



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Cleonice Lucia Barbosa Mattos da Cruz

**Estudo sobre a viabilidade de incorporação do lodo de estação de
tratamento de água no substrato para produção de espécies nativas da
Mata Atlântica (Brasil)**

Rio de Janeiro

2018

Cleonice Lucia Barbosa Mattos da Cruz

Estudo sobre a viabilidade de incorporação do lodo de estação de tratamento de água no substrato para produção de espécies nativas da Mata Atlântica (Brasil)

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial - Eixo Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos.

Orientadora: Profa. D.Sc. Elisabeth Ritter

Coorientadora: Profa.D.Sc. Ana Silvia Pereira Santos

Rio de Janeiro

2018

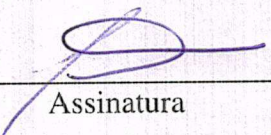
CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C957 Cruz, Cleonice Lucia Barbosa Mattos da Cruz.
Estudo da viabilidade de incorporação do lodo de estação de
tratamento de água no substrato para produção de espécies nativas da
Mata Atlântica (Brasil) / Cleonice Lucia Barbosa Mattos da Cruz. –
2018.
135f.
Orientadores: Elisabeth Ritter.
Coorientadora: Ana Silvia Pereira Santos.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia.
1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Lodo residual como fertilizante
- Teses. 3. Água - Purificação - Tratamento biológico - Teses. 4.
Fertilização de plantas - Teses. 5. Mata atlântica - Teses. I. Ritter,
Elisabeth. II. Santos, Ana Silvia Pereira dos. III. Universidade do Estado
do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 581.16: 628.355

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,
desde que citada a fonte.


Assinatura

RS, 23/08/2018.
Data

Cleonice Lucia Barbosa Mattos da Cruz

Estudo sobre a viabilidade de incorporação do lodo de estação de tratamento de água no substrato para produção de espécies nativas da Mata Atlântica (Brasil)

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial - Eixo Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos

Aprovada em 23 de agosto de 2018

Banca Examinadora



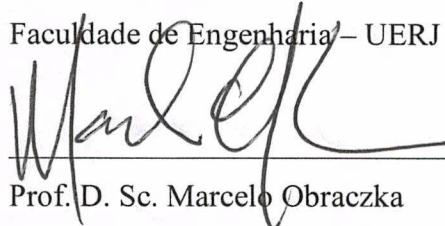
Profª. D.Sc. Elisabeth Ritter (Orientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ



Profª. D.Sc. Ana Silvia Pereira Santos (Coorientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. D. Sc. Marcelo Obraczka

Faculdade de Engenharia – UERJ



Profª. D.Sc. Renata de Oliveira Pereira

Faculdade de Engenharia - UFJF

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu marido Carlos Eduardo e aos meus filhos Eduardo e Lucia que viveram cada momento, entenderam cada dificuldade e me apoiaram em todas as etapas.

AGRADECIMENTO

Tenho muito a agradecer pela execução deste trabalho. Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu melhor amigo, meu companheiro, meu marido Carlos Eduardo que me apoiou e apoia incondicionalmente em todas as etapas da minha vida, principalmente neste mestrado. Que me incentivou e não me deixou desistir em nenhum momento. Que me consolou nas horas de tristeza e me mostrou que família briga junto para que os objetivos sejam alcançados. É dele que obtenho forças e segurança para continuar lutando e percorrendo meu sonho.

Agradeço ao meu filho mais velho Eduardo, que com sua sensibilidade me mostra todo dia que o mundo é bonito. Ele, com todo seu carinho, me acolheu, entendeu os momentos de separação e me deu muitos beijos que alimentaram minha alma e me acalentaram nas madrugadas de estudos.

Agradeço a minha filhinha Lucia, que mesmo pequena me mostra todo dia que a força de uma mulher nasce com ela. Ela que entendeu os momentos de separação e de pedido de silêncio. Que com sua alegria me faz ter vontade de seguir. Que com seu olhar e carinho me deu garra para concluir essa etapa.

Agradeço a minha coorientadora Ana Silva que para mim é exemplo de profissional, mãe e mulher. Foi minha parceira em todas as etapas da dissertação. Que com sua forma objetiva e clara, soube me direcionar e exigir de mim o melhor possível. Me ensinou que em uma sala de aula o conteúdo somente não é o importante, mas sim, a forma como ele é passado e principalmente a forma como ele é entendido.

Agradeço a minha orientadora Elisabeth Ritter por ser a pessoa responsável pelo direcionamento da minha carreira desde a época da graduação. Por ter me entendido em um momento difícil, me apoiado e incentivado a não abandonar um sonho. Por me mostrar que a orientação não é meramente uma atividade formal e que o lado pessoal e emocional é o diferencial para o sucesso.

Agradeço a instituição UERJ e todos seus docentes que de alguma forma me ajudaram na conclusão deste curso. Essa instituição e profissionais, que mesmo sofrendo pressão deste “governo” que tenta desmobiliza-los e desmotivá-los, abraçam seus alunos com tanto carinho e dedicação. Aqui incluo todos os professores do PEAMB e a secretária Elaine que auxiliam os alunos de mestrado.

Agradeço ao Engenheiro Alan Abreu pelos direcionamentos no experimento e por estar sempre disposto a me ajudar e sanar minhas dúvidas.

Agradeço a toda a Equipe do Replantando Vida, principalmente a equipe do Viveiro de Magé que me ajudou veemente na montagem do experimento e ao longo das medições. Deixo aqui meu agradecimento especial em memória do Sr. Carlinhos que muito me auxiliou no início do experimento, mas que infelizmente não pode presenciar o trabalho sendo concluído.

Agradeço ao chefe de departamento da Gerência Metropolitana Leste da CEDAE José Valter e toda sua equipe, principalemte os operadores da ETA Porto das Caixas que me auxiliou nas visitas de campo a estação.

Agradeço a Engenheira Sabrina Norris por estar do meu lado incansavelmente durante todo experimento executado. E que foi meu braço direito e esquerdo nesta etapa.

Agradeço ao Engenheiro Paulo Eduardo Aragon pelo apoio em algumas etapas da dissertação e por estar sempre disposto a me ajudar.

Agradeço a equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ pelo auxílio na execução dos ensaios físicos.

Agradeço a equipe do Laboratório de Qualidade de Água da CEDAE pelo auxílio na execução dos ensaios químicos.

Agradeço aos meus chefes Nélio Rodrigues e Paulo Henrique pelo incentivo, compreensão e apoio, principalmente nesta etapa final.

Agradeço a equipe da Assessoria de Gestão Ambiental da CEDAE que sempre me incentivaram., principalmente aos estagiários que fizeram parte e colocaram a “mão na massa” para que esse experimento fosse concluído.

Agradeço ao amigo João Viera por todas as conversas e orientações durante nosso café da tarde. Por ter despertado em mim a vontade de passar a diante meus conhecimentos.

Agradeço aos amigos da vida, aos colegas de mestrado e aos colegas da CEDAE, pelo companheirismo e apoio.

Agradeço a amiga Francine Portela por sempre me emprestar seu ombro e me motivar a ir adiante.

Agradeço a minha família, base da minha vida e aos meus sogros Terezinha e José Carlos pelos incentivos.

Agradeço a minha irmã Cleide por ter cuidado de mim na época que mais precisei.

Agradeço a minha irmã Cleone e ao meu cunhado Silvio por sempre me ajudarem nos momentos difíceis.

Agradeço a minha irmã Cleny e ao meu cunhado Carlos por cuidarem dos meus filhos com tanto amor como se fossem deles.

Agradeço aos meus sobrinhos, Tainara e Júlio pelo apoio. Nane, Hannah e Cadu por estar sempre torcendo por mim. Sylvia pelo carinho e por entender que é o estudo a base para nossas conquistas. Juninho por todo carinho e afeto que demonstrou desde o seu nascimento. E Rafaela por essa sobrinha parceira que cuida dos meus filhos como amor de uma irmã mais velha.

E por último, mas não menos importante agradeço a minha mãe, mulher guerreira que mesmo sem instrução soube me encaminhar na direção dos estudos. Meu exemplo de força, perseverança e amor.

Sonho que sonha só é só um sonho que sonha só, mas sonho que se sonha junto é realidade.

Raul Seixas

RESUMO

CRUZ, C. L. B. M. da. *Estudo sobre a viabilidade de incorporação do lodo de estação de tratamento de água no substrato para produção de espécies nativas da Mata Atlântica (Brasil)*. 2018. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O lodo é o principal resíduo de uma estação e tratamento de água (ETA) e sua destinação inadequada pode acarretar danos à saúde humana e ao meio ambiente. Diversas alternativas de disposição do lodo de ETA podem ser empregadas e principalmente alternativas que permitam a valorização de resíduos como matéria-prima. Neste trabalho foi avaliada a incorporação do lodo de ETA no substrato para produção de mudas de espécies nativas da Mata Atlântica. O lodo utilizado no experimento é proveniente da ETA Porto das Caixas, localizada no município de Itaboraí/RJ. Já o viveiro florestal localiza-se no município de Magé/RJ e ambos são operados pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE). Foram utilizadas as espécies *Schinus terebinthifolius* (Aroeira Pimenteira) e *Pterocarpus violaceus* (Aldrago). Atualmente o viveiro utiliza no substrato 50% de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e 50% de um solo adquirido comercialmente. O objetivo do presente trabalho foi a substituição do solo comercial pelo lodo de ETA. Para isso foram produzidos percentuais de lodo de ETA com percentuais de lodo de ETE. O primeiro traço, traço testemunho (T1), corresponde ao utilizado no viveiro, os demais possuem as seguintes composições: T2 com 100% de lodo de ETA, T3 com 75% de lodo de ETA e 25% de lodo de ETE, T4 com 50% de lodo de ETA e 50% lodo de ETE, T5 com 25% de lodo de ETA e 75% lodo de ETE e T6 com 100% lodo de ETE. Algumas análises foram realizadas para verificação da possibilidade de incorporação do lodo da ETA. Analisando os resultados verificou-se que é possível incorporar o lodo de ETA para produção de mudas, porém a composição do traço é primordial para a utilização. O traço que apresentou melhores resultados foi o traço T5, pois foi o único que alcançou 100% de sobrevivência e maiores taxas de crescimento em relação à altura e ao diâmetro do coleto, assim como o maior Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Um fator limitante verificado para o uso do lodo em produção de mudas é o teor de umidade que está diretamente relacionado à quantidade de lodo de ETA incorporado ao traço. Quanto maior o teor de umidade mais difícil é a trabalhabilidade dos traços, o que afeta a produção nos viveiros florestais. Foi verificado que os traços com maior porcentagem de lodo de ETA não possuem nutrientes suficientes para a produção das mudas, visto que as concentrações de nutrientes como Cálcio e Fósforo necessários para crescimento das mudas, ficaram abaixo das concentrações encontradas no lodo de ETE. Em relação aos benefícios econômico e ambiental, verificou-se que é possível evitar o uso anual de aproximadamente 7.500 m³ de solo, gerando uma economia na compra desse material de aproximadamente R\$ 432 mil reais ao ano. Considerando o volume de lodo de ETA que deixaria de ser disposto em aterro sanitário, seria possível obter uma economia anual acima de R\$ 290 mil. Assim, de maneira global, a economia anual para a produção de mudas atualmente poderia ser superior a R\$ 720 mil reais. Desta forma o trabalho contribui com uma importante ferramenta de gestão do lodo gerado em estações de tratamento de água, que até os dias atuais ainda apresenta deficiência na destinação ambientalmente adequada.

Palavras-chave: Lodo de estação de tratamento de água; Produção de mudas florestais; Uso benéfico de resíduos sólidos.

ABSTRACT

CRUZ, C.L.B.M. da. *Study on viability of incorporating the water treatment plant sludge in the substrate for the production of native species of the Atlantic Forest (Brazil)*. 2018. 135f. Dissertation (Masters in Environmental Engineering) - Faculty of Engineering, Rio de Janeiro State University, Rio de Janeiro, 2018.

The main method of a water treatment plant (WTP) and its inadequate disposal can cause damage to human health and the environment. The different alternatives of disposal of WTP can be employed and mainly alternatives that can be valued as raw material. This study was evaluated the incorporation of the WTP in substrate to production of seedlings of species natives of Atlantic Forest. The sludge used in the experiment comes from WTP Porto das Caixas, located in the municipality of Itaboraí / RJ. The nursery is located in the municipality of Magé / RJ and both are operated by the State Water and Sewage Company (CEDAE). The species *Schinus terebinthifolius* (Aroeira Pimenteira) and *Pterocarpus violaceus* (Aldrago) were used. Currently, the nursery uses 50% of the sludge from the sewage treatment plant (WTS) and 50% of a commercially purchased soil in the substrate. The objective of this work was to replace the commercial soil with WTP sludge. For this, percentages of WTP sludge with percentages of WTS sludge were produced. The first trace, trace testimony (T1), corresponds to that used in the nursery, the others have the following compositions: T2 with 100% of WTP sludge, T3 with 75% of WTP sludge and 25% of WTS sludge, T4 with 50% of WTP sludge and 50% of WTS sludge, T5 with 25% of WTP sludge and 75% of WTS and T6 sludge with 100% WTS sludge. Some analyzes were carried out to verify the possibility of incorporation of WTP sludge. Analyzing the results it was verified that it is possible to incorporate WTP sludge for seedling production, but the composition of the trace is primordial for the use. The trace that presented the best results was the T5 trace, as it was the only trace that achieved 100% survival and higher growth rates in relation to the height and collection diameter, as well as the higher Dickson Quality Index (DQI). A limiting factor verified for the use of sludge in seedling production is the moisture content that is directly related to the amount of WTP sludge incorporated into the trace. The higher the moisture content the more difficult is the workability of the traces, which affects the production in the forest nurseries. It was verified that the traces with higher percentage and WTP sludge do not have enough nutrients for the seedlings production, since the concentrations of nutrients such as Calcium and Phosphorus needed for seedling growth were below the concentrations found in the WTS. About the economic and environmental benefits, it was verified that it is possible to avoid the annual use of approximately 7,500 m³ of soil, generating an economy in the purchase of this material of approximately R\$ 432 thousand a year. Considering the volume of WPA sludge that would no longer be disposed of in a sanitary landfill, it would be possible to obtain annual savings of over R\$ 290,000. Thus, overall, the annual savings for seedlings production could currently exceed R \$ 720 thousand. In this way the work contributes with an important tool of management of the sludge generated in water treatment plants, that until the present day still presents deficiency in the environmentally adequate destination.

Keywords: Sludge from water treatment plant; Production of forest seedlings; Beneficial use of solid waste.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Unidades de um típico sistema de abastecimento de água	21
Figura 2 - Diagrama Esquemático do sistema de abastecimento de água Imunana/Laranjal...	22
Figura 3 - Diferença visual da qualidade da água captada em um manancial situado em uma bacia preservada e um manancial situado em uma bacia degradada.....	25
Figura 4 - Fluxograma da parte líquida de uma Estação de Tratamento de Água.....	27
Figura 5 - Ponto de adição do coagulante na Calha Parshal.....	28
Figura 6 - Flocculador hidráulico por Chicana	29
Figura 7 - Decantador de alta taxa e decantador convencional	30
Figura 8 – Etapa de Filtração.....	31
Figura 9 - Sistema de desinfecção por pastilhas de Hipoclorito de Cálcio	32
Figura 10 - Fluxograma de entrada dos produtos químicos e saída dos resíduos nas etapas de tratamento	34
Figura 11 - Tipos de decantadores e forma de remoção do lodo	37
Figura 12 - Diagrama da produção de lodo de ETA em alguns países no ano 2000	38
Figura 13 - Exemplo de curva granulométrica	40
Figura 14 - Distribuição da água no lodo de ETA.....	45
Figura 15 - Fluxograma de parte líquida e da parte sólida de uma ETA convencional.....	46
Figura 16 - Destinação final dos lodos de ETAs. no Brasil.....	47
Figura 17 - Ordem de prioridade do gerenciamento dos resíduos sólidos segundo a PNRS. ..	49
Figura 18 - Fluxograma de um sistema de esgotamento sanitário	50
Figura 19 - Esquema geral do experimento.....	56
Figura 20 - Localização da ETA Porto das Caixas no município de Itaboraí, Região Metropolitana do Rio de Janeiro	57
Figura 21 - Vista da ETA Porto das Caixas	58
Figura 22 - Lodo centrifugado da ETA Porto das Caixas com teor de sólidos a 25%.....	59
Figura 23 - Vista do viveiro florestal localizado em uma unidade prisional no município de Magé.....	61
Figura 24 - Árvore da Aroeira Pimenteira e Aldrago	62
Figura 25 - Croqui da área do experimento e a forma de distribuição das mudas no local	64
Figura 26 –Coleta das mudas no berçário do viveiro (continua).....	65
Figura 27 – Aspecto dos materiais que compõem os traços	67

Figura 28 - Processo de quantificação dos insumos para o preparo dos traços (continua)	68
Figura 29 - Enchimento dos recipientes das amostras.....	70
Figura 30 - Processo de replicagem das mudas (continua)	72
Figura 31 – Etapas da análise do teor de umidade de campo dos traços.....	76
Figura 32– Textura das amostras de cada traço colocadas para secagem em temperatura ambiente	77
Figura 33 - Etapa do peneiramento da análise de granulometria dos traços (continua).....	78
Figura 34 - Etapa da sedimentação da análise de granulometria dos traços	80
Figura 35 – Mudas consideradas mortas no experimento	81
Figura 36 - Medição da altura das mudas.....	83
Figura 37 – Separação da parte aérea e da raiz das mudas selecionadas (continua).....	85
Figura 38 – Curvas Granulométrica de todos os traços.....	93
Figura 39 - Porcentagem de material presente em cada traço	93
Figura 40 - Consistências dos traços utilizados no experimento (continua)	95
Figura 41 – Taxa de Sobrevivências das Mudas.....	97
Figura 42 - Crescimento das mudas ao longo das medições em relação à altura.....	100
Figura 43 - Crescimento das mudas ao longo das medições em relação ao diâmetro.....	101
Figura 44 - Índice de Qualidade de Dickson dos Traços.....	103

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema produtor de água do Estado do Rio de Janeiro	22
Tabela 2 - Índices de abastecimento de água por região brasileira e volume de água tratado em ETA e por simples desinfecção.....	24
Tabela 3 - Classificação das águas de acordo com o tipo de manancial, os parâmetros característicos e o tratamento mínimo necessário conforme NBR 12.216 de 1992.....	26
Tabela 4 - Relação da produção de lodo de ETA com o tipo de manancial e a qualidade da água bruta captada	35
Tabela 5 - Características típicas do lodo de sulfato de alumínio	39
Tabela 6 - Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.....	41
Tabela 7 - Composição granulométrica do lodo de ETAs estudadas por alguns autores	42
Tabela 8 - Composição química de lodos de ETAs estudados por alguns autores	43
Tabela 9 - Concentração dos sólidos em lodos de águas com baixa turbidez	44
Tabela 10 - Classe do lodo com relação à concentração de agentes patogênicos e a restrição para utilização na agricultura.....	51
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do lodo da ETA Porto das Caixas realizado pelo INEA em 2013.....	60
Tabela 12 - Porcentagem de insumos utilizados em cada traço	68
Tabela 13 - Quantidade de recipientes (14L) utilizados para o preparo de cada traço.....	70
Tabela 14 - Tempo de enchimento dos recipientes utilizados no experimento	71
Tabela 16 - Resultados das análises químicas dos insumos e nutrientes necessários para o crescimento das mudas	90
Tabela 17 - Teor de Umidade.....	92
Tabela 18 - Relação entre o tempo de enchimento do recipiente o teor de umidade dos traços	95
Tabela 19 - Taxa de Crescimento em relação a altura (Th)	98
Tabela 20 - Taxa de Crescimento em relação ao diâmetro do coletor (Tcd).....	99
Tabela 21 - Volume e Custo evitado de recursos naturais	104
Tabela 22 - Volume e Custo evitado de disposição em aterro	104
Tabela 23 - Custo total evitado	105

LISTAS DE EQUAÇÕES

Equação 1- Tempo de enchimento de cada recipiente utilizado.....	71
Equação 2 - Teor de Umidade	74
Equação 3 – Massa do Solo Úmido.....	75
Equação 4 – Massa do Solo Seco	75
Equação 5 – Massa da Água.....	75
Equação 6 - Taxa de Sobrevivência.....	81
Equação 7 - Taxa de crescimento em relação a altura das mudas	82
Equação 8 - Taxa de crescimento em relação ao diâmetro do coleto	82
Equação 9 - Índice de Qualidade de Dickson.....	84
Equação 10 – Volume de recurso natural evitado.....	87
Equação 11 - Volume evitado na disposição de lodo de ETA do aterro.	87
Equação 12 - Custo evitado pela aquisição de solo comercial;.....	88
Equação 13 - Custo evitado na disposição de lodo de ETA em aterro sanitário	88
Equação 14 - Custo Total evitado pela companhia de saneamento	88

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
EUA	Estados Unidos da América
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
ERJ	Estado do Rio de Janeiro
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
SST	Sólidos em Suspensão Total
MO	Matéria Orgânica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
COMPERJ	Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
IPCA	Índice de Preço Consumidor
EMOP	Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 Objetivo Geral.....	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Lodo do Tratamento de Água	20
2.2 Lodo do Tratamento de Esgoto.....	49
2.3 Espécies da Mata Atlântica	52
2.4 Programa Replantando Vida	54
3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 Caracterização dos Insumos e da Área em Estudo	56
3.2 Aparato Experimental	63
3.3 Análises dos Experimentos.....	73
3.4 Avaliação dos Benefícios da Incorporação do Lodo de ETA no Substrato	86
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1 Análise Química dos Insumos	89
4.2 Análises Física dos Traços.....	91
4.3 Trabalhabilidade dos Traços.	94
4.4 Taxa de Sobrevivência	97
4.5 Taxa de Crescimento.....	98
4.6 Índice da Qualidade de Dickson	102
4.7 Análises dos benefícios da incorporação do lodo de ETA no substrato.....	103
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6. RECOMENDAÇÕES.....	108
REFERÊNCIAS	109
ANEXO A – RELATÓRIO DE ENSAIO – GELAB N° 1175/13.....	121
ANEXO B – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS TRAÇOS.....	124

INTRODUÇÃO

O lodo é considerado o principal resíduo de uma estação de tratamento de água (ETA) e sua disposição inadequada pode acarretar sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente. Na Europa, milhões de toneladas de lodo de ETA são produzidos ao ano e esse número vem crescendo durante as décadas (BASIBUYUK e KALAT, 2004). Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) afirmam que o problema do lodo de ETA é mundial, e suas características variam de acordo com a localidade que a bacia hidrográfica está inserida e que, as alternativas para sua disposição também podem variar de acordo com o país onde a ETA está localizada. Como por exemplo, tem-se nos países nórdicos e em outros da Europa e América do Norte, o congelamento do lodo é uma alternativa comumente considerada, enquanto, é impensável tal possibilidade em países de clima tropical como no Brasil.

Diversas alternativas de disposição do lodo de ETA podem ser empregadas. Conhecer as características desse resíduo é primordial para propor a melhor destinação, principalmente porque as legislações ambientais estão cada vez mais restritivas em relação à disposição dos resíduos (HSIEH e RAGHU, 2008). Propor as alternativas que permitam a valorização de resíduos como matéria-prima é uma tendência mundial nos dias atuais (POZZOBON, LUCAS E MORA, 2013).

Vários estudos sobre o uso benéfico do lodo de ETA vêm sendo desenvolvidos no mundo. Alguns estados, nos Estados Unidos da América (EUA), já possuem legislações próprias para incentivar o seu reaproveitamento, como por exemplo, o estado do Colorado (EUA), onde o departamento de saúde pública e meio ambiente possui uma legislação que regulamenta esta prática (COLORADO, 2004). O Brasil não possui uma legislação específica para o aproveitamento do lodo, porém apresenta dois aspectos legais importantes que devem ser considerados: i) Lei 12.305 de 2010 que aborda a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e prioriza a reutilização e a reciclagem dos resíduos e a diminuição de envio para o aterro sanitário (BRASIL, 2010); ii) Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução CONAMA nº 375 de 2006 que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos gerados em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) (BRASIL, 2006). O primeiro aborda os resíduos sólidos em geral e faz menção à necessidade de reutilização e reciclagem deste como um todo. Apesar de o segundo abordar o lodo de esgoto, ressalta-se aqui que este tema vem sendo estudado no Brasil e que esta legislação encontra-se em fase de revisão.

No desenvolvimento desse trabalho, observou-se que a maioria das pesquisas sobre o tema visa o estudo da aplicabilidade do lodo de ETA na construção civil como incorporação

na indústria cerâmica e na fabricação de cimento. Segundo Ahmad, Ahmad e Alam (2016), estudos também vem sendo realizados para a sua utilização em recuperação de áreas degradadas e adsorção de nutrientes em solos. Sabe-se ainda da relevância de estudos que visam a utilização de lodo de ETA em áreas agricultáveis. Entretanto, poucos estudos relacionados à incorporação do lodo de ETA na produção de mudas foram encontrados na pesquisa bibliográfica.

De acordo com o cenário exposto e no contexto dos principais danos que o descarte inadequado de resíduo de ETA pode causar no meio ambiente, o presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade de incorporação do lodo de ETA no substrato para a produção de mudas de espécies nativas da Mata Atlântica. O trabalho ainda relaciona a possibilidade da redução do consumo de recursos naturais com o custo da destinação desse resíduo em aterros sanitários.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de incorporação do lodo de tratamento de água, em diferentes traços no substrato (composto com lodo de tratamento de esgoto) para a produção de mudas de espécies nativas da Mata Atlântica.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os parâmetros químicos do lodo de ETA de forma a permitir uma análise sobre a interferência destes no desenvolvimento das mudas em função da sua incorporação no substrato.
- Avaliar as propriedades físicas dos traços utilizados para produção das mudas em relação ao teor de umidade e granulometria.
- Avaliar a trabalhabilidade do lodo de ETA incorporado ao substrato em relação ao enchimento dos recipientes utilizados na produção das mudas, de acordo com o tempo de enchimento e o teor de umidade.
- Avaliar o desenvolvimento das mudas produzidas nos diferentes traços em relação a taxa de sobrevivência, taxa de crescimento, e Índice de Qualidade de Dickson (IQD).
- Avaliar os benefícios da utilização do lodo de ETA na incorporação dos substratos para produção de mudas, em relação à redução de extração de recursos naturais, aumento da vida útil do aterro sanitário, destinação adequada do resíduo gerado e atendimento aos aspectos legais vigentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lodo do Tratamento de Água

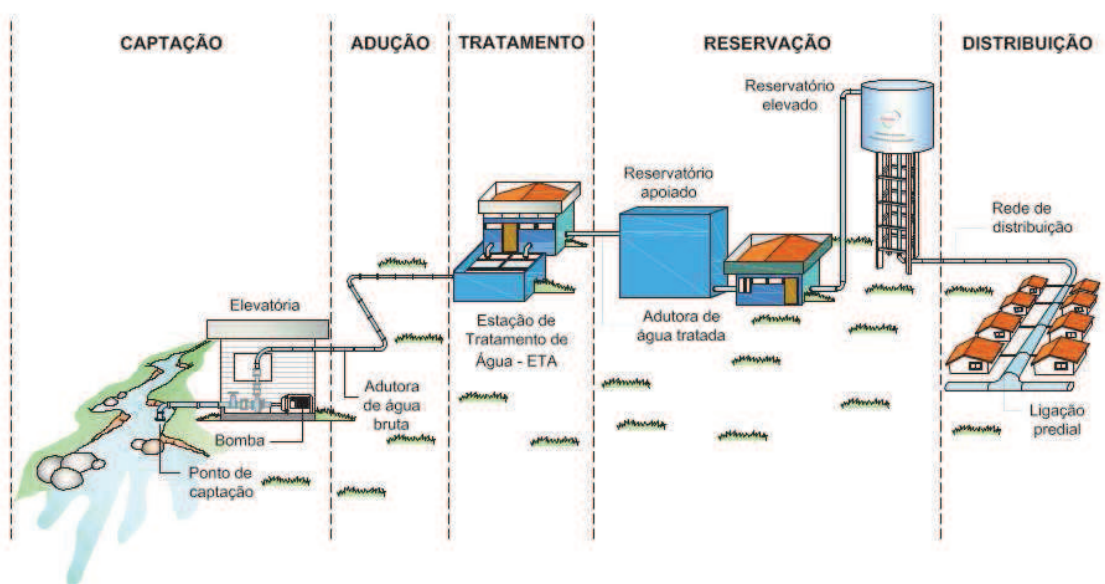
O lodo é o principal resíduo de uma estação De tratamento de água (ETA) que é parte integrante de um sistema de abastecimento de água (SAA) de uma localidade. O lodo é na sua maioria proveniente dos decantadores e em minoria da lavagem dos filtros. A sua composição é de materiais orgânicos e inorgânicos provenientes da água captada e varia de acordo com o uso da bacia hidrográfica na qual o manancial está inserido. Também compõe o lodo, produtos químicos utilizados no tratamento, geralmente sulfato de alumínio adicionado no processo de coagulação, além de cal, polímeros e outros produtos. O lodo de ETA é considerado resíduo sólido, de acordo com a NBR 10004/04 (ABNT, 2004) e por isso deve ser destinado de acordo com as exigências tecnológicas estabelecidas. O descarte do lodo no corpo receptor, além de provocar danos à saúde da população e ao meio ambiente, devido a poluição ou contaminação do corpo hídrico, é considerado crime ambiental de acordo com a Lei 9605/98 (BRASIL, 1998). Para destinar adequadamente o lodo, muitas vezes há a necessidade de redução do teor de umidade, a fim de torná-lo mais sólido e com menor volume. Assim é possível facilitar e diminuir o custo de transporte e de destinação. Existem várias formas de desidratação do lodo e uma delas, adotada na geração do lodo utilizado nesta pesquisa, é a centrifugação. A disposição final de um resíduo sólido, incluindo o lodo de ETA é o aterro sanitário. Porém existem várias formas de reutilizar ou reciclar o lodo de ETA, antes da disposição adequada. Entre eles, pode-se citar a utilização na construção civil, com a incorporação do lodo em blocos cerâmicos e solo-cimento. Também se pode utilizar o lodo como material de cobertura de aterro sanitário, reciclagem de coagulantes, recuperação de áreas degradadas e como substrato no plantio de mudas. A reutilização do lodo é uma prática cada vez mais recorrente nas companhias de saneamento, visto que além da diminuição do custo de destinação final do resíduo, as empresas estão atendendo a Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010) em relação à prioridade do gerenciamento dos resíduos sólidos. Dessa forma, a geração do lodo de ETA em todo o processo do sistema de abastecimento de água, será descrito neste capítulo.

Sistema de Abastecimento de Água

O sistema de abastecimento de água (SAA) caracteriza-se pela retirada da água de um manancial, adequação da qualidade desta água a fim de torná-la portátil para consumo

humano e o transporte da água tratada para população. Geralmente o SAA é composto por: manancial, captação, adução, tratamento, reservação, rede de distribuição, estações elevatórias e ramal predial (FUNASA, 2015). Esta estrutura pode variar dependendo da localidade onde sistema será implantado ou até mesmo do tipo de tratamento empregado. A Figura 1 apresenta as unidades de um sistema de abastecimento de água típico.

Figura 1 - Unidades de um típico sistema de abastecimento de água



Fonte: FUNASA, 2015.

Um sistema de produção de água pode ser considerado isolado ou integrado. O sistema isolado atende somente um município e é captado em um único manancial. O integrado é captado em mais de um manancial e pode atender um ou mais municípios. O tipo a ser adotado vai depender da capacidade de abastecimento do manancial e da demanda de consumo da população atendida. Segundo ANA (2010) destaca que nas grandes cidades cerca de 70% dos municípios atendidos são abastecidos predominantemente por manancial superficial. Destes 43% estão ligados ao sistema integrado, representando 80% das demandas de água pela população. No Estado do Rio de Janeiro (ERJ) 67% das sedes urbanas possuem sistema isolado de abastecimento. Já os 33% restantes das sedes que possuem sistema integrado atendem a maioria da população, cerca de 80%, correspondente ao abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e Região dos Lagos. A Tabela 1 apresenta os sistemas produtores do ERJ, informando seus principais mananciais e sedes urbanas atendidas.

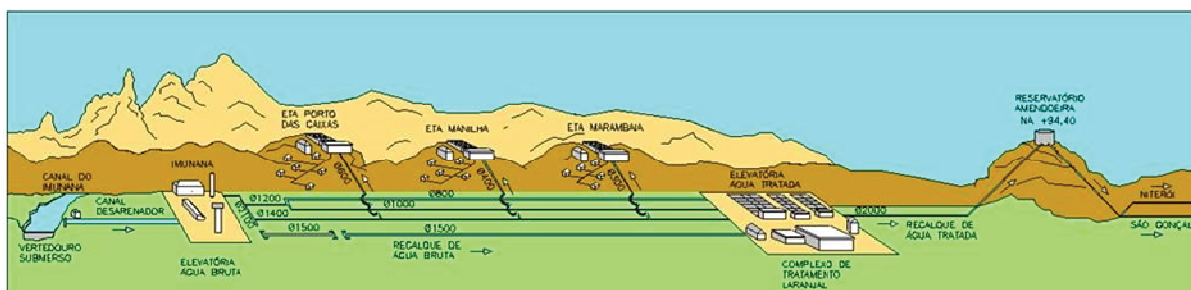
Tabela 1 - Sistema produtor de água do Estado do Rio de Janeiro

Sistema Produtor	Principais Mananciais	Sedes Urbanas Atendidas
Integrado Acari	Nascentes das serras da Bandeira, do Tinguá, do Macuco e do Couto	Belford Roxo, Duque de Caxias, Nova Iguaçu
Integrado Guandu	Rio Paraíba do Sul e Pirai (transposição) e Guandu	Beldord Roxo, Duque de Caxias, Japeri, Mesquita, Nilópolis, Nova Iguaçu, Queimados, Rio de Janeiro, São João de Meriti
Integrado Imunana-Laranjal	Rios Macuco e Guapiaçu	Itaboraí (apenas água bruta), Niterói, Rio de Janeiro (bairro de Ilha de Paquetá), São Gonçalo
Integrado Ribeirão das Lajes	Ribeirão das Lajes, da bacia do rio Pirai	Itaguaí, Japeri, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, Rio de Janeiro, Seropédica
Isolados	Mananciais Superficiais / Mistos	Guapimirim, Magé, Tanguá

Fonte: ANA, 2010.

A Figura 2 apresenta com mais detalhes o diagrama esquemático do SAA Imunana/Laranjal. Este é um sistema integrado operado pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) que abastece os municípios de Niterói, São Gonçalo, Rio de Janeiro (bairro da Ilha de Paquetá) e Itaboraí (água bruta). Itaboraí é a localidade onde está inserido a ETA de estudo deste trabalho, ETA Porto das Caixas.

Figura 2 - Diagrama Esquemático do sistema de abastecimento de água Imunana/Laranjal



Fonte: CEDAE, 2018.

Qualidade da Água

Segundo Richter e Netto (1991), o tratamento a ser adotado para a água após a escolha de um determinado manancial, deverá compreender somente os processos imprescindíveis à obtenção da qualidade que se deseja, com custo mínimo. Para isso a escolha do manancial é de suma importância em um projeto, pois quanto menor a qualidade da água, maior será a necessidade de um tratamento com custos elevados. A Resolução CONAMA nº 357 de 2005 que classifica os corpos hídricos de acordo com seus usos preponderantes, também indica o tipo de tratamento necessário para a água superficial, de acordo com a classe. Esta determina valores para parâmetros de qualidade de água que devem ser obedecidos para o cumprimento do uso. Por exemplo, rios classificados como especial, que possuem uma qualidade da água superior aos demais, necessitam apenas de um tratamento por desinfecção simples. Já corpos hídricos classificados como classes 2 ou 3 necessitam de um tratamento convencional ou até mesmo avançado antes de serem utilizados pela população (Brasil, 2005). Ressalta-se que a Portaria (MS) nº 2.914/2011 que aborda diretrizes e parâmetros de potabilidade de água indica que qualquer água superficial, em contradição com a Resolução CONAMA nº 357/2005, deve passar minimamente por um sistema de filtração antes da desinfecção.

A Tabela 2 demonstra os dados de abastecimento doméstico no Brasil, de acordo com as informações apresentadas no Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS) (SNIS, 2018). Ressalta-se que o último Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto do SNIS foi lançado em fevereiro de 2018, com dados relacionados ao ano de 2016. Observa-se assim que naquele ano, mais de 5.000 municípios possuíam sistema de abastecimento de água atendendo uma população de quase 167 milhões de habitantes. Em relação do volume tratado, cerca 13 bilhões de metros cúbicos de água por ano foram tratados em Estações de Tratamento de Água (ETA) e menos de 3 bilhões de metros cúbicos de água por ano foram tratados por desinfecção simples (SNIS, 2018).

Tabela 2 - Índices de abastecimento de água por região brasileira e volume de água tratado em ETA e por simples desinfecção

	Qd. Municípios atendidos com abast de água [município]	Pop. total atendida com abast. de água [habitante]	Volume de água tratado em ETA(s) [1.000 m³/ano]	Vol. tratado por simples desinfecção [1.000 m³/ano]
Norte	361	8.526.856	606.485,08	260.307,18
Nordeste	1.623	39.992.748	2.419.618,58	617.838,11
Sudeste	1.598	78.250.119	7.035.618,16	1.180.203,27
Sul	1.144	26.026.720	1.921.957,43	336.778,63
Centro-Oeste	435	13.815.128	865.221,41	297.030,59
Brasil	5.161	166.611.571	12.848.900,66	2.692.157,78

Fonte: SNIS, 2018.

Os padrões de potabilidade fixam valores para os parâmetros da qualidade de uma água para que seja adequada para consumo humano. No Brasil, a portaria que fixa esses padrões atualmente é a Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 que consolidou as normas de ações e os serviços de saúde do sistema único de saúde, e entre elas a Portaria nº 2.914 de 2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2017). Netto et al. (1998) enfatiza que os processos de tratamento realmente devem atender os padrões de potabilidade exigidos, porém as análises iniciais para elaboração dos projetos nos mananciais de abastecimento devem ocorrer em um período longo de tempo e não somente com uma única análise. Isso porque as características dos mananciais, principalmente os superficiais, podem variar significativamente ou longo do tempo.

O escoamento superficial em períodos chuvosos acaba carreando para os rios partículas e impurezas do solo, o que aumenta a turbidez da água neste período em relação aos dias secos. Este fator se agrava se o manancial não possuir mata ciliar ou mesmo possuir uma mata ciliar pouco densa. O uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica é outra característica que influencia na qualidade da água de um manancial. Os mananciais inseridos nas áreas urbanas das bacias ou localizados a jusante dessas áreas, geralmente são mananciais com a qualidade da água baixa, devido à poluição causada pela cidade ali inserida. E como já visto, a qualidade da água de um manancial é um fator imprescindível para a escolha do tratamento adequado. A Figura 3 apresenta a diferença visível da qualidade da água em relação a um manancial preservado e a de um manancial degradado. Ressalta-se que não necessariamente um manancial com aspecto visual agradável seja de boa qualidade para abastecimento doméstico.

Figura 3 - Diferença visual da qualidade da água captada em um manancial situado em uma bacia preservada e um manancial situado em uma bacia degradada



(a)



(b)

Legenda: (a) captação de um manancial preservado por mata ciliar; (b) captação de um manancial degradado.
Fonte: O autor, 2017.

Estação de Tratamento da Água

Pode-se destacar a turbidez como um dos parâmetros mais importantes no dimensionamento de uma estação de tratamento de água. A turbidez decorre da presença de sólidos em suspensão e para Richter (2009) pode ser interpretada como uma medida indireta da quantidade de sólidos em suspensão, o que torna útil para controle do tratamento de água potável. Porém, não é só a turbidez um parâmetro para definir o tratamento mais adequado, diversos outros parâmetros também deveram ser analisados. A NBR nº 12.216 de 1992, que apresenta os procedimentos para elaboração de projeto de ETA, define o tratamento mínimo necessário em relação às características da água bruta superficial ou subterrânea captada a partir de parâmetros como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), coliformes, pH, cloretos e fluoretos (ABNT, 1992). É importante destacar que essa Norma é antiga, entretanto adotada até os dias atuais. A Tabela 3 resume o tipo de tratamento de água mínimo requerido em função do tipo de água bruta e suas características de acordo com a NBR 12.2016/1992.

Tabela 3 - Classificação das águas de acordo com o tipo de manancial, os parâmetros característicos e o tratamento mínimo necessário conforme NBR 12.216 de 1992

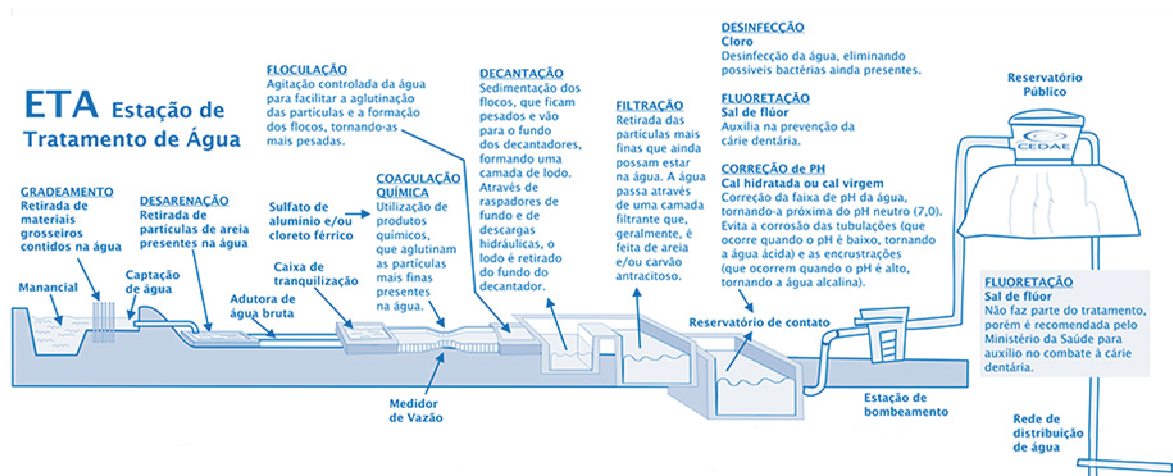
TIPOS	A	B	C	D
Manancial				
Tipo de Água	superficial ou subterrânea	superficial ou subterrânea	superficial	superficial
Tipo de Bacia	sanitariamente protegidas	não protegidas	não protegidas	não protegidas, sujeito a fonte de poluição
Parâmetros				
DBO 5 dias, (mg/l)				
média	até 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 4,0	> 4,0
máxima	1 – 3	3 – 4	4 – 6	> 6
Coliformes (NPM/100 ml)*				
média mensal	50 - 100	100 – 5.000	5.000 – 20.000	> 20.000
máximo	> 100 em menos de 5% de amostras	> 5.000 em menos de 20% das amostras	> 20.000 em menos de 5% das amostras	-
pH	5 - 9	5 – 9	5 – 9	3,8 – 10,3
Cloretos	< 50	50 – 250	250 – 600	> 600
Fluoretos	< 1,5	1,5 – 3,0	> 3,0	-
Tratamento				
Tratamento mínimo necessário	desinfecção e correção de pH	desinfecção e correção de pH e além disso: a) decantação simples b) filtração, precedida ou não de decantação	coagulação, seguida ou não de decantação, filtração, desinfecção e correção de pH	Tratamento mínimo tipo C e tratamento complementar apropriado em cada caso.

* NPM = Número mais provável

Fonte: ABNT, 1992.

Libânio (2010) afirma que a tecnologia de tratamento mais empregada nas cidades brasileiras. O fluxograma da parte líquida de uma ETA convencional de ciclo completo de tratamento compreende das seguintes etapas: i) coagulação; ii) floculação; iii) decantação; iv) filtração; v) desinfecção; e v) correção de pH. Quando necessário se procede com a adição de flúor, recomendado pelo Ministério da Saúde de uma maneira em geral. Porém antes da água bruta ser tratada na ETA muitas vezes há a necessidade de retirada de sólidos grosseiros e material sedimentável, como partículas de areia, que podem prejudicar o processo de tratamento de água, principalmente no bombeamento da água bruta para a ETA. A Figura 4 apresenta o fluxograma da parte líquida de uma ETA desde a captação até a distribuição.

Figura 4 - Fluxograma da parte líquida de uma Estação de Tratamento de Água



Fonte: CEDAE, 2017.

Em seguida serão descritas as etapas envolvidas nos processos de pré-tratamento, tratamento de água de uma ETA convencional e pós-tratamento, segundo Richter (2009) e FUNASA (2015):

Etapas do Pré-Tratamento

Gradeamento e Desarenação

O gradeamento é o processo de retirada de resíduos sólidos grosseiros, presentes na água captada. Após a retirada dos resíduos grosseiros, a água bruta pode apresentar ainda uma grande quantidade de materiais sedimentáveis, que precisam ser retirados do processo. Esses materiais são partículas como areias ou impurezas que possuem peso suficiente para serem depositados ao longo de um canal desarenador. Estes, quando não removidos podem causar abrasão nas tubulações e nos equipamentos.

Etapas do Tratamento de uma ETA de Ciclo Completo

Coagulação

É o processo onde ocorre a desestabilização de suspensão coloidal de partículas sólidas. Essa desestabilização acontece quando é adicionado à água bruta um coagulante, que através de uma reação química, faz com que as partículas tenham mais facilidade para se aglutinar na etapa de floculação. Os coagulantes geralmente utilizados na coagulação são o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, sendo o sulfato de alumínio o mais adotado. Para que ocorra a desestabilização, há a necessidade de uma mistura rápida na unidade. Assim, geralmente o coagulante é adicionado na Calha Parshall ou no vertedor, já que este local provoca uma turbulência alta o que propicia a mistura rápida. Na Figura 5 observa-se o ponto de adição do coagulante na Calha Parshall. Dependendo da operação da ETA ou da qualidade da água bruta, muitas ETAs utilizam outros produtos para auxiliar na aglutinação dos flocos, como polímeros por exemplo.

Figura 5 - Ponto de adição do coagulante na Calha Parshall



Fonte: O autor, 2017.

Floculação

É a etapa onde as partículas desestabilizadas se aglutinam formando flocos maiores e mais pesados que facilmente são sedimentados nos decantadores. Os compostos químicos misturados com a água no processo de coagulação possuem cargas elétricas positivas e atraem as impurezas presentes na água, que possuem carga negativa e formam flocos mais pesados que são separados na etapa seguinte. O gradiente de velocidade no floculador é um parâmetro de extrema importância, pois se deve evitar que os flocos quebrem ao se aglutinarem ou que sedimentem antes do processo de decantação. Portanto, neste ambiente, necessita-se de um gradiente de velocidade inferior àquele demandado na etapa de coagulação. Os floculadores podem ser mecanizados (misturadores lentos) ou hidráulico por chicanas. A Figura 6 apresenta um floculador por chicana.

Figura 6 - Floculador hidráulico por Chicana

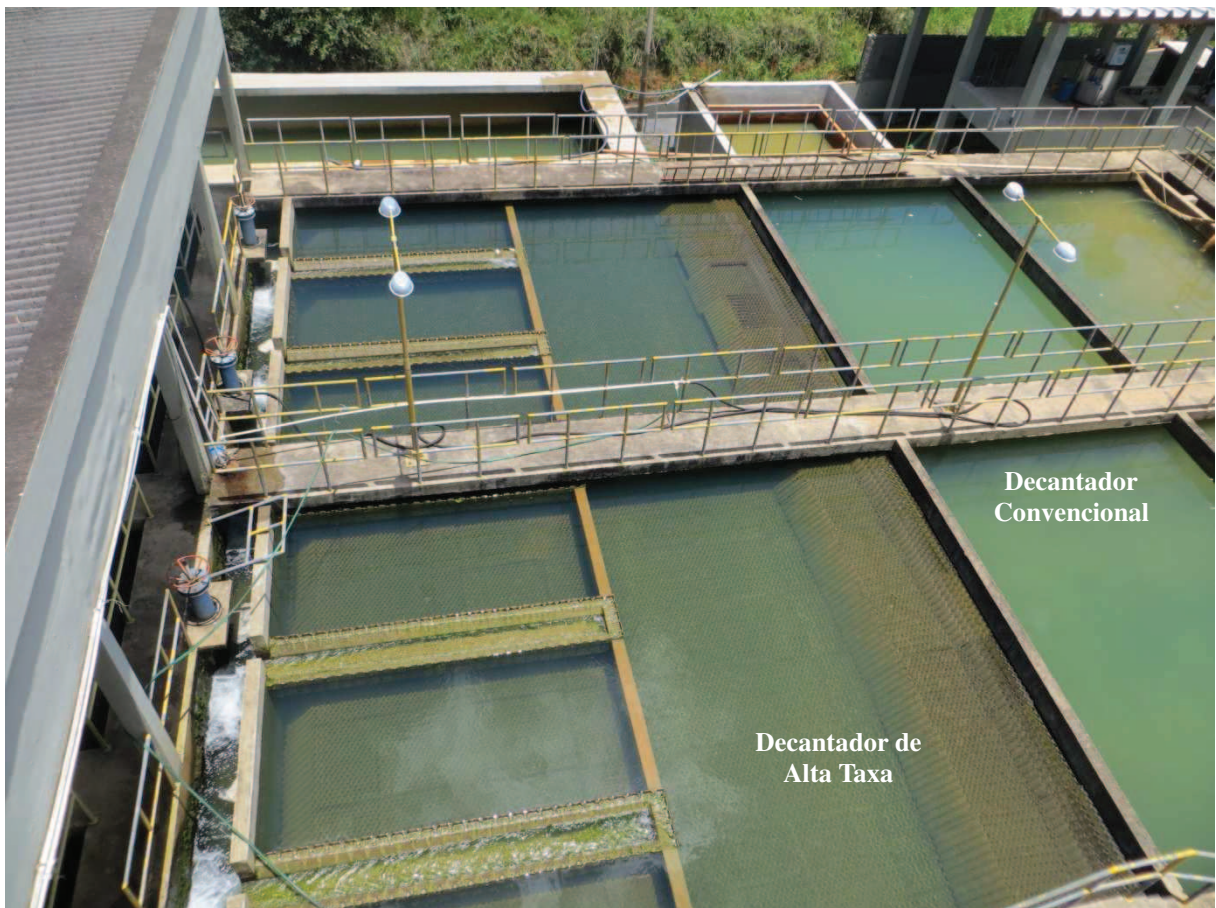


Fonte: O autor, 2017.

Decantação

Nesta etapa os flocos que se aglutinaram no floculador, se sedimentam devido a diminuição do gradiente de velocidade e formam o lodo no fundo do decantador que necessita ser removido periodicamente. A água decantada passa para a etapa de filtração. A sedimentação é um processo físico que separa partículas sólidas em suspensão da água. Esta consiste na utilização das forças gravitacionais para separar as partículas de densidade superior à da água. Os decantadores podem ser convencionais (baixa taxa) ou com escoamento laminar (elementos tubulares ou placas), denominados decantadores de alta taxa. O decantador é um tanque, geralmente, na forma circular ou retangular com o fundo muitas vezes inclinado para facilitar o processo de remoção das partículas sedimentadas. A Figura 7 apresenta exemplo de decantador convencional e decantador de alta taxa.

Figura 7 - Decantador de alta taxa e decantador convencional



Fonte: O autor, 2017.

Filtração

A água, ao passar para etapa seguinte, ainda pode conter sólidos que não se sedimentaram no decantador. Esses sólidos necessitam ser removidos na etapa de filtração. A filtração é um processo físico e em alguns casos, biológico (filtros lentos) para a separação de impurezas em suspensão na água, mediante sua passagem por um meio poroso. Diversos materiais granulares podem ser usados como meio poroso. A areia é a mais comum, seguida do antracito, carvão ativado granular, etc. O tamanho dos grãos e o vazio entre os grãos têm grande influência na remoção da matéria em suspensão pelo filtro e no seu desempenho hidráulico. Periodicamente os filtros necessitam de uma limpeza, conhecida como retrolavagem que aumenta a eficiência de remoção dos sólidos. O resíduo da retrolavagem pode retornar ao processo inicial de tratamento ou ser encaminhado, junto com lodo do decantador, para etapa de desidratação do lodo. A Figura 8 apresenta um filtro de uma ETA convencional.

Figura 8 – Etapa de Filtração



Fonte: O autor, 2017.

Desinfecção

A desinfecção tem por finalidade a inativação de microrganismos patogênicos presentes na água. A desinfecção é necessária porque não é possível assegurar a remoção total dos microrganismos pelos processos físico-químicos usualmente utilizados no tratamento de água. Os mecanismos da desinfecção dependem basicamente da natureza do desinfetante e do tipo de microrganismo que pretende desativar. O desinfetante mais utilizado no Brasil é o cloro por ter uma ação bactericida mais prolongada e assim permanece na água durante o percurso na rede de distribuição. Trata-se neste último caso do Cloro Residual Livre. A Figura 9 apresenta um sistema de desinfecção por tabletes de Hipoclorito de Cálcio.

Figura 9 - Sistema de desinfecção por pastilhas de Hipoclorito de Cálcio



Fonte: O autor, 2017.

Correção de pH

O processo de tratamento geralmente ocorre em meio ácido devido a adição de sulfato de alumínio na coagulação, o que diminui o pH da água em tratamento. Para que se alcance a faixa permitida para fornecimento, algumas vezes é necessário adicionar uma solução alcalinizante para elevar o pH (cal hidratada). O pH admitido para consumo humano, de acordo com a legislação vigente tem que estar na faixa entre de 6,0 e 9,5. Muitas vezes a

correção de pH não é necessária. Isso geralmente ocorre quando o manancial apresenta um pH mais alcalino. O controle do pH da água tratada também é importante para evitar corrosão das tubulações quando pH é ácido ou incrustação nas tubulações quando o pH é alcalino. A cal hidratada pode ser adicionada tanto no início do processo como no final; isso depende da operação da ETA.

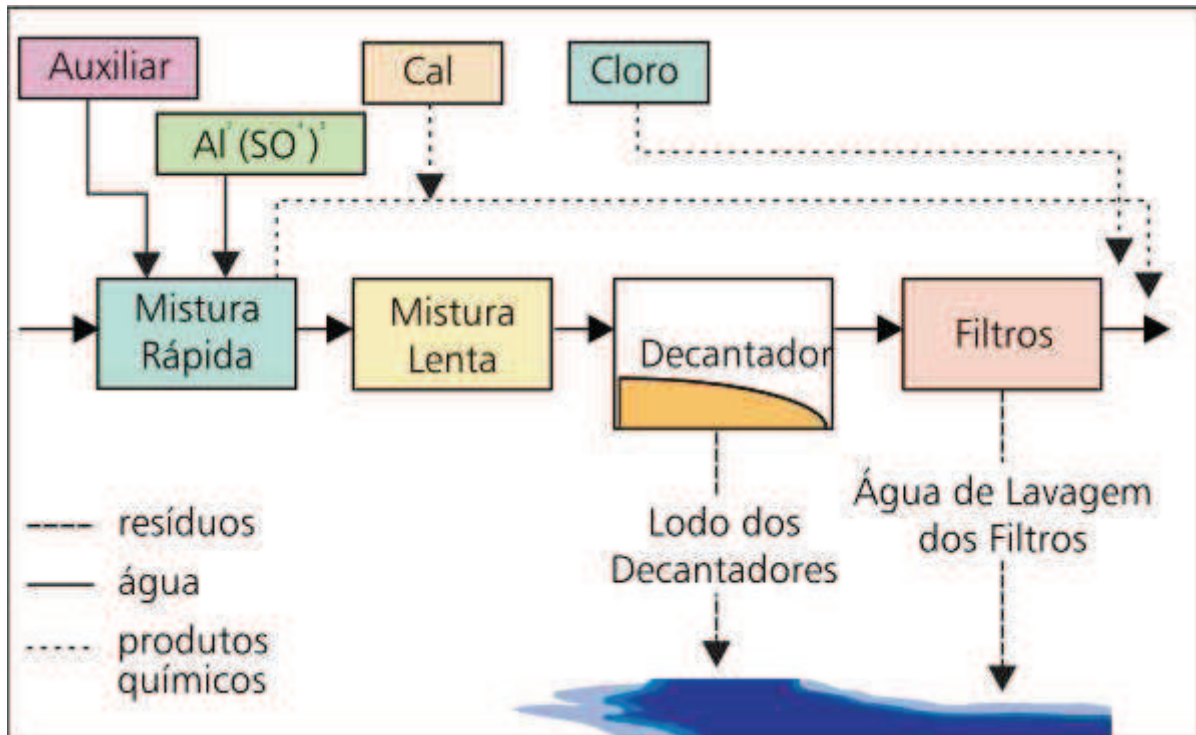
Etapas do Pós-Tratamento

Fluoretação

Em alguns municípios por determinação do Ministério da Saúde, há a necessidade de adição de Flúor na água tratada, para auxiliar na prevenção de cáries em dentição infantil. Nestes casos, adicionam-se sais de flúor após o processo de tratamento.

Como visto, nas etapas de uma ETA convencional, produtos químicos são adicionados na água bruta a fim de realizar o tratamento, porém são gerados resíduos sólidos que devem ser destinados corretamente. O principal resíduo de uma estação de tratamento de água é denominado lodo de ETA. A Figura 10 apresenta o fluxograma com as entradas dos produtos químicos e saída dos resíduos nas etapas de tratamento.

Figura 10 - Fluxograma de entrada dos produtos químicos e saída dos resíduos nas etapas de tratamento



Fonte: Cordeiro, 1999.

Geração de Lodo de ETA

O lodo de ETA é basicamente o produto da coagulação da água bruta, sendo assim, sua característica depende das características do manancial captado acrescido dos produtos químicos utilizados. Sua geração segundo Tartari et al.(2013) depende de vários fatores como: operação da ETA, a periodicidade de limpeza, a dosagem do produto químico que varia em função das características dos mananciais, das variações temporais e do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica. Na época da chuva a turbidez da água do rio é alterada, devido principalmente à erosão do solo que transporta matéria orgânica e inorgânica para dentro deste. A parte mais fina do solo, constituída principalmente de argila e areia fina é levado para ETA, enquanto a parte mais grossa do solo se deposita nos leitos dos rios provocando assoreamento (TEIXEIRA et al. 2006). Assim, o volume de lodo gerado também varia de acordo com o clima da região. Em dias chuvosos a água bruta fica mais turva e é necessária a adição de mais produtos químicos para clarificá-la. Há então uma relação entre a turbidez e a concentração de sólidos em suspensão totais (SST), já que maior turbidez leva à maior sedimentação de sólidos e, portanto, à maior geração de lodo. Porém Katayama et al. (2015) destaca que a relação de SST com a turbidez da água bruta deve ser analisada através de

experimentos e não somente com a utilização de fórmulas disponíveis na literatura. Nascimento et. al (2017) realizaram um estudo comparando o período de chuva em Itabirito/MG com a produção de lodo de uma ETA convencional que utiliza como coagulante o sulfato de alumínio e concluiu que as condições climáticas estão diretamente relacionada com a produção de lodo da ETA. Reali (1999) também indica que a variação sazonal e a turbidez da água bruta estão diretamente relacionadas com a produção de lodo e apresenta na Tabela 4 as relações da produção de lodo com o tipo do manancial e a qualidade da água bruta.

Tabela 4 - Relação da produção de lodo de ETA com o tipo de manancial e a qualidade da água bruta captada

Tipo de Manancial	Faixa de Produção de Resíduos (g de sólidos secos por m³ de água tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12-18
Água de reservatório com média qualidade	18-30
Água de rios com qualidade média	24-36
Água de reservatórios com qualidade ruim	30-12
Águas de rios com qualidade ruim	42-54

Fonte: Reali (1999).

Em uma ETA convencional o lodo basicamente é formado nos decantadores e na água de lavagem dos filtros e sua porcentagem vai depender da sua origem. Para Richter (2001) entre 60 e 95% do lodo gerado em ETA é proveniente dos decantadores. O restante é gerado nos filtros. Já o volume de lodo corresponde a 0,5 a 2% do volume da água tratada. Esta variação vai depender principalmente do tipo de decantador e da periodicidade de limpeza. Os decantadores convencionais possuem uma das taxas mais baixa, cerca de 0,5%, dependendo da frequência das descargas, já os decantadores laminares (alta taxa) possuem entre 0,5 a 2%. Para Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) nas ETAs de ciclo completo o volume médio diário do lodo proveniente dos decantadores é de 0,1 a 3,0% do volume médio diário da água clarificada nesta unidade.

Como visto, um dos principais fatores que influencia na geração de lodo é o tipo de decantador, a forma e o período de limpeza. Decantadores, onde o lodo fica mais tempo armazenado antes da limpeza, tendem a possuir concentrações de sólidos maiores, assim como decantadores que possuem limpeza automática possuem concentrações menores de sólidos. Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) destacam que em decantadores convencionais de

limpeza manual (Figura 11a e 11b) a concentração de SST possui um valor médio de 10g/L ou até menor, dependendo do tamanho da unidade, da quantidade de funcionários empregados na limpeza, da qualidade da água floculada no início da unidade, do uso de mangueira auxiliar e do tempo de limpeza. Decantadores convencionais ou de alta taxa (laminares) com remoção de lodo (Figura 11c e 11d) a concentração do SST é na ordem de 8 a 12 g/L e os decantadores de alta taxa com descarga hidráulica (11e e 11f) é entre 3 e 10 g/L. Vale ressaltar que a frequência de limpeza dos decantadores depende da água bruta, do tipo de dosagem de produtos químicos e da eficiência de remoção dos flocos.

Figura 11 - Tipos de decantadores e forma de remoção do lodo



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

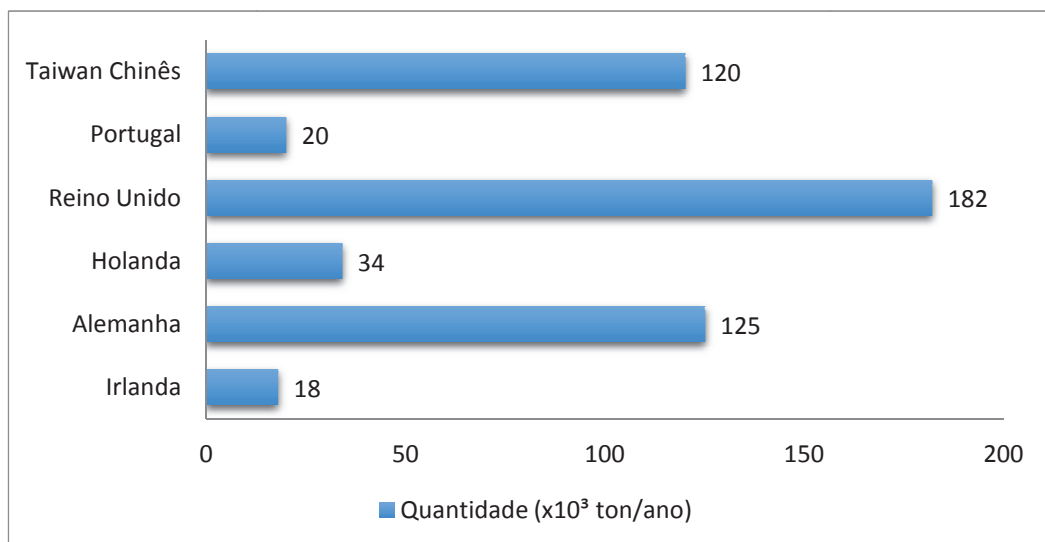
Legenda: (a) e (b) decantador convencional com limpeza manual; (c) e (d) decantador convencional com limpeza mecanizada, (e) e (f) decantador de alta taxa com descarga hidráulica.

FONTE: Bernardo, Dantas e Voltan, 2012.

Souza, Barroso e Cordeiro (2004) realizaram um estudo comparativo da geração de sólidos de duas ETAs convencionais, uma com decantador convencional e outra com decantador de alta taxa e verificou que o decantador de alta taxa produz um lodo com maior concentração de sólidos em relação ao decantador convencional, porém consome grande volume de água devido ao descarte diário. Richter (2001) destaca que a concentração de sólidos na água de lavagem não depende da quantidade de flocos carregada para o filtro, mas da capacidade de acumulação do meio filtrante.

Na Europa, milhões de toneladas de lodo de ETA são produzidos todo ano, e este número vem crescendo durante as décadas (BASIBUYUK, KALAT, 2004). De acordo com Babatunde e Zhao (2007), *apud* Darmappa et al, (1997) destacam que numa escala global estima-se que cerca de 10.000 toneladas de lodo de ETA são produzidas diariamente. A Figura 12 apresenta o diagrama compilado por Babatunde e Zhao (2007) da produção de lodo de ETA em alguns países no ano 2000. Cosin et al (2004) estima que só no Estado de São Paulo são produzidas 30.000 toneladas/ano.

Figura 12 - Diagrama da produção de lodo de ETA em alguns países no ano 2000



Fonte: Babatunde e Zhao, 2007.

Características do Lodo de ETA

O lodo é um líquido não-newtoniano, volumoso e se apresenta em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado. Silva Junior e Issac, (2002) verificaram que o lodo da ETA tem baixa concentração de matéria orgânica (MO), cerca de 5% a 25% dependendo da concentração na água bruta e constataram a baixa degradabilidade e a

estabilidade da MO devido a alta relação ente DQO e DBO. Dermattos et. al (2001) analisaram as ETAs da Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG e verificaram que 92% do volume de lodo das ETAs é proveniente do coagulante e apenas 8% são impurezas da água bruta. Tavares e Kato (2003) também analisaram as ETAs da região metropolitana de Recife e constataram o caráter inorgânico do lodo. Ahmad, Ahamad e Alam (2016) também chegaram a essa conclusão quando analisaram o lodo de uma ETA localizada em Ghaziabad na Índia. O lodo resultante de uma água bruta com alta turbidez apresenta maior facilidade de adensamento do que o lodo resultante de uma água com baixa turbidez. Essa relação entre sólidos suspensos totais e a turbidez pode variar entre 0,5 e 2,0 (Richter, 2001). Os valores mais baixos correspondem a águas de baixa turbidez e/ou de elevado teor de matéria orgânica. Já os valores mais altos, correspondem a águas com turbidez elevada e muito mineralizadas.

Na coagulação, geralmente são utilizados como coagulantes, hidróxidos de alumínio (sulfato de alumínio) ou de ferro (sulfato férrico ou cloreto férrico), sendo o sulfato de alumínio o mais utilizado. No presente trabalho serão apenas abordadas as características do lodo de sulfato de alumínio, visto que a ETA do estudo utiliza este coagulante. Para Reali (1999) o lodo de sulfato de alumínio apresenta coloração marrom com viscosidade e consistência que lembra o chocolate líquido. A fração de sólidos do lodo de sulfato de alumínio é constituída de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, coloides, outros resíduos orgânicos, inclusive bactérias e outros organismos (Richter, 2001). O lodo de sulfato de alumínio sedimenta com relativa facilidade, porém é pouco compacto (difícil adensamento), o que resulta em um volume elevado e baixo teor de sólidos. A Tabela 5 apresenta as características típicas do lodo de sulfato de alumínio.

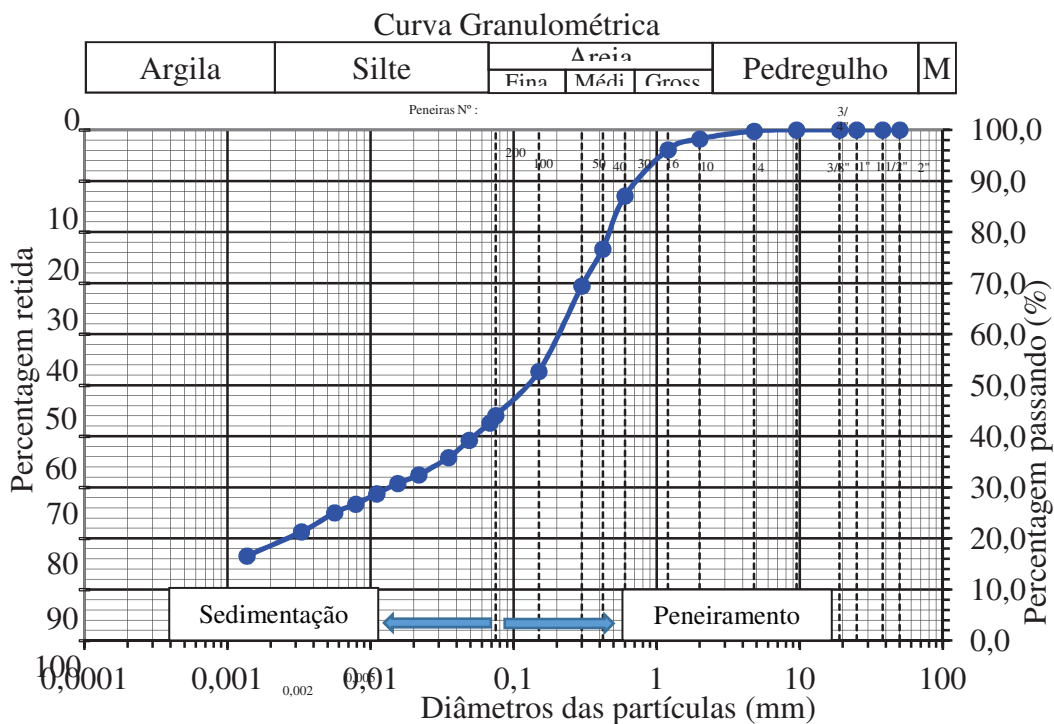
Tabela 5 - Características típicas do lodo de sulfato de alumínio

Parâmetros	Quantidade
Sólidos Totais (%)	0,1-4
Al ₂ O ₃ .5,5H ₂ O (%)	15-40
Inorgânicos (%)	35-70
Matéria Orgânica (%)	15-25
pH	6-8
DBO (mg/l)	30-300
DQO (mg/l)	30-5.000

Fonte: Richter, 2001.

Conhecer a granulometria do lodo de ETA é importante para algumas aplicações, como por exemplo, a sua utilização na construção civil ou em outros usos que necessitem conhecer o tamanho dos sólidos (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012). A análise granulométrica quantifica a distribuição dos sólidos presentes no lodo e consiste, em geral, de duas fases: peneiramento e sedimentação (PINTO, 2006). O peso do material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra, é considerado como “porcentagem que passa” e representado graficamente em função da abertura da peneira. Esta, em escala logarítmica, como demonstra o exemplo da Figura 13. A abertura da peneira é considerada como “diâmetro” das partículas.

Figura 13 - Exemplo de curva granulométrica



Fonte: O autor, 2017.

Os sólidos são denominados de acordo com limites estabelecidos na NBR 6502 de 30 de outubro de 1995 que define as terminologias de rochas e solos (ABNT, 1995). Essa classificação está descrita na Tabela 6. Pinto (2006) destaca que a separação de siltes e areia é frequentemente tomada como 0,075 mm, ou seja, correspondente a peneira nº 200. Essa é a peneira mais fina utilizada no ensaio de granulometria. O que passa da peneira de nº 200,

siltes e argilas, é considerado fração fina do solo e o que fica retido, areia e pedregulho, é considerado fração grossa do solo.

Tabela 6 - Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos

Fração	Limites estabelecidos pela NBR 6502/95
Pedregulho	Superior a 2,0 mm
Areia Grossa	0,75 mm – 2,0 mm
Areia Média	0,20 mm – 0,65 mm
Areia Fina	0,075 mm – 0,20 mm
Silte	0,002 mm – 0,075 mm
Argila	Inferior a 0,002mm

Fonte: Adaptado Pinto, 2006.

Basicamente o lodo de ETA possui sólidos finos, como siltes e argilas. A Tabela 7 apresenta o resumo de alguns autores em relação a composição granulométrica das ETAs.

Outro parâmetro físico do lodo da ETA importante é o teor de umidade que é a relação entre o peso da água e o peso do sólido. O teor de umidade vai depender do tipo de solo, podendo ocorrer valores muito baixos (solos secos), ou muito altos (mais de 150%) como é o caso de argilas mais finas (Pinto, 2006). O teor de umidade é muito importante na etapa de tratamento, principalmente no transporte e disposição final deste resíduo.

Tabela 7 - Composição granulométrica do lodo de ETAs estudadas por alguns autores

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)
Scalize ⁽¹⁾ (1997)	89	11	0
Cornwell et. al ⁽²⁾ (1992)	77	13	10
Cornwell et. al ⁽³⁾ (1992)	20	46	34
Cornwell et. al ⁽⁴⁾ (1992)	55	37	8
Rodrigues e Holanda ⁽⁵⁾ (2013)	35	62	3
Araujo et. al ⁽⁶⁾ (2015)	24	41	32
Teixeira et. al ⁽⁷⁾ (2006)	43	0,6	56,4
Teixeira et. al ⁽⁸⁾ (2006)	30	58,6	11,4
Ahamad, Ahamad e Alam ⁽⁹⁾ (2016)	16	24	60

Nota: (1)ETA de ciclo completo utilizando sulfato de alumínio; (2) ETA com sulfato de alumínio desaguado em leito de secagem; (3) ETA com sulfato de alumínio desaguado por centrífuga, (4) ETA com sal de ferro desaguado em lagoa, (5) ETA no ERJ, (6) ETA de Goiás com sulfato de alumínio desaguado em lagoa de secagem, (7) ETA de São Paulo com sulfato de alumínio, (8) ETA de São Paulo com cloreto férrico (7) ETA em Gaziabad na Índia usando polímero

Fonte: O autor, 2018.

Os componentes que mais se apresentam no lodo de ETA são os óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas, contaminantes e matéria orgânica. A grande maioria destes componentes é encontrada no solo. Os elementos mais abundantes na crosta terrestre são o oxigênio (O), Silício (Si), Alumínio (Al) e Ferro (Fe). Andreolli et. al (2006) destaca que assim como solo, o lodo de ETA tem esses componentes como os principais. Barroso e Cordeiro (2001) destaca que alguns metais como o cobre (Cu), Zinco (Zn), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Cádmio (Ca), Cromo (Cr), Manganês (Mn) e em especial o alumínio, presentes no lodo de ETA, possuem ações que podem possuir efeitos positivos ou negativos na disposição ou aproveitamento deste resíduo. A Tabela 8 apresenta a composição química de lodos de ETAs estudados por alguns autores.

Tabela 8 - Composição química de lodos de ETAs estudados por alguns autores

Parâmetro	Araújo et. al (2015) [mg/kg]	Carneiro et. al ⁽¹⁾ (2013) [mg/kg]	Carneiro et. al ⁽²⁾ (2013) [mg/kg]	Babatunde e Zhao (2007) [mg/kg]
Alumínio	386,39	89.700	29.400	
Boro	0,497			
Cádmio	< 0,001	10	ND ⁽³⁾	0,5
Cálcio	14,93	6.139	787	
Chumbo	< 0,005			44,1
Cobalto	<0,003			1,06
Cobre	0,465	217	15	33,72
Cromo	< 0,003	77	ND ⁽³⁾	25,0
Ferro	212,47	15.300	6.550	
Magnésio	12,85	6.042	456	
Manganês	9,132	19.580	468	
Níquel	0,273	55	ND ⁽³⁾	44,3
Potássio	11,449	4,7	0,44	
Sódio	4,19	843	79	
Zinco	0,18	114	29	33,9

Nota: (1) maiores valores entre as ETAs estudadas por Carneiro et. al (2013); (2) menores valores entre as ETAs estudadas por Carneiro et. al (2013). (3) ND = abaixo do limite de detecção do método

Fonte: O autor, 2018.

Tratamento do Lodo de ETA

O lodo retirado dos decantadores possui um teor de umidade muito elevado. Dessa forma, para facilitar o transporte e a destinação final, é necessário reduzir a quantidade de água presente. Para isso, podem ser adotadas diferentes tecnologias em processos de adensamento e desaguamento ou desidratação.

Richter (2001) afirma que a relação da quantidade de coagulante aplicada e a concentração de sólidos totais presentes no lodo determinam a eficiência do processo de tratamento e que diversas tecnologias vêm sendo empregadas, desde processos manuais como leito de secagem a processos mecanizados como os filtros prensa e centrífugas. A Tabela 9

resume os resultados esperados das concentrações de sólidos, nos lodos provenientes de coagulação de águas com baixa turbidez, na entrada e saída de cada tecnologia de tratamento.

Tabela 9 - Concentração dos sólidos em lodos de águas com baixa turbidez

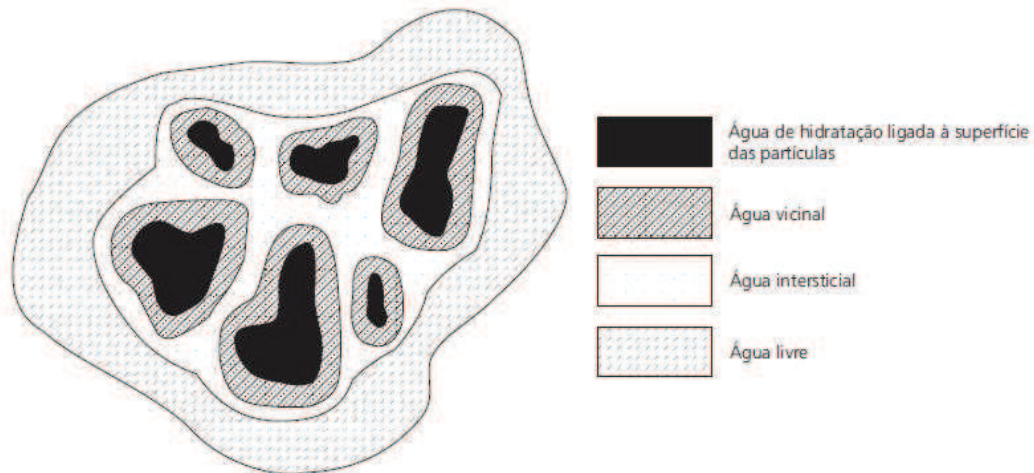
Processos de Tratamento de lodo	Concentração (%)	
	Na entrada	Na saída
Adensamento		
Decantação estática	0,03 – 0,2	1-3
Adensador contínuo		
sem polieletrólito	0,03 – 0,2	2 - 3
com polieletrólito	0,03 – 0,2	2 - 5
Flotação	0,03 – 0,2	3 - 6
Desidratação		
Centrifugação	1 – 5	15 - 20
Prensas desaguadoras	1 - 5	15 - 25
Filtro a vácuo	2 – 6	15 - 17
Filtro Prensa	2 – 6	20 - 25

Fonte: Adaptado de Richter, 2001.

A água pode estar presente no lodo de diferentes formas físicas. Reali (1999) destaca que essas formas podem gerar dificuldades na desidratação do lodo. De acordo com a Figura 14 a água pode estar distribuída no lodo da seguinte forma:

- Água livre – água não associada à partícula sólida do lodo;
- Água intersticial ou capilar – água ligada mecanicamente, a qual se encontra presa aos interstícios dos flocos;
- Água vicinal – constituída por múltiplas camadas de moléculas de água fisicamente ligadas, as quais se encontram firmemente presas à superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio;
- Água de hidratação – água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas.

Figura 14 - Distribuição da água no lodo de ETA



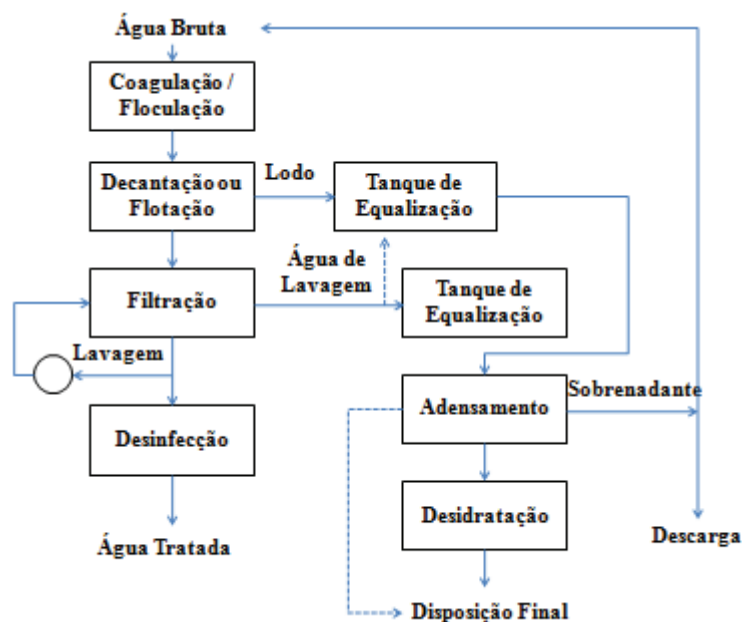
Fonte: Realli, 2009.

A definição de água vicinal e água de hidratação dada por Realli (1999) corresponde ao conceito de água adsorvida e água de constituição da Mecânica dos Solos clássica.

Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) destacam que a água livre é a mais fácil de ser retirada do lodo, porém as demais necessitam de uso de polímeros para auxiliar o adensamento e a desidratação. Segundo Richter (2001) a água livre pode ser separada dos sólidos pela filtração ou por gravidade. Podem-se citar como exemplo os adensadores por gravidade ou por flotação e os decantadores centrífugos. Os leitos de secagem utilizam um meio poroso para o escoamento da água livre e a evaporação complementa essa ação, obtendo um sólido na concentração entre 15 a 25% comparados com os resultados dos dispositivos mecânicos. A água capilar e a água da camada aderida à superfície só podem ser removidas na filtração pela ação de gradientes de pressão e resistências para sua separação. Entre os equipamentos utilizados, podem-se citar o filtro a vácuo, o filtro prensa e a prensa desaguadora.

O tratamento do lodo de ETA, também chamado de fluxograma da fase sólida de uma ETA, compreende a etapa de adensamento e desidratação, conforme já mencionado. As águas captadas desses processos retornam ao início do tratamento. Como já comentado anteriormente o lodo proveniente da lavagem dos filtros pode retornar ao início do processo de tratamento ou ser encaminhada ao tratamento de lodo. A Figura 15 apresenta um fluxograma da fase líquida e da fase sólida de uma ETA convencional.

Figura 15 - Fluxograma de parte líquida e da parte sólida de uma ETA convencional



Fonte: Richter, 2001.

Apesar da apresentação do fluxograma convencional para o tratamento da fase sólida da ETA, o lodo simplesmente adensado pode ser diretamente encaminhado para uso em solo, sem a necessidade de passagem pela etapa de desidratação. Porém, este apresentará um teor de umidade ainda elevado.

Destinação do Lodo de ETA

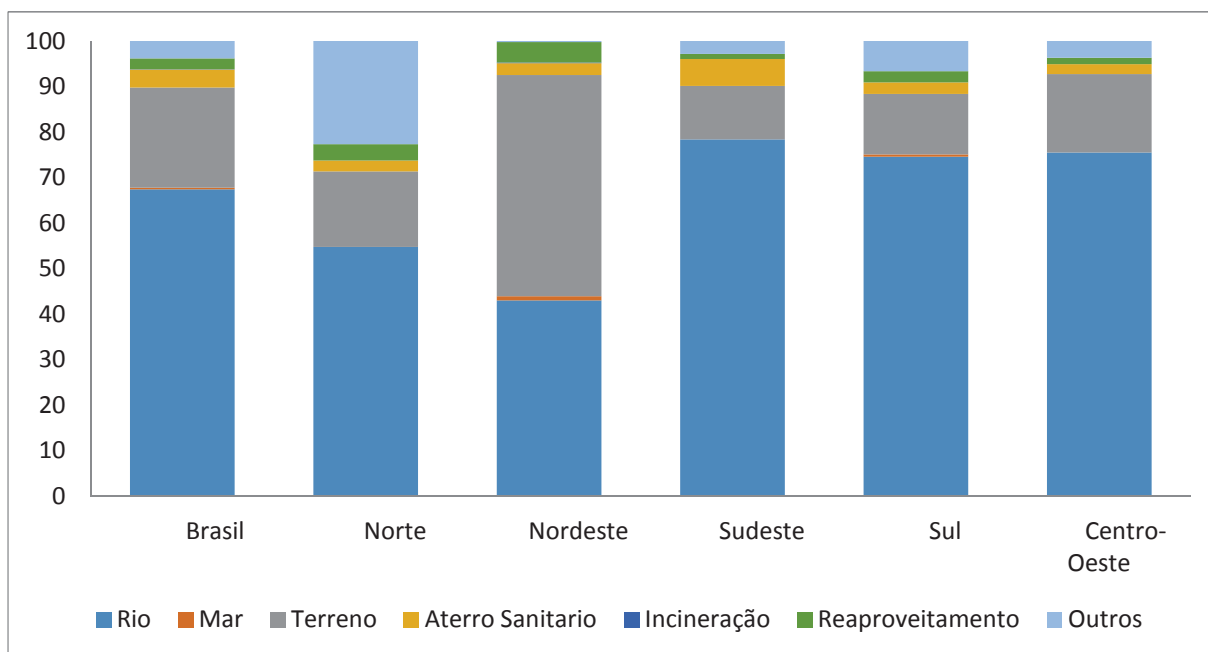
Nos EUA, desde 1972, com a aprovação das emendas ao “National Pollutant Discharge Act”, considera-se o lodo como resíduo industrial e assim, sujeito a restrições legais (Richter, 2001). No Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), na sua classificação em relação a origem, considera o lodo de ETA como resíduo sólido do serviço de saneamento. A NBR 10.004 de 2004 também destaca esse fator na sua definição de resíduos sólidos.

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou

exijam para isso soluções técnica e economicamente inviável em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2004).

A destinação final do lodo em ETA é uma das tarefas mais difícil e mais dispendiosa para as concessionárias de tratamento de água, tanto no que se refere aos custos de disposição como as dificuldades e custos de transporte do resíduo. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2008 o Brasil possuía 2.098 municípios gerando lodo de ETA, este número equivale a cerca de 40% do total de municípios do Brasil que era de 5.564. Destes municípios, a sua maioria, cerca de 68%, dispôs o lodo no corpo d’água, e menos de 3% realizou algum tipo de reaproveitamento do lodo. A Figura 16 representa a porcentagem de lodo gerado nas ETAs, conforme a sua disposição final, segundo dados da pesquisa do IBGE (2008).

Figura 16 - Destinação final dos lodos de ETAs. no Brasil



Fonte: Adaptado de IBGE, 2008.

Andreoli et al (2013) destaca que o lançamento inadequado do lodo de ETA nos corpos d’água pode aumentar a quantidade de sólidos e a concentração de material tóxico no sedimento, o que pode provocar dano a biota local ou até mesmo inviabilizar o abastecimento de comunidade a jusante do lançamento. Vale ressaltar que o lodo também possui microrganismos que podem provocar danos a saúde humana e ao meio ambiente.

Araújo (2015) destaca que de acordo com a PNRS, é de responsabilidade da fonte geradora adotar destinação final sustentável aos resíduos sólidos e lançar o lodo no rio causa poluição e caracteriza crime ambiental, conforme Art. 54 da Lei 9.603/1988

“[...]Art. 54. - Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

[...]V - ocorrer por lançamento de resíduos sólidos líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos:

Pena - reclusão, de um a cinco anos” (BRASIL, 1998) .

Em geral, resultados de análises definidas pela NBR 10.004/2004 levam à classificação do lodo de ETA como resíduo sólido não perigoso e não inerte - classe IIA e por isso sua disposição final pode ser o aterro sanitário. Porém existem outras formas de destinação deste resíduo, como o lançamento em rede de esgoto, lançamento em solo e até mesmo no aproveitamento como matéria prima para a composição de algum material. O aproveitamento do lodo como matéria prima é uma alternativa viável que vem sendo adotada pelas companhias de saneamento, porque assim, reduz os custos de destinação destes resíduos. Além do mais, as companhias estão se adequando as legislações vigentes. O Brasil, não possui uma legislação específica para o aproveitamento do lodo, porém apresenta a PNRS que prioriza a reutilização e a reciclagem dos resíduos e a redução do volume enviado para o aterro sanitário (Brasil, 2010) A Figura 17 apresenta a ordem de prioridade do gerenciamento dos resíduos sólidos segundo a PNRS. Em outros países já existem legislações sobre o assunto, como no estado do Colorado (EUA), onde o departamento de saúde pública e meio ambiente possui uma legislação que regulamenta esta prática (COLORADO, 2004).

Figura 17 - Ordem de prioridade do gerenciamento dos resíduos sólidos segundo a PNRS.



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2010

O lodo de ETA pode ser aproveitado para diversas finalidades, como: utilização na construção civil para fabricação de cerâmica vermelha ou na incorporação de solo cimento (POZZOBON, LUCAS, MORA, 2013, RODRIGUES, PUGET, OLIVEIRA, 2009, ANDRADE et al, 2016), aplicação em solo para recomposição de área degradada (MOTTA et al, 2013, BITTENCOUT et al, 2012) e a utilização de lodo de ETA para produção de mudas (FIGUEIREDO NETO, 2011, ROCHA et al, 2014, AUGUSTO, 2016).

A aplicação do lodo em solo é uma alternativa que vem sendo utilizada, já que a aplicação do lodo com sulfato de alumínio torna o solo mais poroso e assim retém a umidade. Porém para o plantio de muda deve-se verificar a quantidade de lodo empregada já que o alumínio, presente no lodo de ETA, tende a fixar o fósforo e dificulta a absorção deste nutriente pelas plantas. Uma alternativa para minimizar esse dano é utilizar junto com o lodo de ETA, lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Diversos autores, entre eles, Abreu et al (2017), Bittencourt et al (2009) já comprovaram a eficiência da incorporação do lodo de ETE no solo para agricultura.

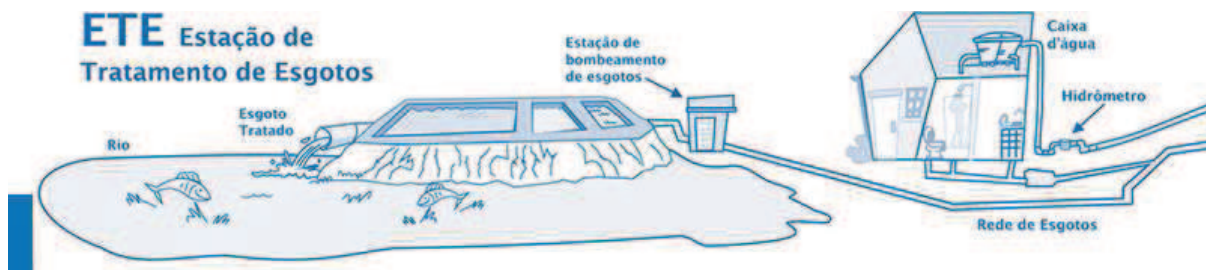
2.2 Lodo do Tratamento de Esgoto

O lodo do tratamento de esgoto não é foco do presente trabalho e, portanto, não será aprofundando neste item. Entretanto, será citado de maneira geral, já que é adotado na incorporação ao substrato com o lodo de ETA e solo comercial para produção de mudas. Novamente ressalta-se que o foco do trabalho é o aproveitamento do lodo de ETA.

O esgoto é basicamente composto de 99,9% de água e 0,1% de sólidos, sendo que, do total de sólidos, 70% são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras, etc.) e 30% são

inorgânicos (areia, sais, metais, etc.) (Andreoli, 1999). Dessa forma, o esgoto precisa ser tratado antes de ser lançado no meio ambiente. O sistema de esgotamento sanitário (SES) tem por objetivo coletar a água residuária nas indústrias e domicílios, tratá-la a fim de tornar possível seu descarte no meio ambiente. A Figura 18 apresenta o fluxograma de um SES.

Figura 18 - Fluxograma de um sistema de esgotamento sanitário



Fonte: CEDAE, 2017.

Segundo Bettioli e Camargo (2006), a disposição final do lodo de esgoto é uma etapa problemática no processo operacional de uma Estação de Tratamento de Esgoto, podendo apresentar um custo que pode alcançar até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento. Pode-se considerar que no Brasil, a principal destinação desse resíduo é o aterro sanitário, apesar de outros destinos como reuso industrial, incineração, construção civil e etc., serem possíveis. Há que se ressaltar que na maioria das vezes não há preocupação com o aproveitamento de nutrientes contidos neste material. Isso se dá em função do risco de contaminação associado ao uso desse lodo em áreas agricultáveis. Sendo assim a aplicação agrícola apresenta uma alternativa que traz vantagens em relação a outras destinações, em função da possibilidade de aproveitamento do potencial nutricional do lodo. Entretanto há preocupação com a contaminação. O lodo de ETE devidamente tratado e estabilizado, quando reusado é denominado como biossólido (JORDÃO e PESSÔA, 2017). Quintana, Carmo e Melo (2009) apontam que pelo lodo de ETE poder ter uma composição rica em matéria orgânica, ele pode ser aproveitado para o crescimento de plantas.

O biossólido vem sendo estudado mundialmente há alguns anos e no Brasil há estudos focando principalmente na sua destinação agrícola como condicionador do solo (RICCI, PADOVANI e PAULA JÚNIOR, 2010) e/ou como fertilizante na recuperação de áreas degradadas (MODESTO et al., 2009) e em plantações agrícolas e florestais (BETTIOLI e CAMARGO, 2006). Outras alternativas em potencial para a utilização desse resíduo pode ser

o uso como componente de substratos destinados à produção de mudas florestais (PAIVA et al., 2009; DUARTE et al., 2011; SCHEER et al., 2012).

O bio sólido possui na sua composição matéria orgânica, que é fonte de nutrientes, e elementos benéficos necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Estes são liberados gradativamente ao solo, aumentando a absorção pelas plantas e diminuindo os riscos de perdas por lixiviação (MELO; MARQUES, 2000). Para Santos, 2009, do ponto de vista químico, o produto final do tratamento do esgoto é rico em matéria orgânica e pode fornecer nitrogênio às plantas em quantidades satisfatórias, além de outros elementos como fósforo, enxofre, cálcio e micronutrientes.

Se por um lado o uso agrícola do lodo de ETE apresenta grandes vantagens devido a quantidade de nutrientes presentes, por outro a presença de microrganismos patogênicos pode prejudicar sua utilização para esta finalidade (MAGALHÃES, 2012) Grande parte dos microrganismos presentes no esgoto sedimenta junto ao material particulado e se concentra no lodo (USEPA, 2003). A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução CONAMA nº 375 de 2006 define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos gerados em Estações de Tratamento de Esgotos (BRASIL, 2006). A Tabela 10 indica a classificação do lodo de ETE proposto pela Resolução CONAMA 357/2006 e relaciona a concentração de alguns agentes patogênicos com a restrição para utilização do lodo na agricultura. Vale ressaltar que esta legislação encontra-se em fase de revisão.

Tabela 10 - Classe do lodo com relação à concentração de agentes patogênicos e a restrição para utilização na agricultura

Tipo de lodo de esgoto	Concentração de Patógenos	Restrição na Utilização
A	Coliformes Termotolerantes < 10 ³ NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/ g ST <i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFT ou UFF / g de ST	Qualquer cultura exceto aquelas em que a parte comestível entra em contato com o solo
B	Coliformes Termotolerantes < 10 ⁶ NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovo/ g ST	Restrito para café, silviculturas e cultivo de fibras e óleos segundo forma e aplicação

ST: Sólidos Totais; NMP: Número mais provável, UFF: Unidade Formadora de Foco, UFP: Unidade Formadora de Placa

FONTE: BRASIL, 2006.

Normalmente, as aplicações em solos, de lodos que estejam em conformidade com os parâmetros exigidos por esta legislação, promovem melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Embora a utilização agrícola do lodo de esgoto seja uma das alternativas mais promissoras para a disposição deste resíduo, retornando ao campo os nutrientes exportados para os grandes centros urbanos, a presença de metais pesados, organismos patogênicos ou alguns contaminantes orgânicos, pode limitar a aplicação, principalmente em virtude do risco de contaminação dos solos e transferência ao homem pela adsorção e translocação desses elementos nas plantas (BERTON e NOGUEIRA, 2010). Deste modo, a reciclagem do lodo de esgoto na área florestal pode ser uma alternativa de aproveitamento do lodo que não atende parcialmente os padrões de qualidade para uso na agricultura, pois reduz os riscos de contaminação, por não ser uma atividade que envolve produtos para o consumo direto do homem (GARCIA et al., 2010). Atenção deve ser dada aos funcionários relacionados à operação de aplicação do lodo no solo. Abreu (2014) em seu estudo comprovou a eficácia da utilização do lodo de esgoto no plantio de mudas florestais de espécies Nativas da Mata Atlântica, concluindo que o lodo pode substituir 100% o uso de fertilizantes comerciais.

2.3 Espécies da Mata Atlântica

A Mata Atlântica é um bioma composto por um conjunto de florestas e ecossistemas que inicialmente cobria aproximadamente 15% do território brasileiro, área equivalente a 1.296.446 km². Sua área abrange a costa leste, sudeste e sul do Brasil e, além disso, uma parte do Paraguai e da Argentina. Sua região de ocorrência original abrange integralmente ou parcialmente atuais 17 estados brasileiros incluindo o estado do Rio de Janeiro. Porém durante os anos a Mata Atlântica vem sendo devastada, possuindo atualmente 27% da área original, porém deste restante apenas 7% pode-se considerar bem conservado (BRASÍLIA, 2010).

Mesmo reduzida e muito fragmentada, estima-se que a Mata Atlântica possua cerca de 20.000 espécies vegetais (algo entre 33% e 36% das espécies existentes no Brasil). Considerado um dos mais ricos biomas do planeta, ou seja, com maior biodiversidade, a Mata Atlântica é a segunda maior floresta em extensão do Brasil, constituída de planaltos e serras. Sendo assim preservar esse bioma é primordial para o meio ambiente e principalmente para a qualidade das águas dos mananciais localizados nesta área.

Uma das espécies encontrada na Mata Atlântica é a *Schinus terebinthifolius*, comumente conhecida como Aroeira Pimenteira. A aroeira pimenteira é uma espécie pertencente à família Anacardiaceae, segundo Lorenzi (1988), é considerada planta de pequeno a médio porte, com crescimento rápido e ciclo relativamente curto, heliófila (necessitam de sol para se desenvolver) e pioneira (são as primeiras a se desenvolverem na natureza). Eventualmente, pode ser encontrada em clareiras e bordas de matas, mas geralmente colonizam áreas abertas, especialmente margens de rios e terrenos aluviais, suportando inundações e encharcamento do solo. Outra espécie é a *Pterocarpus violaceus*, conhecida como Aldrago. O Aldrago é uma espécie pertencente à família Fabaceae-Faboideae (Leguminisae). Segundo Lorenzi (1988), é considerada uma planta de médio porte, entre 8 a 14 m de altura, com tronco de 30 a 50 cm de diâmetro, com crescimento moderado, perenifólia (que tem folha o ano inteiro), heliófila e é encontrada tanto na floresta primária densa, como nas formações secundárias. Aparentemente a espécie cresce independentemente das condições físicas do solo, característica da floresta pluvial da encosta atlântica. Essas duas espécies foram utilizadas no presente trabalho.

As plantas buscam no solo, macro e micronutrientes essenciais para seu crescimento e seu desenvolvimento. A distinção entre macro e micronutrientes é a concentração exigida pelas plantas. Os macro nutrientes ocorrem em concentrações de 10 a 5.000 vezes superior à dos micronutrientes (EPSTEIN, 1975). Os macro nutrientes importantes para as plantas são: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca). Magnésio (Mg) e enxofre (S). Os micronutrientes são: Boro (B), Carbono (C), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo) e Zinco (Zn). A concentração de macro e micro nutrientes necessário para a planta desenvolver vai depender da espécie da muda. Faquin (2005) ressalta que as plantas absorvem do solo, sem muita discriminação, os elementos essenciais, os benéficos e os tóxicos, podendo estes últimos, inclusive, levá-las à morte.

Alguns parâmetros são importantes para a verificação do crescimento e desenvolvimentos da mudas em um viveiro florestal. Entre eles pode-se citar: a taxa de sobrevivência, a taxa de crescimento e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD). A taxa de sobrevivência informa a quantidade de mudas sobreviventes de uma espécie, e pode estar relacionada com a falta de nutrientes, elementos tóxicos no solo, exposição à luz solar, etc. A taxa de crescimento está relacionada com a altura da muda e com o diâmetro do coleto (caule). Carneiro (1995) destaca a importância da altura e do diâmetro do coleto na sobrevivência e desenvolvimento das plantas após o plantio em campo. Ressalta-se que há limites no crescimento em altura das mudas no viveiro, acima e abaixo dos quais o

desempenho a campo não é satisfatório, isso é claro dependerá das características das espécies a serem cultivadas. Já o IQD foi desenvolvido por Dickson, Hosner, Leaf (1960) pesquisando o comportamento de duas espécies de mudas. Das fórmulas testadas por eles, essa foi considerada a mais adequada para avaliar a qualidade das mudas das duas espécies. O IQD é uma fórmula balanceada dos diversos parâmetros morfológicos das mudas considerados importantes, como: peso da matéria seca total; altura; diâmetro do coleto, peso da matéria seca da parte aérea e peso da matéria seca da raiz. De acordo com Gomes et al (2002), quanto maior o valor obtido por IQD, melhor será o padrão de qualidade das mudas.

2.4 Programa Replantando Vida

O programa Replantando Vida é um programa sócio ambiental da CEDAE que tem como objetivo auxiliar na minimização da degradação ambiental sofrida pelos corpos-hídricos na qual os mananciais de captação da companhia estão inseridos. Além do viés ambiental o programa tem o viés social, pois utiliza mão de obra de reclusos do sistema penitenciário do Rio de Janeiro. O programa foi criado em 2007 e já utilizou mais de 2.700 reclusos no trabalho de restauração florestal (CECCON e PÉREZ, 2016).

Atualmente a CEDAE possui seis viveiros florestais situados na região metropolitana do ERJ e mais um está em fase de construção. Para Oliveira et al (2016), viveiro é o ambiente onde germinam e se desenvolvem todo tipo de planta. São nos viveiros que as mudas serão cuidadas até adquirir idade e tamanho suficientes para serem levadas ao local definitivo, onde serão plantadas. Os viveiros da CEDAE têm como principal objetivo produzir mudas da Mata Atlântica. Uma das atividades dos viveiros é a coleta de mudas das espécies do bioma citado, inclusive mudas frutíferas. De acordo com o relatório de sustentabilidade da CEDAE do ano de 2017, publicado em maio de 2018, foram coletadas 71 espécies florestais, o que auxiliou a elevar de 201 a 217 a diversidade de espécies nos viveiros (CEDAE, 2018).

O maior viveiro da CEDAE está localizado nas dependências da Colônia Apenal Agrícola de Magé e é reconhecido como símbolo da ressocialização, sendo o primeiro a ser inserido numa unidade prisional no ERJ. Os viveiros além de atenderem a demanda dos projetos ambientais da companhia, realizam parcerias com municípios para a preservação e recuperação dos mananciais. Os responsáveis pelo programa, também participam de ações de educação ambiental, explicando as crianças e a comunidade a importância da preservação da mata ciliar para o abastecimento de água.