

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 04/05/2026.



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

JUSCIMARA RODRIGUES SILVA

**LODOS DE ETAS: POTENCIAIS IMPACTOS, EFEITOS DA
SECAGEM TÉRMICA E PERCOLAÇÃO DE METAIS PESADOS
EM ATERROS EXCLUSIVOS, SANITÁRIOS E OBRAS
GEOTÉCNICAS.**

Bauru
2024

JUSCIMARA RODRIGUES SILVA

**LODOS DE ETAS: POTENCIAIS IMPACTOS, EFEITOS DA
SECAGEM TÉRMICA E PERCOLAÇÃO DE METAIS PESADOS
EM ATERROS EXCLUSIVOS, SANITÁRIOS E OBRAS
GEOTÉCNICAS.**

Dissertação apresentada como requisito
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho", Área de Concentração
Saneamento.

Orientadora: Prof. Dra. Fabiana Alves
Fiore Pinto

Co-orientadora: Amanda Maria Dantas
de Jesus

Bauru
2024



Silva, Juscimara Rodrigues.

Lodos de ETAS: Potenciais Impactos, Efeitos da Secagem Térmica e Percolação de Metais Pesados em Aterros Exclusivos, Sanitários e Obras Geotécnicas. / Juscimara Rodrigues Silva. - Bauru, 2024
90 f. : il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental

Orientadora: Fabiana Alves Fiore

1. Lodo de ETA. 2. Secagem Térmica. 3. Disposição de LETAs. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JUSCIMARA RODRIGUES SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de maio do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JUSCIMARA RODRIGUES SILVA, intitulada **ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ETAS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof^a. Dr^a. FABIANA ALVES FIORE PINTO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de São José dos Campos, Prof.^a Dr.^a GRAZIELE RUAS LAGOAS DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia - UNESP - Câmpus de Bauru, Prof^a Dr^a CALI LAGUNA ACHON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: _____ APROVADA _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof^a. Dr^a. FABIANA ALVES FIORE PINTO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: **JUSCIMARA RODRIGUES SILVA**

DE: "ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ETAS"

PARA:

Lodos de ETAs: potenciais impactos, efeitos da secagem térmica e percolação de metais pesados em aterros exclusivos, sanitários e obras geotécnicas.

Bauru, 03 de maio de 2024.

Prof^a. Dr^a. FABIANA ALVES FIORE PINTO
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o suporte e paciência, em especial ao meu esposo, Daniel, e a minha irmã, Letícia, pela ajuda e poder compartilhar com vocês as experiências ao longo dessa jornada.

À minha orientadora, professora Dra. Fabiana Fiore e co-orientadora, Dra. Amanda Maria Dantas, por todo o apoio, paciência e contribuições na construção deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Ambiental do ICT/UNESP de São José dos Campos pela oportunidade.

Aos amigos Eduardo Toledo, Mirella Gama, Carol Massuci, Magda Hirsch e Arthur Bispo que contribuíram de forma significativa na construção desse projeto. E a todos os professores que contribuíram na validação dos mesmos.

E a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada.

RESUMO

A tendência de urbanização e de rápido crescimento da população mundial estabelecem uma demanda de água potável cada vez maior. As Estações de Tratamento de Águas (ETAs) desempenham papel crucial no tratamento da água para consumo humano. No entanto, o processo resulta na geração contínua de resíduos, conhecidos como Lodos de Estação de Tratamento de Água (LETA), cuja composição varia conforme a qualidade da água bruta, os métodos e insumos de tratamento empregados. A gestão e o gerenciamento desses resíduos é um desafio ambiental em função do volume gerado, da recorrente e crescente geração, da disposição inadequada e do aterramento como rejeito em aterros sanitários. Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a secagem térmica e os aspectos e impactos da disposição de LETAs em solos. Para isso, mapeou-se e classificou-se os principais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos e comparou-se as perspectivas de pesquisadores e profissionais do saneamento. Também foi avaliado o impacto da secagem térmica nas características físico-químicas e microbiológicas de lodos de estação de tratamento de água, por meio de estudo de caso exploratório em ETA localizada no estado de São Paulo. Além disso, avaliou-se os aspectos ambientais associados às disposições dos LETAs (seco termicamente, naturalmente e desaguado) no solo. Com isso, verificou-se que ainda há uma lacuna no conhecimento sobre os impactos da disposição dos LETAs entre pesquisadores e profissionais do saneamento e que a temática demanda a realização de estudos e ampla divulgação para garantir que medidas preventivas sejam adotadas nas ETAs. Foi observado também, que a secagem térmica propicia a inativação de microorganismos e que o produto dela resultante traz benefícios para as demais etapas do manejo deste resíduo. No entanto, a presença dos elementos: bário, cromo e mercúrio, nos extratos lixiviados, evidencia a necessidade de realização de ensaio complementar de toxicidade para a adequada classificação desses resíduos. E ao avaliar a disposição de LETAs em solo através de um aparato experimental, simulando diferentes condições, verificou-se que tanto as condições operacionais quanto o tipo de secagem de lodo exercem influência significativa na concentração de metais dos percolados. Isso evidencia que as simulações foram capazes de representar as diferentes condições de disposição de LETAs em solos.

Palavras-chave: Lodo de ETA, Secagem Térmica, Disposição de LETAs.

ABSTRACT

The trend of urbanization and rapid population growth worldwide establish an increasingly higher demand for potable water. Water Treatment Plants (WTPs) play a crucial role in treating water for human consumption. However, the process results in the continuous generation of waste, known as Water Treatment Plant Sludge (WTPS), whose composition varies according to the quality of the raw water, the methods, and treatment inputs employed. Managing and handling these wastes is an environmental challenge due to the volume generated, the recurring and growing generation, improper disposal, and landfilling as waste in landfills. In this scenario, this study aims to evaluate thermal drying and the aspects and impacts of the disposal of WTPS in soils. For this purpose, the main environmental impacts of WTPS disposal in soils were mapped and classified, and the perspectives of researchers and sanitation professionals were compared. The impact of thermal drying on the physicochemical and microbiological characteristics of water treatment plant sludge was also evaluated through an exploratory case study at a WTP located in the state of São Paulo. Furthermore, the environmental aspects associated with the disposal of WTPS (thermally dried, naturally, and dehydrated) in soil were evaluated. It was found that there is still a gap in knowledge about the impacts of WTPS disposal among researchers and sanitation professionals and that the topic requires the conduct of studies and widespread dissemination to ensure that preventive measures are adopted in WTPs. It was also observed that thermal drying facilitates the inactivation of microorganisms and that the resulting product brings benefits to the other stages of managing this waste. However, the presence of the elements barium, chromium, and mercury in leachate extracts highlights the need for additional toxicity testing for the proper classification of these wastes. When evaluating the disposal of WTPS in the soil through an experimental apparatus, simulating different conditions, it was found that both operational conditions and the type of sludge drying significantly influence the concentration of metals in leachates. This shows that the simulations were able to represent the different conditions of WTPS disposal in soils.

Keywords: WTP Sludge, Thermal Drying, WTPS Disposal.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: PRIMEIRO ARTIGO

Figura 1: Etapas metodológicas executadas para a realização da pesquisa.....	15
Figura 2: Potenciais impactos positivos e negativos identificados na aplicação de LETAs em solos.....	17
Figura 3: Potenciais impactos positivos do uso benéfico da LETAs em solos.....	19
Figura 4: Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções	20
Figura 5: Potenciais impactos negativos do uso benéfico da LETAs em solos.....	22
Figura 6: Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções.....	23
Figura 7: Potenciais impactos da disposição de LETAs como rejeitos em aterros sanitários.....	24
Figura 8: Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções	25

CAPÍTULO 2: SEGUNDO ARTIGO

Figura 1: Fluxograma geral do sistema de adensamento, desidratação e secagem de lodo.....	36
Figura 2: Fluxograma do sistema de secagem térmica.....	37

CAPÍTULO 3: TERCEIRO ARTIGO

Figura 1: Fluxograma da pesquisa	54
Figura 2: Aparato Experimental.....	55
Figura 3: Etapa Experimental	57
Figura 4a: Concentração dos elementos Alumínio, Bário, Cádmio, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel e Chumbo	64
Figura 4b: Concentração dos elementos Cobre, Zinco, Ferro, Magnésio e Potássio nos líquidos percolados.....	65
Figura 5a: Boxplot de percolação da concentração dos parâmetros: Alumínio, Bário, Cádmio, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel e Chumbo.....	66
Figura 5b: Boxplot de percolação da concentração dos parâmetros: Cobre, Zinco, Ferro, Magnésio e Potássio.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2: SEGUNDO ARTIGO

Tabela 1: Métodos analíticos para caracterização físico-química.....	38
Tabela 2: Métodos analíticos para caracterização microbiológica	39
Tabela 3: Caracterização da massa bruta	39
Tabela 4: Caracterização microbiológica.....	41
Tabela 5: Elementos Químicos presentes em extratos lixiviados	42
Tabela 6: Elementos químicos presentes em extratos solubilizados.....	44

CAPÍTULO 3: TERCEIRO ARTIGO

Tabela1: Parâmetros e métodos analíticos utilizados para a caracterização das amostras dos lodos e solo.	58
Tabela2: Parâmetros, fontes e métodos de análise utilizados para análises das amostras de percolados.....	58
Tabela3: Resultados de condutividade e pH da água de acordo com o cronograma de alimentação.....	61
Tabela4: Resultados analíticos dos LETAs e solo utilizados no preenchimento dos reatores.	61
Tabela5: Resultados do teste de Shapiro-Wilk por parâmetro durante os meses de análise por reator.....	72
Tabela6: Resultado do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> em termos do valor- <i>p</i>	73
Tabela7: Matriz de interação para diferenças estatisticamente significativas entre os reatores	75
Tabela8: Matriz de interação diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de secagem de lodo e condições experimentais.....	76
Tabela9: Comparação mediana da concentração dos metais com normativas nacionais.....	79
Tabela10: Parâmetros físico-químicos dos percolados por reatores	81
Tabela11: Concentrações de metais nos percolados por reatores.	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS – Aterro Sanitário

ETA – Estação de Tratamento de Água

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

LD – Lodo Desaguado

LSN – Lodo Seco Naturalmente

LSS – Lodo Seco em Secador

OG – Obras Geotécnicas

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SUMÁRIO

Resumo	i
Abstract	ii
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	iv
Lista de Siglas	V
1. Introdução	07
2. Objetivos.....	09
2.1 Objetivo Principal.....	09
2.1 Objetivos Específicos	09
3. Capítulo 1: Primeiro Artigo	10
4. Capítulo 2: Segundo Artigo	30
5. Capítulo 3: Terceiro Artigo	49
6. Considerações Finais.....	89
7. Referências Finais	90

1. INTRODUÇÃO

A tendência de urbanização e de rápido crescimento da população mundial estabelecem uma crescente demanda por água potável. Em vista disso, ocorre a excessiva exploração das fontes de água bruta e se demanda o desenvolvimento de sistemas de tratamento e de distribuição mais eficientes (AHMAD *et al.*, 2016). Dessa forma, a preocupação com a sustentabilidade ambiental no meio urbano tem aumentado, especificamente relacionada à disponibilidade e usos das águas (MORERA *et al.*, 2016).

O ciclo urbano da água inclui a retirada de água de recursos naturais, o tratamento para satisfazer aos padrões de qualidade e a distribuição do recurso para o consumo. Dentre os principais usos urbanos da água estão: o abastecimento domiciliar, a disponibilização de águas para as atividades recreativas, limpeza e irrigação de áreas urbanas e para os processos industriais (HIDALGO *et al.*, 2017).

A qualidade da água potável é um dos fatores que afetam a saúde humana. No entanto, a qualidade da água potável ainda vivenciada em muitos países, especialmente aqueles em desenvolvimento, induzem à proliferação de muitas doenças devido à má qualidade (P. LI & WU, 2019). A missão básica das estações de tratamento de água é fornecer água potável que satisfaça aos requisitos de qualidade estabelecidos pela legislação do território e que garantam a saúde pública. Além desse objetivo primordial, as concessionárias também precisam operar os sistemas de forma rentável e sustentável (KUČERA *et al.*, 2018).

Segundo Godoy *et al.*, (2019), as estações de tratamento de água estão presentes em 85% dos 5.570 municípios brasileiros, o que significa aproximadamente 7.500 unidades distribuídas em 8.516 milhões de Km². No entanto, o processo de tratamento físico-químico das águas brutas, em geral captadas superficialmente no país, produz uma quantidade significativa de lodos de ETA (LETAs). Esses resíduos são gerados principalmente nas operações unitárias dos decantadores e filtros (SANTOS, 2016). Os LETAs possuem características físico-químicas que variam com a natureza da água captada, os processos unitários das ETAs e os produtos químicos aplicados no tratamento (GODOY *et al.*, 2019).

Em função da sazonalidade e heterogeneidade dos LETAs, se faz necessário a caracterização desse resíduo para cada estação de tratamento de água para fins de reciclagem e reutilização (NAZIR *et al.*, 2020). Na origem, em geral, os LETAs possuem mais de 97% de água, apresentam compostos químicos do processo de tratamento e sólidos em suspensão, principalmente partículas de solo (areia, silte e argila), mas podem também apresentar matéria orgânica, algas, bactérias e vírus (BOSCOV *et al.*, 2021).

Na maioria dos países em desenvolvimento, o lodo gerado nas estações de tratamento de água ainda é lançado *in natura* nos corpos d'água, uma prática não permitida em países com regulamentações ambientais sólidas, pois essa atividade pode causar assoreamento e deterioração da qualidade da água (BOSCOV *et al.*, 2021). Dentre as melhores práticas de destinação atualmente vigente está a disposição final em aterros sanitários como rejeitos. No entanto, considerados os aspectos ambientais associados

à elevada quantidade de lodos produzidos nas ETAs e a escassez de áreas para sua disposição adequada se faz necessária a promoção da valorização desses resíduos de forma que esses possam ser convertidos em material com capacidade para ser incorporado à cadeia produtiva (ARGUDO-GARCÍA *et al.*, 2017).

Diversos estudos apontam para a viabilidade técnica do uso benéfico de LETAs em diversos processos produtivos. A substituição de recursos naturais, que deixam de ser explorados, por LETAs permite a incorporação dos princípios da economia circular a essa atividade (COSENZA *et al.*, 2020). Embora ainda escassa, as pesquisas sobre as propriedades e aplicações geotécnicas dos LETAs tem aumentado nos últimos anos. Dentre os usos benéficos avaliados no Brasil estão: a incorporação de LETAs em diferentes solos para a produção de base e sub-base de pavimentos (FIORE *et al.*, 2022) e para a cobertura de aterros (BOSCOV *et al.*, 2021).

A despeito da viabilidade técnica do uso benéfico desses resíduos, se faz necessária a avaliação dos impactos ambientais decorrentes dessas aplicações a partir de resultados experimentais (BOSCOV *et al.*, 2021), assim como dos impactos das melhores práticas atualmente observadas. É nesse cenário que a pesquisa foi conduzida, visando corroborar com a ampliação do conhecimento científico sobre a temática. Gerando assim, informações qualificadas que propiciem o estabelecimento de diretrizes relacionadas ao uso benéfico do material e ao controle dos aspectos ambientais de sua disposição final. Seus resultados foram apresentados em três minutas de artigos científicos que objetivaram (1) identificar os potenciais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos a partir da percepção de atores atuantes na área de saneamento; (2) Avaliar os efeitos da secagem térmica nas características dos LETAs, por meio de estudo de caso em unidade operante no estado de São Paulo; (3) Determinar os potenciais impactos decorrentes de destinações de LETAs em solos, por meio de simulações de condições ambientais ocorrentes no estado de São Paulo.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que tanto as condições operacionais quanto o tipo de secagem de lodo exercem influência significativa na concentração de metais dos percolados. Isso evidencia que as simulações foram capazes de representar adequadamente as diferentes condições de disposição de LETAs em solos.

Nas simulações avaliadas, os metais mais frequentemente encontrados em concentrações elevadas nos percolados foram: bário, manganês, ferro, magnésio e zinco e esses devem ser destacados como potenciais riscos à qualidade ambiental e a saúde humana. Observou-se que as condições experimentais contendo Lodo Desaguado (LD) e o Lodo Seco Termicamente apresentaram maiores concentrações para alguns metais nas amostras de percolado. Considerado o fato de que os LETAs atualmente são encaminhados em ambas as condições para disposição final em aterros, a operação adequada dessas unidades é crucial para evitar possíveis contaminações.

A comparação das concentrações de metais presentes nos percolados com os padrões estabelecidos pelas normativas ambientais (Conama 357, Conama 356 e EPA) revela que, em média, alguns elementos (Al, Fe, Ba, Mn e Cu) excedem os referenciais de qualidade estabelecidos. No entanto, destaca-se que os referenciais utilizados são mais restritivos do que aqueles aplicáveis para efluentes tratados e que outras equiparações serão realizadas antes da publicação dos resultados dessa pesquisa.

Estudos adicionais são necessários para avaliar os efeitos de longo prazo das características dos percolados nas condições experimentais. Destaca-se que os reatores continuaram em operação, por meio de pesquisa complementar, para que o experimento representasse todo o ano hidrológico e publicação deve incorporar os dados complementares gerados também no período de seca.

Espera-se que o trabalho contribua para a ampliação do conhecimento acerca dos potenciais impactos das condições operacionais e dos diferentes processos de secagem de lodo e, sobretudo, para garantir a implementação de práticas mais sustentáveis na gestão desses resíduos.

5. APÊNDICES

Tabela 10. Parâmetro físico-químicos dos percolados por reatores.

Reator	Mês de ensaio	Volume de água alimentado (L)	Volume de água percolada (L)	Porcentagem de percolação (%)	pH	Condutividade ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	Cor (uC)	Turbidez (NTU)
1	Outubro	7,20	1,69	23,50	7,73	872,30	520,00	74,50
2		7,20	1,91	26,50	7,77	897,30	493,00	33,80
3		7,20	3,30	45,80	6,55	869,60	31,60	8,00
4		7,20	2,74	38,10	7,43	77,40	5,30	0,50
5		7,20	0,54	7,50	7,87	731,70	19,10	1,60
6		7,20	4,29	59,60	7,47	528,00	28,70	2,50
7		7,20	2,58	35,80	6,75	861,30	14,10	6,30
8		7,20	7,40	102,80	6,97	463,70	139,00	26,50
9		7,20	2,64	36,70	6,89	588,60	101,30	6,50
10		7,20	3,01	41,70	6,70	1068,00	29,00	9,60
11		7,20	5,43	75,40	7,54	1013,00	287,00	29,20
12		7,20	1,18	16,40	8,10	547,90	15,20	1,30
13		7,20	3,43	47,60	7,33	1045,00	28,10	3,20
1	Novembro	7,40	2,19	29,60	8,01	1482,00	298,00	32,57
2		7,40	3,56	48,10	7,34	806,70	488,70	26,53
3		7,40	4,70	63,50	6,99	1368,00	23,40	1,98
4		7,40	6,48	87,60	7,71	71,90	10,00	0,44
5		7,40	6,69	90,40	7,76	816,60	15,20	1,08
6		7,40	5,40	73,00	7,77	544,80	36,80	2,80
7		7,40	6,62	89,50	7,08	1194,00	12,50	0,71
8		7,40	7,03	95,00	5,13	219,80	21,40	1,58
9		7,40	4,81	65,00	6,87	1216,00	209,00	16,00
10		7,40	4,86	65,70	7,11	1222,00	22,80	1,34
11		7,40	3,19	43,10	8,13	1385,00	304,70	61,63
12		7,40	6,97	94,20	7,89	965,90	21,70	0,53
13		7,40	7,05	95,30	7,38	1283,00	36,80	3,52

1		9,60	1,86	24,10	6,99	798,00	432,00	62,30
2		9,60	2,45	33,90	7,15	806,70	513,00	34,20
3		9,60	3,12	43,20	7,03	1203,00	32,40	5,40
4		9,60	4,48	62,10	8,02	86,40	13,20	0,56
5		9,60	5,49	23,40	7,96	826,40	20,10	1,32
6		9,60	3,58	48,90	7,55	563,00	32,40	3,10
7	Dezembro	9,60	3,85	52,30	6,98	996,00	15,40	3,20
8		9,60	6,98	98,30	7,01	456,30	44,30	5,63
9		9,60	3,22	45,30	6,75	876,00	149,30	17,30
10		9,60	2,85	42,20	7,02	1045,00	26,70	8,30
11		9,60	4,69	63,10	8,02	1123,30	350,20	55,68
12		9,60	2,33	47,20	8,15	865,90	31,40	1,53
13		9,60	4,23	55,30	7,56	1036,00	33,20	3,42
1		12,88	8,25	64,05	7,85	599,50	371,00	56,30
2		12,88	13,50	104,81	7,45	483,80	520,00	82,90
3		12,88	11,47	89,05	6,73	769,60	18,70	2,02
4		12,88	11,50	89,29	7,40	48,58	13,40	0,83
5		12,88	2,41	18,71	7,70	470,50	21,10	0,84
6		12,88	11,02	85,53	6,94	554,20	37,80	0,83
7	Janeiro	12,88	11,35	88,12	6,39	820,70	13,50	1,19
8		12,88	12,63	98,06	7,07	73,84	13,60	2,24
9		12,88	11,35	88,12	6,76	680,60	71,00	1,31
10		12,88	11,29	87,66	6,69	672,70	10,90	0,65
11		12,88	11,60	90,06	7,49	408,40	35,00	1,12
12		12,88	11,60	90,06	7,74	762,80	111,00	6,05
13		12,88	11,70	90,84	7,26	813,40	31,90	1,60
1		11,36	6,23	54,84	7,79	729,60	235,00	8,47
2		11,36	10,00	88,03	7,15	424,40	520,00	75,60
3		11,36	9,50	83,63	6,70	687,80	20,20	1,44
4	Fevereiro	11,36	9,31	81,95	7,20	51,72	13,60	0,86
5		11,36	2,47	21,74	7,75	437,40	11,20	1,18
6		11,36	8,33	73,33	4,18	604,80	61,70	3,49
7		11,36	9,24	81,34	6,48	692,90	12,60	1,11

8		11,36	9,50	83,63	7,13	75,84	16,70	1,42
9		11,36	9,17	80,72	7,18	218,90	101,00	1,50
10		11,36	9,24	81,34	6,91	570,30	17,20	1,55
11		11,36	9,42	82,92	7,60	349,00	42,90	2,03
12		11,36	10,12	89,08	7,71	891,10	282,00	10,10
13		11,36	9,57	84,24	7,62	674,50	20,20	1,80
1		9,76	4,50	46,11	7,99	1029,00	306,00	5,44
2		9,76	10,62	108,81	7,16	521,30	520,00	123,00
3		9,76	8,00	81,97	6,50	720,00	11,70	1,46
4		9,76	10,67	109,32	7,00	56,92	3,80	0,59
5		9,76	2,41	24,69	7,53	496,40	5,10	0,43
6		9,76	10,20	104,51	5,97	878,60	218,00	10,10
7	Março	9,76	13,40	137,30	6,28	714,40	4,10	0,89
8		9,76	11,13	114,04	6,85	78,11	12,60	2,97
9		9,76	10,66	109,22	6,99	489,00	108,00	1,69
10		9,76	10,67	109,32	6,45	551,00	10,10	1,10
11		9,76	10,79	110,55	7,08	240,90	35,00	1,80
12		9,76	10,54	107,99	7,45	767,60	514,00	19,50
13		9,76	10,84	111,07	7,31	675,80	21,00	1,73

	Cobalto Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cromo Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
	Manganês Total	7,91	54,87	90,16	0,18	2,01	13,97	71,47	2,57	139,07	69,30	0,25	0,70	21,79
	Níquel Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Chumbo Total	0,15	0,15	0,15	0,13	0,16	0,14	0,14	0,16	0,15	0,16	0,14	0,14	0,14
	Cobre Total	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01
	Zinco Total	0,02	0,02	0,07	0,00	0,02	0,00	0,10	0,00	0,07	0,02	0,02	0,00	0,01
	Ferro Total	2,74	12,75	0,00	0,00	0,30	0,00	0,01	0,77	0,88	0,07	0,20	0,00	0,00
	Magnésio Total	4,01	15,08	56,25	0,52	8,40	7,81	44,22	1,70	60,78	43,34	22,20	37,36	55,72
	Potássio Total	23,25	19,95	102,77	2,77	23,34	13,84	85,67	5,36	55,74	81,70	83,25	86,80	115,52
Janeiro	Alumínio Total	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	1,68	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bário Total	0,10	0,66	3,94	0,02	0,25	0,10	1,57	0,08	0,07	2,80	2,78	0,12	0,53
	Cádmio Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
	Cobalto Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
	Cromo Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Manganês Total	5,89	45,60	78,62	0,07	4,24	22,91	102,28	1,82	0,32	53,89	65,67	17,89	14,86
	Níquel Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
	Chumbo Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05
	Cobre Total	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
	Zinco Total	0,01	0,02	0,08	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,12	0,02	0,02
	Ferro Total	3,12	6,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	1,51	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00
	Magnésio Total	2,74	8,40	35,50	0,46	8,62	8,96	35,51	1,48	7,58	23,95	37,82	32,29	31,25
	Potássio Total	8,40	4,79	20,65	0,43	6,98	1,86	2,75	0,16	3,29	1,64	2,44	2,28	3,18
Fevereiro	Alumínio Total	0,13	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,15	0,24	0,16	0,61	0,04	0,00	0,21
	Bário Total	0,13	0,66	3,64	0,04	0,30	0,24	2,89	0,05	0,58	2,13	0,07	0,21	0,62
	Cádmio Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00
	Cobalto Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cromo Total	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
	Manganês Total	6,90	43,37	88,41	0,37	3,99	89,02	80,04	1,61	74,83	49,99	0,38	5,28	9,72
	Níquel Total	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Chumbo Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cobre Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zinco Total	0,03	0,04	0,08	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Março	Ferro Total	0,53	4,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,13	0,15	0,07	0,55	0,03	0,13	0,14
	Magnésio Total	3,49	4,93	20,10	0,44	8,79	17,83	25,93	1,35	22,12	13,42	6,32	28,32	16,35
	Potássio Total	7,26	3,42	12,65	0,33	4,66	2,55	1,54	0,32	1,54	1,16	1,34	3,79	2,16
	Alumínio Total	0,14	0,00	0,13	0,06	0,00	0,20	0,18	1,18	0,13	0,29	0,00	0,00	0,17
	Bário Total	0,13	0,69	3,29	0,03	0,26	0,63	2,99	0,05	0,56	1,98	0,04	0,64	0,62
	Cádmio Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cobalto Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cromo Total	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
	Manganês Total	8,26	52,36	62,42	0,09	3,51	105,73	68,15	0,32	50,25	39,45	0,09	15,48	6,65
	Níquel Total	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Chumbo Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cobre Total	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zinco Total	0,02	0,01	0,06	0,00	0,02	0,07	0,08	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
	Ferro Total	0,28	28,97	0,09	0,00	0,00	0,03	0,12	0,71	0,08	0,20	0,00	7,42	0,07
	Magnésio Total	4,15	5,45	8,77	0,36	7,01	16,86	13,20	0,76	19,42	10,03	4,14	12,97	13,09
	Potássio Total	6,96	3,91	11,02	3,23	2,53	1,61	1,76	0,51	1,38	1,06	2,13	3,12	1,53

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950- 955. New Delhi, India: ELSEVIER. 2016. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.088.

BARAKWAN, R. A., PRATIWI, W. B., TRIHADININGRUM, Y., & BAGASTYO, A. Y. (2020). Electrolysis using Pt/SS electrodes for aluminum recovery from drinking water treatment sludge. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(6), 2130–2139. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01097-0>.

BOSCOV M. E. G., TSUGAWA J. K., MONTALVAN E. L. T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils, *Sustainability* 2021, 13, 9848. <https://doi.org/10.3390/su13179848>.

BRASIL. Lei Federal no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9. 605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. Inferência estatística. Cengage Learning, 2010.

CREMADES, L. V., CUSIDÓ, J. A., & ARTEAGA, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>.

DE CARVALHO GOMES, S., ZHOU, J. L., LI, W., & LONG, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145(December 2018), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>.

FÁVERO, L. P; BELFIORE, P. Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. Elsevier Brasil, 2017.

FIGLIORE F. A., RODGHER S., ITO C. Y. K., BARDINI V. S. S., KLINSKY L. M. G., Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 9, August 2022, 100512.

FONSECA HERREÑO, L. C., VALDÉS SOLANO, D. M., RODRÍGUEZ SARABIA, K. D. CABELLO PÉREZ, J. O., & MUÑOZ QUINTERO, A. A. (2019). Drinking water treatment sludge as a partial substitute for clays in non-structural brick production. *Journal of Physics: Conference Series*, 1409(1), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1409/1/012013>.

GODOY, L. G. G. DE, ROHDEN, A. B., GARCEZ, M. R., COSTA, E. B. DA, DA DALT, S., & ANDRADE, J. J. DE O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Revista DAE*. Ed. 205, 2017.

HIDALGO, A. M., MURCIA, M. D., GÓMEZ, M., GÓMEZ, E., GARCÍA-IZQUIERDO, C., & SOLANO, C. (2017). Possible Uses for Sludge from Drinking Water Treatment Plants. *Journal of Environmental Engineering*, 143(3), 04016088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.19437870.0001176](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.19437870.0001176).

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M. Probability and Statistics in Engineering. Gen-LTC Group, 2000.

HOWELLS, P.A; LEWIS, J.S; BEARD, B.D; OLIVER, W.I. Water treatment residuals as soil amendments: Examining element extractability, soil porewater concentrations and effects on earthworm. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018 n°162, pág. 334–340.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 27 2012. Lista Brasileira de Resíduos Sólidos – Instrução Normativa n° 13, de 18 de dezembro de 2012. *Diário Oficial da União*, Brasília (DF). 2012 20 dez.

JING, F., HUI, B., YUDAN, X., RUI, Z., PULI, Z., DUO, B., ZENG, D., WEI, L., & XUEBIN,

L. (2020). Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(March), 100456. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100456>.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. *Análise de dados multivariados*. São Paulo: Cengage Learning, v. 475, 2011.

LOBATO, L.C.S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Sanitária. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MONTALVAN, E. L. T., *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística básica*. Saraiva Educação SA, 2017.

RODRIGUES, L. P., & HOLANDA, J. N. F. (2013). Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. *Cerâmica*, 59(352), 551–556. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132013000400010>.

SABESP. *Dados dos sistemas produtores*. Portal dos mananciais, 2023. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?SistemaId=1>. Acesso em: 17 mar. 2024.

SHEN, C., ZHAO, Y., LI, W., YANG, Y., LIU, R., & MORGEN, D. (2019). Global profile of heavy metals and semimetals adsorption using drinking water treatment residual. *Chemical Engineering Journal*, 372(February), 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.219>.

SILVA, J. R.; MENEZES, A. C. B.; PINTO, F. A. F. *Análise de eficiência da secagem térmica de lodos de estação de tratamento de águas: estudo de caso realizado na região metropolitana de São Paulo*. In: 31 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 2021. Anais Curitiba.

SUZELEI RODGHER, FABIANA ALVES FIORE, CRISTIANE YUMI KOGA ITO, V. S. DOS SANTOS BARDINI, L. M. G. K. (2022). Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. In *Bioresource Technology Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512>.

WASSERMAN, J. C., ALMEIDA, A. M., PEREZ, D. V., WASSERMAN, M. A., & MACHADO, W. (2019). Evaluation of contaminants spreading from sludge piles, applying geochemical fractionation and attenuation of concentrations model in a tropical reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7507-z>.

WOŁOWIEC, M., KOMOROWSKA-KAUFMAN, M., PRUSS, A., RZEPA, G., BAJDA, T. Removal of heavy metals and metalloids from water using drinking water treatment residuals as adsorbents: A review (2019) *Minerals*, 9 (8), 487. <https://doi.org/10.3390/min9080487>.

YANG, J., REN, Y., CHEN, S., ZHANG, Z., PANG, H., WANG, X., & LU, J. (2023). Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, 365(October 2022), 130027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130027>.

ZHAO, Y. ; Liu, R.;y Awe, O.W.;Yang, Y; Shen, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals – An explicit and comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 353, 2018, Pages 717-726, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.143>.

ZHAO, R., LIU, J., FENG, J., LI, X., & LI, B. (2021). Microbial community composition and metabolic functions in landfill leachate from different landfills of China. *Science of the Total Environment*, 767, 144861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144861>.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o trabalho desenvolvido, verificou-se que a gestão dos LETAs apresenta desafios significativos devido ao volume gerado e à complexidade de sua composição. Estudos indicam que, embora haja benefícios potenciais na reutilização dos LETAs, os riscos ambientais e os riscos associados à saúde, a presença de metais pesados e patógenos, exigem regulamentações específicas. Com isso, a integração desses conhecimentos e a promoção de estudos adicionais são essenciais para desenvolver práticas sustentáveis e seguras no manejo desses resíduos. Portanto sugere-se os temas abaixo para futuras pesquisas que visam contribuir com o desenvolvimento da temática.

Sugestões para Futuros Trabalhos:

1. **Estudos Longitudinais:** Realizar pesquisas a longo prazo para avaliar os efeitos contínuos da disposição de LETAs em solos e aterros.
2. **Desenvolvimento de Tecnologias:** Investigar novas tecnologias para tratamento e secagem dos LETAs, visando a redução de elementos tóxicos e melhoria na segurança ambiental.
3. **Avaliação de Impactos Econômicos:** Analisar os benefícios econômicos do uso de LETAs na agricultura e construção, comparando-os com os custos de disposição final.
4. **Normatização e Regulamentação:** Desenvolver e atualizar normas específicas para a disposição e reutilização de LETAs, baseando-se em resultados científicos robustos.
5. **Exploração de Alternativas Sustentáveis:** Examinar outras formas de aproveitamento dos LETAs, visando a sustentabilidade.

7. REFERÊNCIAS

AHMAD, T., AHMAD, K., & ALAM, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, 124, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>.

ARGUDO-GARCÍA, J. J., MOLINA-MORENO, V., & LEYVA-DÍAZ, J. C. (2017). Valorización de lodos procedentes de plantas de tratamiento de agua potable. Una apuesta por la economía circular y sostenibilidad. *Dyna (Spain)*, 92(1), 71–75. <https://doi.org/10.6036/8024>.

BOSCOV, M. E. G., TSUGAWA, J. K., & MONTALVAN, E. L. T. (2021). Beneficial use of water treatment sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179848>.

COSENZA, J. P. DE ANDRADE, E. M., & DE ASSUNÇÃO, G. M. (2020). A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: Analysis of the national solid waste policy. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 9(1), 1–30. <https://doi.org/10.5585/GEAS.V9I1.16147>.

IORE, F. A., RODGHER S., ITO C. Y. K., SANTOS, V. S., BARDINI, L. M. G. K. (2022). Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. In *Bioresource Technology Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512>.

GODOY, L. G. G. DE, ROHDEN, A. B. GARCEZ, M. R., COSTA, E. B. DA, DA DALT, S., & ANDRADE, J. J. DE O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

HIDALGO, A. M., MURCIA, M. D., GÓMEZ, M., GÓMEZ, E., GARCÍA-IZQUIERDO, C., & SOLANO, C. (2017). Possible Uses for Sludge from Drinking Water Treatment Plants. *Journal of Environmental Engineering*, 143(3), 04016088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001176](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001176).

KUČERA, T., TUHOVČÁK, L., & BIELA, R. (2018). Technical auditing of water supply systems – part 2: Water treatment plant. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(4), 1141–1150. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.119>.

MORERA, S., COROMINAS, L., POCH, M., ALDAYA, M. M., & COMAS, J. (2016). Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741–4748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.102>.

P, Li., & WU, J. (2019). Drinking Water Quality and Public Health. *Exposure and Health*, 11(2), 73–79. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00299-8>.

SANTOS, F. P. DOS. (2016). Estudo Da Incorporação Do Lodo De Eta Em Argamassa. *Universidade Federal Do Pampa*, August, 60.

NAZIR, A. K., MAHMOUD, E., ALI, M., & ALI, N. (2020). Safe and economic disposal of water treatment residuals by reusing it as a substitution layer in roads construction (spectroscopic and geotechnical study). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30490–30501. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09371-2>.