. Araújo, "Produção de Biogás a Partir de Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico," Uberlândia, 2017.
- [31] INMET, "Dados Meteorológicos," 2020. [Online]. Available: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. [Accessed: 10-Feb-2020].

ANEXOS

Os Anexo II, III, IV e V, por serem grandes e possuírem folhas de cálculo com fórmulas, foram disponibilizados online. Os links para acesso estão contidos a seguir em cada anexo.

Anexo I - Parâmetros e constantes utilizados na modelação

Tabela A - Unidades dos parâmetros utilizados na modelação

Parâmetro	Unidade	Símbolo
Coefficiente de Expansão Térmica	K^{-1}	β
Coefficiente de Transferencia de Calor	$W.m^{-2}.K^{-1}$	h
Comprimento Característico	m	L_c
Emissividade da Atmosfera	-	ϵ_{atm}
Número de Grashof	-	GR
Número de Nusselt	-	NU
Número de Rayleigh	-	Ra
Pressão de Vapor	hPa	P_v
Pressão de Vapor de Água Parcial	hPa	$P_{v,parcial}$
Radiação Solar	$W.m^{-2}$	R_{solar}
Taxa de Absorção de Calor por Radiação	W	$q''_{absorção}$
Taxa de Emissão de Calor por Radiação	W	$q''_{emissão}$
Taxa de Transferência de Calor de Transição	W	$q''_{transição}$
Taxa de Transferência de Calor por Convecção	W	$q''_{convecção}$
Temperatura da Superfície da Camada de Lama	K	T_{sl}
Temperatura de Ponto de Orvalho	$^{\circ}C$	$T_{orvalho}$
Temperatura do Ar*	$K - ^{\circ}C$	T_{ar}
Temperatura Equivalente do Céu	k	$T_{Céu}$
Tempo Decorrido Desde a Meia Noite	horas	T_{00}
Teor de Sólidos	%	TS
umidade Relativa	%	UR

* Na Equação 15* se utiliza em $^{\circ}C$

Tabela B - Constantes utilizadas na modelação

Parâmetro	Valor	Unidade	Símbolo
Absortividade das Lamas	0,8	-	α
Aceleração da Gravidade	9,80665	$m.s^{-2}$	g
Área da Superfície de Lama	1	m^2	A_s
Condutividade Térmica da Ar *	0,02534	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Φ
Constante de Stefan-Boltzann	5,675E-08	$Wm^{-2}.K^{-4}$	σ
Densidade da Água	1	$g.cm^{-3}$	ρ_a
Densidade de Lamas	1,01	$g.cm^{-3}$	ρ_l
Densidade dos Sólidos de Lamas	1,3	$g.cm^{-3}$	ρ_s
Emissividade das Lamas	0,6	-	ϵ
Entalpia de Vaporização da água*	2465900	$J.kg^{-1}$	ΔH_{vap}
Massa Volúmica das Lamas	1010	$kg.m^{-3}$	P_{lamas}
Número de Prandtl*	0,71	-	Pr
Perímetro da Superfície	4	m	P_s
Viscosidade Cinemática do Ar*	0,00001455	$m^2.s^{-1}$	ϑ

*Temperatura: $15^{\circ}C$

Anexo II – Folhas de cálculos utilizadas na modelação

https://drive.google.com/open?id=1T4h2xH0wI-eE1TJJOvhcy1t_i5gRirw4

Anexo III - Dados experimentais do ciclo 1

https://drive.google.com/open?id=1tbJ9oYMAwq0Ztd_QlltFBG3a237qgTel

Anexo IV - Dados experimentais do ciclo 2

<https://drive.google.com/open?id=1oTq2fOpgj6iVBNUDJu1tCtluNP3TBQTI>

https://drive.google.com/drive/folders/1Jo0omSBadK_G6M5ejjWNPo0OkEVTR

Qoq