

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LUCAS RODRIGUES BELLOTTI

**VARIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS DO LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**



Ilha Solteira
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS RODRIGUES BELLOTTI

**VARIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS DO LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosane Freire Boina

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

B447v Bellotti, Lucas Rodrigues.
Variação temporal e espacial das características do lodo de estação de
tratamento de água / Lucas Rodrigues Bellotti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
116 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e
Tecnologias Ambientais, 2024

Orientador: Rosane Freire Boina
Inclui bibliografia

1. Período sazonal. 2. Resíduo sólido. 3. Economia circular.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Espera-se que esse trabalho forneça informações norteadoras para as operadoras de saneamento, para a academia científica e para o setor industrial, especialmente quanto a gestão e gerenciamento de resíduos gerados em estações de tratamento de água e sua perspectiva de circulação em diferentes setores antes de sua disposição final ambientalmente adequada, abordando temáticas relacionadas às metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, com foco nos ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

It is expected that this work will provide guiding information for sanitation operators, for the academy and for the industrial sector, especially regarding the management of waste generated in water treatment plants and its circulation perspective in different sectors before its environmentally appropriate final disposal, addressing topics related to the goals protected by the United Nations Organization (ONU) in the 2030 for Sustainable Development, focusing on SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VARIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS DO LODO
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

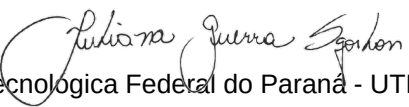
AUTOR: LUCAS RODRIGUES BELLOTTI

ORIENTADORA: ROSANE FREIRE BOINA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área:
Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. ROSANE FREIRE BOINA (Participação Virtual) 
Departamento de Química e Bioquímica / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP


Profa. Dra. JULIANA HELOISA PINÊ AMÉRICO PINHEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrômicas - UNESP

Profa. Dra. JULIANA GUERRA SGORLON (Participação Virtual) 
Coordenação do Curso de Engenharia Química / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Ilha Solteira, 28 de fevereiro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me capacitar nesse trabalho e pela oportunidade;

Aos meus pais, Jair e Helenice por todo esforço, apoio e incentivo;

À minha namorada Leticia por toda ajuda e carinho;

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Rosane Freire Boina, por todo o ensinamento e atenção que teve comigo durante essa jornada;

Ao Prof^o Dr^o Luís Fernando Rossi Léo e à Empresa Inovatec Engenharia Civil e Ambiental, por todo respaldo, oportunidade e compreensão;

Ao meu amigo Maurício pela ajuda;

À toda equipe do Laboratório de Águas, Águas Residuais e Reúso (LAARR), e do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS), por toda ajuda e cooperação;

À Prof^a Dr^a Juliana Guerra Sgorlon e à equipe do Laboratório Multiusuário de Apoio à Pesquisa (LAMAP) pela ajuda;

Aos Docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil de Ilha Solteira/SP, por todos os ensinamentos nas disciplinas;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) Câmpus de Ilha Solteira/SP e Presidente Prudente/SP.

Às companhias de saneamento que disponibilizaram amostras de lodo para a realização desse estudo.

RESUMO

Com a grande geração de resíduos oriundos do sistema de tratamento de água para fins de potabilização tem-se a preocupação em relação à disposição e reaproveitamento desse material, o lodo de Estação de tratamento de água (LETA), uma vez que disposto de forma incorreta causa diretamente impactos ao meio ambiente. No Brasil dispor o resíduo de lodo de forma inadequada é considerado crime ambiental, tornando a prática de reaproveitamento do resíduo cada vez mais presente. O objetivo desse trabalho foi caracterizar física e quimicamente o lodo de três estações de tratamento de água do Noroeste Paulista a fim de avaliar a influência da sazonalidade nas amostras coletadas. As coletas foram realizadas mensalmente (junho de 2021 a maio de 2022), no momento da limpeza dos decantadores e flotador, o material foi acondicionado em bombonas de polietileno (20L) para transporte. Inicialmente foram determinados valores de pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e sólidos sedimentáveis (mL/L) no lodo *in natura* com medidor de pH e sonda multiparâmetros. Após desaguoamento em leito gravitacional composto por manta geotêxtil ($105 \text{ g}/\text{m}^2$) foi determinado o teor de sólidos (%), teor de umidade (%), resíduo fixo (%) e resíduo volátil (%) pelo método gravimétrico. Com o lodo seco (100°C) e destorroado ($< 0,355 \text{ mm}$) foram encontradas a composição química elementar (FRX), frações granulométricas, estrutura cristalina (DRX), comportamento térmico (TGA), Limite de Plasticidade (%), Limite de Liquidez (%) e realizados ensaios de solubilização para Alumínio (mg/L) e Ferro (mg/L). Os resultados obtidos indicam que as características do lodo proveniente de três estações de tratamento de água apresentam variações significativas em função da sazonalidade, localização geográfica, tipo de coagulante utilizado e tecnologia empregada no tratamento.

Palavras-chave: período sazonal; resíduo sólido; economia circular.

ABSTRACT

With the large generation of waste from the water treatment system for potabilization purposes, there is concern regarding the disposal and reuse of this material, the sludge from the water treatment plant (WTPS), as it is disposed of incorrectly. directly impacts the environment. In Brazil, disposing of sludge waste inappropriately is considered an environmental crime, making the practice of reusing waste increasingly common. The objective of this work was to physically and chemically characterize the sludge from three water treatment plants in the Northwest of São Paulo in order to evaluate the influence of seasonality on the samples collected. Collections were carried out monthly (June 2021 to May 2022), when cleaning the decanters and flotation tank, the material was packed in polyethylene drums (20L) for transportation. Initially, pH, electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) and settleable solids (mL/L) values were determined in the fresh sludge with pH meter and multiparameter probe. After dewatering in a gravity bed composed of a geotextile blanket ($105 \text{ g}/\text{m}^2$), the solid content (%) and moisture content (%), fixed residue (%) and volatile residue (%) were determined using the gravimetric method. With the sludge dry (100°C) and crumbled ($< 0.355 \text{ mm}$), the elementary chemical composition (XRF), particle size fractions, crystalline structure (XRD), thermal behavior (TGA), Plasticity Limit (%), Liquidity Limit (%) and solubilization tests were carried out for Aluminum (mg/L) and Iron (mg/L). The results obtained indicate that the characteristics of the sludge from three water treatment plants present significant variations depending on seasonality, geographic location, type of coagulant used and technology used in the treatment.

Keywords: seasonal period; solid waste; circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma ETA – Tratamento convencional	24
Figura 2 - Esquema de tanque de Flotação por ar dissolvido	24
Figura 3 - Localização da ETA CB e ponto de captação de água bruta no rio Baguaçu	34
Figura 4 - Localização da ETA CT e ponto de captação de água bruta no Rio Tietê.	35
Figura 5 - Localização da ETA CP e ponto de captação de água bruta no rio Rio Preto.	35
Figura 6 - Tipos de solos da região da ETA CB e ETA CT	36
Figura 7 - Tipos de solos da região da ETA CP	37
Figura 8 - Valores de precipitação média histórica (mm) e precipitação nos meses de coleta de LETA (mm), da região das ETAS CB, CT em Araçatuba/SP.	39
Figura 9 - Valores de precipitação média histórica (mm) e precipitação nos meses de coleta de LETA (mm), da região das ETA CP em São José do Rio Preto/SP.....	40
Figura 10 - Decantador ETA CB (A). Limpeza e coleta de amostra (B).	42
Figura 11 - Decantador ETA CP (A). Limpeza (B) e coleta (C) de amostra.	42
Figura 12 - Flotofiltro (A) e coleta de amostra (B) na ETA CT	43
Figura 13 - Armazenamento de amostra LETA em bombonas de polietileno de 20 litros (A) e em embalagens de 1 litro (B).....	43
Figura 14 - Desaguamento de LETA das ETAs CB, CT e CP	44
Figura 15 - LETA desaguado das ETAs CB, CT e CP	44
Figura 16 - Amostras de LETA desaguadas (A) e seca (100°C) (B).	45
Figura 17 - Destorroamento do lodo desaguado e seco (A) e micronização (B)	46
Figura 18 - Peneiramento da amostra de lodo desaguado e seco (A) resultando em pó (B) de textura fina (< 0,355 mm).	46
Figura 19 - Mensuração do pH (A) e Condutividade Elétrica (B) no LETA in natura.	48
Figura 20 - Forno tipo mufla modelo EDG 3000 3p-s (A). Amostras de LETA desaguadas (B). Amostras de LETA seca a 100°C (C).....	49
Figura 21 - Sedimentação de sólidos presente no LETA	51
Figura 22 - Equipamento para análise de composição química e mineralógica: (A) FRX; (B) DRX.....	54

Figura 23 - Equipamento de Termogravimetria	55
Figura 24 - Equipamento de Casagrande (A). Acessórios para ensaio de Limite de Liquidez (B): espátulas e cinzel.....	57
Figura 25 - Ensaio da determinação do limite de liquidez. Massa homogênea de LETA dividida em duas partes (A). Amostra seca por 24 horas a 100°C (B)	57
Figura 26 - Ensaio de Limite de Plasticidade, amostra e gabarito.....	59
Figura 27 - Amostras de Ensaio de Limite de Plasticidade com umidade(A) e Amostras de Ensaio de Limite de Plasticidade Seca a 100°C por 24 horas (B).....	60
Figura 28 – Incubadora shaker (A) espectrômetro de absorção atômica (B).	61
Figura 29 - Variação do valor de pH das amostras de LETA das ETAS CB (verde), CT (azul) e CP (vermelho) referente aos meses de junho de 2021 a maio de 2022, contemplando período de seca (S) e período chuvoso (C).	63
Figura 30 – Diagrama de caixa para valores de Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) das amostras de referente aos meses de junho de 2021 a maio de 2022, contemplando período de seca (S) e chuvoso (C).....	65
Figura 31 – Diagrama de caixa com valores de Teor de Sólidos do LETA da ETA CB (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).	67
Figura 32 - Diagrama de caixa com valores de Teor de Umidade do LETA da ETA (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).	68
Figura 33 - Diagrama de caixa com valores de Sólidos Fixos do LETA da ETA CB (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).	69
Figura 34 - Diagrama de caixa com valores de Sólidos Voláteis do LETA da ETA CB (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), ETA CT e ETA CP, contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).	70
Figura 35 - Resultados das análises de DRX nas amostras do lodo da ETA CB dos meses de junho de 2021 a maio de 2022.	81
Figura 36 - Resultados das análises de DRX nas amostras do lodo da ETA CT meses de junho de 2021 a maio de 2022.	81
Figura 37 - Resultados das análises de DRX nas amostras do lodo da ETA CP dos meses de junho de 2021 a maio de 2022.	82

Figura 38 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CB referente aos seis meses de período de seca (S), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.	84
Figura 39 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CB referente aos seis meses de período chuvoso (C), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.	85
Figura 40 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CT referente aos seis meses de período de seca (S), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.	86
Figura 41 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CT referente aos seis meses de período chuvoso (C), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.	87
Figura 42 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CP referente aos seis meses de período de seca (S), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.	88
Figura 43 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CP referente aos seis meses de período chuvoso (C), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.	89
Figura 44 - Diagrama de caixa com valores de concentração de alumínio (Al - mg/L) presente no LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).....	93
Figura 45 - Diagrama de caixa com valores de concentração de ferro (Fe - mg/L) presente no LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das análises estatísticas sazonal de CE.....	65
Tabela 2 – Resultados das análises estatísticas sazonal de Teor de sólidos e Teor de umidade.....	69
Tabela 3 – Resultados das análises estatísticas sazonal de Sólidos fixos e Sólidos voláteis.	71
Tabela 4 – Resultados das análises estatísticas espacial de Teor de sólidos, Teor de umidade, Sólidos fixos e Sólidos voláteis.....	71
Tabela 5 - Resultados das análises de Sólidos Sedimentáveis nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período de seca (S).	72
Tabela 6 - Resultados das análises de Sólidos Sedimentáveis nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período chuvoso (C).	73
Tabela 7 - Resultados da análise textural nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período de seca (S).	74
Tabela 8 - Resultados da análise textural nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período chuvoso (C).	74
Tabela 9 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CB dos seis meses de período de seca (S).	76
Tabela 10 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CB dos seis meses de período chuvoso (C).	76
Tabela 11 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CT dos seis meses de período de seca (S).	77
Tabela 12 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CT dos seis meses de período chuvoso (C).	77
Tabela 13 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CP dos seis meses de período de seca (S).	78
Tabela 14 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA dos seis meses de período chuvoso (C).	78
Tabela 15 - Resultados das análises estatísticas sazonal da composição química elementar.	79

Tabela 16 - Resultados das análises estatísticas espacial da composição química elementar.	79
Tabela 17 - Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) das amostras de LETA CB, CT e CP.	91
Tabela 18 - Resultados das análises estatísticas espacial de LL e LP.	91
Tabela 19 - Resultados das análises estatísticas sazonal de ensaio de solubilizado.	95
Tabela 20 - Resultados das análises estatísticas espacial de ensaio de solubilizado.	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção de LETA em escala mundial nos últimos dez anos.....	26
Quadro 1 - Produção de LETA em escala mundial nos últimos dez anos.....	26
Quadro 2 - Principais características e propriedades do LETA no Brasil e no mundo.	27
Quadro 3 - Caracterização das ETAs em estudo: CP (Rio Preto), CT (Rio Tietê), CB (Rio Baguaçu)	38
Quadro 4 - Coletas mensais de lodo de Estação de Tratamento de Água. CP: Rio Preto; CT: Rio Tietê; CB: Rio Baguaçu	41
Quadro 5 - Descrição dos métodos e referências empregadas para caracterização do lodo de estação de tratamento de água.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLASE

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ANAVA	Análise de Variância
CaO	Óxido de cálcio
CAP	Carvão Ativado Puerizado
CE	Condutividade Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DRX	Difração de Raio-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EIS	<i>Environmental Impact Statement</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FEIS	Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira
FRX	Fluorescência de Raio-X
FTC	Faculdade de Ciências e Tecnologia - Câmpus de Presidente Prudente
g	Grama
GO	Goiás
IP	Índice de Plasticidade
LAARR	Laboratório de Águas, Águas Residuais e Reúso
LCGRS	Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos
LAMAP	Laboratório Multiusuário de Apoio à Pesquisa
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
ml	Mililitro
mm	Milímetro

MnO	Óxidos de manganês
NBR	Norma Brasileira
NEPA	<i>National Environmental Policy Act</i>
P ₂ O ₅	Fosfato
PAC	Cloreto de Polialumínio
PE	Pernambuco
pH	Potencial Hidrogeniônico
PR	Paraná
RJ	Rio de Janeiro
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
SP	São Paulo
TG	Análise Termogravimétrica
TGA	Análise Térmica Diferencial
TiO ₂	Dióxido de titânio
UE	União Européia
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVO	21
2.1	OBJETIVO GERAL	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	22
3.2	A GERAÇÃO DO LODO EM ETAS	24
3.3	CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ETA.....	26
3.4	LEGISLAÇÃO	30
3.4.1	Âmbito Nacional – Esfera Federal e Estadual	30
3.4.2	Âmbito Internacional	32
4	AS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM ESTUDO	34
4.1	SAZONALIDADE NAS ÁREAS DE ESTUDO.....	39
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
5.1	COLETA DE AMOSTRAS DE LODO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ESTUDO.....	41
5.2	PREPARO DAS AMOSTRAS PARA A CARACTERIZAÇÃO.....	44
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA	46
5.3.1	pH e condutividade elétrica	48
5.3.2	Teor de sólidos e Teor de umidade.....	48
5.3.3	Sólidos totais fixos e Sólidos totais voláteis	50
5.3.4	Sólidos sedimentáveis	50
5.3.5	Frações granulométricas	51
5.3.6	Composição química elementar	54
5.3.7	Estrutura Cristalina	54
5.3.8	Comportamento térmico	55

5.3.9	Limite de liquidez.....	56
5.3.10	Limite de plasticidade	58
5.3.11	Ensaio de solubilização	60
5.3.12	Análise estatística de dados.....	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1	pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	63
6.2	TEOR DE SÓLIDOS / TEOR DE UMIDADE E SÓLIDOS FIXOS / SÓLIDOS VOLÁTEIS	67
6.3	SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS.....	72
6.4	FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS	74
6.5	COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR.....	75
6.6	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	80
6.7	COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	83
6.8	LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE	90
6.9	ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO.....	92
7	CONCLUSÃO.....	97
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXO A – Características de interesse na avaliação do LETA	113
	APÊNDICE A – Banco de dados.....	116

1 INTRODUÇÃO

A potabilização de águas naturais em estações de tratamento de água (ETAs) desempenha um papel crucial na oferta de um serviço essencial à população: água segura para consumo. No entanto, esse processo gera uma quantidade significativa de resíduos provenientes da água captada. Esses resíduos são conhecidos como lodo de estação de tratamento de água (LETA).

De acordo com a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), o LETA é classificado como um resíduo sólido classe II, ou seja, não perigoso. Assim, o gerenciamento do LETA deve priorizar a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e, por fim, a disposição final de forma ambientalmente adequada (Brasil, 2012), o que é um desafio para o setor de saneamento. Contudo, a crescente preocupação com a preservação ambiental e a busca por soluções sustentáveis têm impulsionado o avanço no campo da gestão de resíduos sólidos em todo o mundo.

A gestão do LETA envolve a problemática de manejo e disposição dos resíduos formados. O volume gerado é grandioso e o custo para sua adequada disposição é elevado. Gomes *et al.* (2019) levantou dados médios em alguns países sobre os custos anuais da disposição de lodo em aterro sanitário, sem contabilizar o transporte, quais sejam: 6,2 milhões de dólares na Austrália; € 35 milhões nos Países Baixos e £ 5,5 milhões no Reino Unido. No Brasil, considerando os custos de disposição e transporte, o trabalho de Smiderle (2016) estimou um valor de R\$ 3,9 milhões por ano para uma única ETA de ciclo convencional.

Propor uma solução é um desafio que, talvez, não tenha uma indicação plena, única e total. Mas, inspira alternativas de destino de uso e reuso muito interessantes quanto às possibilidades de aplicação, contrapondo aquilo que é convencional. Trabalhos desenvolvidos com o lodo de ETA mostram propostas para o deságue (Monteiro *et al.*, 2018; Escobal; Achon, 2017), perspectiva de redução da carga metálica (King *et al.*, 1975; Keeley *et al.*, 2014; Maraschin *et al.*, 2020), aplicação na agricultura (Dube *et al.*, 2018), incorporação de matrizes cerâmicas (Teixeira *et al.*, 2011; Cremades *et al.*, 2018) e cimentícia (EL-Didamony *et al.*, 2014; Andrade *et al.*, 2018; Hagemann *et al.*, 2019) e até mesmo desenvolvimento de adsorvedores para retenção e poluentes (Kang *et al.*, 2019; Siswoyo, *et al.*, 2019; Jing *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022; Boina *et al.*, 2024).

Com o exposto, o lodo de ETA se mostra muito promissor podendo servir como matéria-prima para diversos setores da economia, incluindo o saneamento. Nesse caso, tem-se o atendimento das prerrogativas do conceito de Economia Circular, visando o aproveitamento máximo do seu valor dentro de um sistema industrial (Mallory *et al.*, 2020).

Considerando a sua origem e formação, existe uma relação intrínseca das propriedades do LETA com a mineralogia do solo e qualidade das águas dos mananciais de captação de água (incluindo a presença de sólidos orgânicos e inorgânicos), fatores sazonais, bem como o tipo de tratamento e tecnologia empregada na clarificação (sedimentação, flotação), forma da retirada do lodo (manual, mecanizada) e os insumos empregados (como sulfato de alumínio, cloreto férrico, policloreto de alumínio e, em alguns casos, polímeros condicionantes) no processo de potabilização da água bruta (Richter, 2001; Menezes, 2006). Logo, há uma variação importante nas características físicas e químicas do LETA que, certamente, implicará na produção de diferentes materiais com propriedades, funcionalidades e comportamento específicos (Gomes *et al.*, 2019) e que não serão constantes ao longo do tempo, nem em uma única ETA, nem de uma ETA para outra, por exemplo.

Nessa situação, é importante destacar a escassez de estudos que tenham acompanhado e divulgado as mudanças nas propriedades do lodo de ETA ao longo do tempo e em diferentes locais. Essa falta de informações representa um desafio significativo para a replicação de pesquisas na comunidade acadêmica e para a implementação de projetos na esfera técnica. A ausência desses dados dificulta a compreensão abrangente do comportamento do lodo de ETA, bem como a formulação de estratégias eficazes de gerenciamento e tomada de decisões.

Esse trabalho visa contribuir com os estudos na área de saneamento e materiais ao propor a caracterização do lodo de três diferentes ETAs, de ciclo convencional, quanto aos aspectos de composição e propriedades técnicas ao longo de ciclos sazonais anuais.

Espera-se que este estudo seja uma fonte de orientação e conhecimento para as empresas de saneamento, comunidade acadêmica e indústria, especialmente no que diz respeito à gestão e tratamento dos resíduos provenientes das estações de tratamento de água, bem como a sua abordagem em diferentes setores antes da destinação final ambientalmente adequada. Os temas abordados nesta pesquisa

estão alinhados com as metas estabelecidas pela Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, estando em foco os ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) definidas pela Organização das Nações Unidas (ONU).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho teve como objetivo determinar propriedades do lodo de três estações de tratamento de água a fim de avaliar a influência espacial e da sazonalidade nas amostras coletadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender o objetivo geral, se fazem necessários:

- Conhecer as características do lodo das ETAs em estudo, analisando os elementos físicos e químicos de composição do resíduo;
- Avaliar o efeito sazonal (seca e chuva), o efeito espacial e de tecnologias de tratamento da água e remoção do lodo nas características do material coletado nas estações de tratamento de água do estudo;
- Compilar os dados obtidos e iniciar um banco de dados com informações que poderão ser utilizadas em diferentes setores, com perspectiva de circulação do lodo de ETA, antes de sua disposição final ambientalmente adequada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

A Estação de Tratamento de Água (ETA) tem como objetivo principal tratar e remover impurezas/contaminantes da água bruta, tornando-a segura e adequada para consumo humano e outros usos específicos. O processo de tratamento realizado em uma ETA envolve três etapas principais, sendo elas físicas, químicas e biológicas, com o intuito de eliminar partículas suspensas, substâncias dissolvidas, microrganismos e outros componentes indesejáveis da água. A água bruta, geralmente é captada de fontes como corpos hídricos ou aquíferos e sempre passam por etapas de tratamento em uma ETA, a fim de atender a Portaria de Potabilidade MS 888/2021.

A sequência das operações e processos aplicados pode variar dependendo da qualidade da água de entrada e dos requisitos específicos de tratamento em cada local. No entanto, conforme Bernardo *et al.*, 2002; Teixeira *et al.*, 2006, as etapas mais comuns em um sistema de tratamento de água incluem:

- **Coagulação e Floculação.** Nessa etapa, são adicionados produtos químicos coagulantes para aglutinar as partículas suspensas presentes na água. Em seguida, ocorre o processo de floculação, no qual os flocos formados se agrupam para facilitar sua posterior remoção;
- **Decantação.** Após a floculação, a água passa por unidades de decantação, como clarificadores ou tanques de sedimentação. Nessas estruturas, os flocos sedimentam devido à ação da gravidade, formando uma camada de lodo no fundo, enquanto a água clarificada é direcionada para a próxima etapa do tratamento;
- **Filtração.** A água clarificada passa por unidades de filtração, como filtros de areia, cascalho ou carvão ativado. Esses filtros retêm as partículas restantes e microrganismos, assegurando uma água mais limpa, livre de impurezas suspensas;
- **Desinfecção.** Com o objetivo de eliminar microrganismos patogênicos, como bactérias, vírus e protozoários, os métodos comuns de desinfecção incluem cloração, ozonização ou irradiação ultravioleta;

- Ajuste de pH e Tratamentos Adicionais. Em certas situações, o pH da água é ajustado para atender aos padrões de potabilidade. Além disso, dependendo da qualidade da água bruta e das exigências locais, podem ser aplicados tratamentos adicionais, como remoção de compostos orgânicos por meio de carvão ativado ou processos avançados de oxidação.

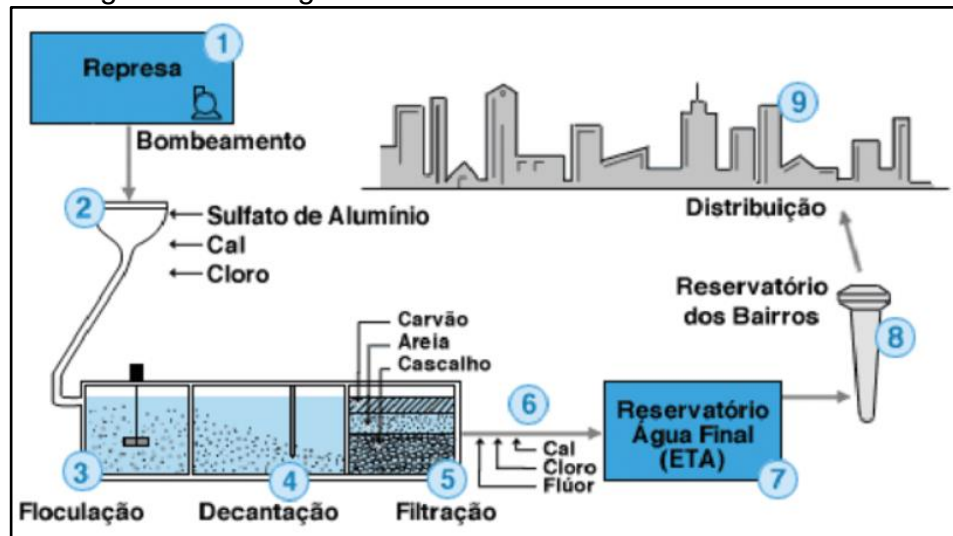
Outro processo físico encontrado nas ETAs para a separação dos flocos é a flotação por ar dissolvido: o sistema funciona a partir de um processo em que microbolhas são geradas na câmara de saturação, de forma que essas bolhas se incorporem no interior dos flocos ou por arraste hidráulico. Esses flocos e microbolhas apresentam uma densidade menor que o meio aquoso onde se encontram, o que assegura, por empuxo, sua flotação até a superfície do flotador, onde são removidas (Edzwald, 2010).

É importante ressaltar que as etapas de tratamento descritas acima são uma visão geral dos processos comumente utilizados em uma ETA no Brasil e que as especificidades podem variar de acordo com a localização geográfica e qualidade da água captada, sempre visando atender os parâmetros estabelecidos sobre potabilidade para consumo humano (Richter, 2001; Metcalf; Eddy, 2003; Bernardo *et al.*, 2011).

Mundialmente existem diversos tipos de ETAs com processos diferentes para o tratamento de água bruta, entre eles destacam-se: utilização de filtros de areia (Vandermaesen *et al.*, 2019; Fujioka *et al.*, 2019), uso de fosfato (Douterelo *et al.*, 2020), ésteres organofosforados (Choo; Oh, 2020; Li *et al.*, 2019), eletrocoagulação (Castaneda *et al.*, 2020; Kumari; Kumar, 2020), ozonização (Ding *et al.*, 2019; Talvy *et al.*, 2011; Papageorgiou *et al.*, 2014), ou radiação ultra-violeta (Zeng *et al.*, 2020).

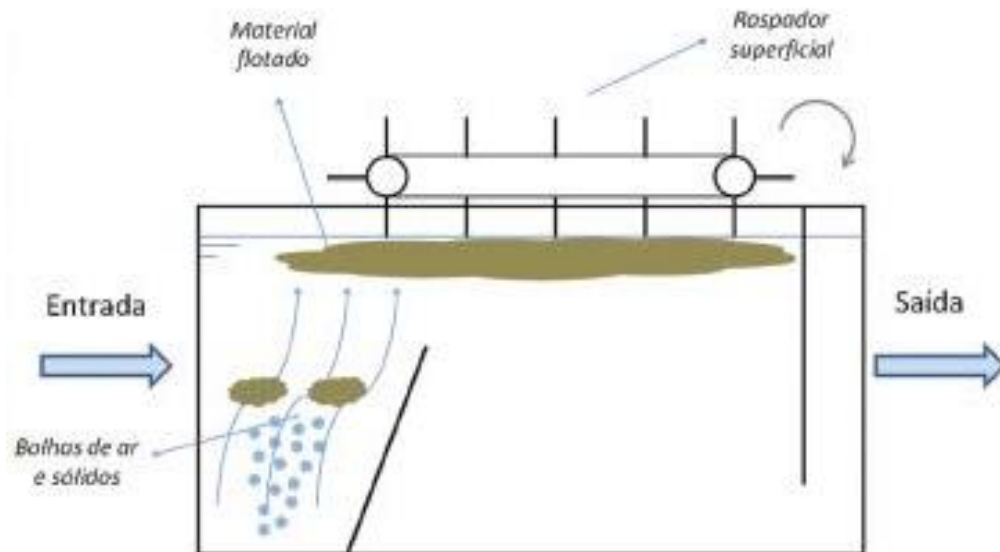
A Figura 1 demonstra como funciona sistema de tratamento de água em uma ETA, com processos comumente utilizados no Brasil. A Figura 2 apresenta uma etapa de tratamento físico para a separação dos flocos pouco utilizada no Brasil, porém é uma grande aliada na remoção de micro-organismos presentes na água, esse processo é conhecido como flotação por ar dissolvido.

Figura 1 - Fluxograma ETA – Tratamento convencional



Fonte: Sabesp (2023).

Figura 2 - Esquema de tanque de Flotação por ar dissolvido



Fonte: EQMA Engenharia e Consultoria (2023).

3.2 A GERAÇÃO DO LODO EM ETAS

De acordo com Saiani e Toneto Júnior (2010), Leoneti *et al.* (2011), as iniciativas no setor de saneamento do Brasil despontaram no início da década de 1970. As ETAs instaladas desde então eram projetadas com a preocupação de fornecer um produto final de excelência: água potável (Cordeiro, 2001) e, naquele momento, não se preocupavam com a constante geração de resíduos. Richter (2001)

cita que as etapas de separação e operações amplamente utilizadas para a purificação da água bruta resultam na produção significativa de um subproduto sólido, o LETA. Esses então, eram direcionados aos corpos hídricos próximos às ETAs.

O lodo gerado em ETAs tem sua origem nos processos de decantação e filtração. Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduo retidos no tratamento é proveniente da lavagem dos filtros e, em termos mássicos, a maior quantidade é gerada nos decantadores (Bernardo; Paz, 2008). O volume de resíduo produzido varia sazonal, mensalmente ou diariamente. (Bernardo; Paz, 2008; EPA, 2011; Ippolito; Barbarick; Elliott, 2011).

A preocupação com a destinação adequada do lodo de estações de tratamento de água não é um fenômeno recente, sendo observada desde a década de 1990. Um marco importante nesse contexto foi o trabalho realizado por Cordeiro (1993), que proporcionou uma significativa contribuição sobre o assunto. Essa pesquisa pioneira abordou de maneira abrangente o tema e evidenciou o potencial poluidor do lodo, destacando o aumento das concentrações de parâmetros prejudiciais à qualidade da água nos corpos hídricos receptores.

A quantificação do lodo gerado nas ETAs desempenha um papel crucial no entendimento da quantidade desse subproduto que ainda é descartada de forma inadequada e na formulação de estratégias para sua disposição final apropriada. Esse processo é essencial para garantir a gestão sustentável dos resíduos provenientes das ETAs e mitigar os impactos ambientais decorrentes de seu descarte inadequado. De acordo com Babatunde e Zhao (2007), Ahmad *et al.* (2016), a produção anual de lodo em uma ETA convencional pode atingir cerca de 100.000 toneladas, enquanto em escala mundial, a produção diária de LETA pode exceder 10.000 toneladas.

Em concordância com Achon *et al.* (2013), a maioria significativa das estações de tratamento de água no Brasil não realiza a devida quantificação dos resíduos gerados, bem como a análise de suas características e uma destinação apropriada, o que representa um desafio considerável e frequentemente impede a utilização de indicadores como instrumentos de gestão. O Quadro 1 sintetiza a realidade de produção do LETA em escala mundial, em toneladas por ano, demonstrando o quão importante é a caracterização e gerenciamento desse resíduo.

Quadro 1 - Produção de LETA em escala mundial nos últimos dez anos

País	População (hab.)	Quantidade de LETA (Ton/ano)	Autor
Estados Unidos	338,9 milhões	2.000.000	Liu <i>et al.</i> (2020).
Austrália	26,8 milhões	43.500	Liu <i>et al.</i> (2021).
Itália	60,6 milhões	750.000	Gomes <i>et al.</i> (2019)
Reino Unido	69,2 milhões	131.000	Finlay (2015).
Japão	126,1 milhões	290.000	Fujiwara (2011)
China	1,5 bilhões	1.484.000	Li <i>et al.</i> (2013)
Alemanha	83,8 milhões	123.136	Gomes <i>et al.</i> (2019)
Espanha	46,4 milhões	122.818	Zamora <i>et al.</i> (2008)
Portugal	10 milhões	66.319	Dassanayake <i>et al.</i> (2015)
França	66,2 milhões	66.395	Zamora <i>et al.</i> (2008)
Taiwan	24 milhões	119.264	Gomes <i>et al.</i> (2019)
República Tcheca	10,7 milhões	34.158	Dassanayake <i>et al.</i> (2015)
Holanda	17,3 milhões	34.885	Dassanayake <i>et al.</i> (2015)
Irlanda	4,9 milhões	18.823	Dassanayake <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Próprio Autor.

3.3 CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ETA

Cada ETA gera lodo com características diferentes. Essas características dependem do tratamento aplicado, das condições da água bruta (presença de sólidos orgânicos e inorgânicos, como, sílica, óxido de alumínio hidratado e óxido de ferro entre outros) (Miroslav, 2008), das dosagens de produtos químicos (sulfato de alumínio, cloreto férrico, policloreto de alumínio e, em alguns casos, polímeros condicionantes) (Roque *et al.*, 2021), pelas quantidades de íons, sólidos em suspensão e materiais coloidais removidos (O'Kelly, 2016) e da forma de limpeza dos decantadores, que influencia no tempo de retenção do lodo na estação e da eficiência de sedimentação (Andreoli *et al.*, 2001; Richter, 2001; Menezes, 2006). Nesse sentido, o Quadro 2 mostra as principais características e propriedades do LETA apresentadas nos trabalhos nacionais e internacionais, que visam o adequado gerenciamento desse resíduo.

Quadro 2 - Principais características e propriedades do LETA no Brasil e no mundo.

Localização	Tipo de ETA	Tipo de LETA	pH	Teor de Umidade (%)	Composição química majoritária	Composição mineralógica majoritária	Índice liquidez	Índice plasticidade	Ensaio de Solubilizado	Autores
Piracicaba/SP	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	7	79,42	Al, Fe	Quartzo	-	-		Bitencourt (2016)
Rio Claro/SP	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	6,78	-	-	-	-	-		Franco (2019)
Presidente Prudente/SP	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	-	-		Martins <i>et al.</i> (2022)
Igarassu/PE	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)		-	-	Quartzo, Caulinita	-	-		Agra <i>et al.</i> (2023)
Estado de São Paulo	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	70	Al, Fe, Si	Caulinita	-	-	Al= 6,11 mg/l Fe= 24,98 mg/l	Gheller (2021)
Estado do Paraná	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	70	Al, Fe, Si	Caulinita	-	-	Al= 5,97 mg/l Fe= 4,79 mg/l	Gheller (2021)
Goiás/GO	Convencional	Sedimentado (limpeza automatizada)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	56	40		Araujo <i>et al.</i> (2015)
Campos de Goytacazes/RJ	-	-	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	73	53		Oliveira; Holanda (2008)
Foz do Iguaçu/PR	Convencional	Sedimentado (limpeza automatizada)	-	74	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	-	-		Tartari <i>et al.</i> (2011)

Itaperuna/RJ	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	59,7	32,6	Al= 13,4 mg/l Fe= 14,3 mg/l	Margem (2008)
Maringá/PR	-	-	-	-	-	-	-	-	Al= 0.389 mg/l Fe= 1,32 mg/l	Silva <i>et al.</i> (2012)
Belo Oriente/MG	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	47	47		Wolff <i>et al.</i> (2015)
Mubai, Índia	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	7,29	70	Al, Fe, Si	-	-	-	-	Ghorpade; Ahammed (2018)
Hoceima/ Marrocos	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	7,52	-	Al, Fe, Si	-	-	-	-	Bensitel <i>et al.</i> (2023)
Barranquilla/ Colombia	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	-	-	-	Gonzalez <i>et al.</i> (2020)
Queensland/ Australia	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	-	-	-	Rozhkovskaya <i>et al.</i> (2021)
Shaanxi/ China	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo	-	-	-	Yang <i>et al.</i> (2023)
Zemamra/ Marrocos	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	Quartzo	-	-	-	Ballou <i>et al.</i> (2022)
Pequim/China	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	7,6	-	-	-	-	-		Zhou <i>et al.</i> (2014)
Rabat/ Marrocos	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	-	-	Al, Fe, Si	-	63,6	39,1		Benlalla <i>et al.</i> (2015)

Estado de São Paulo	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	6,6	92,12	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	-	-	Al< 0,2 mg/l Fe< 0,3mg/l	Boina <i>et al.</i> (2024)
CB Araçatuba/SP	Convencional	Sedimentado (limpeza manual)	5,83 a 6,91	89,63	Al, Fe, Si	Quartzo	55,72	41,35	Al= 0.315 mg/l Fe= 0,200 mg/l	Esse trabalho
CT Araçatuba/SP	Convencional com flotação	Flotado (limpeza manual)	5,45 a 6,20	91,85	Al, Fe, Si	Quartzo	71,93	67,35	Al= 2,500 mg/l Fe= 3,210 mg/l	Esse trabalho
CP S.J do Rio Preto/SP	Convencional	Sedimentado (limpeza automatizada)	6,00 a 6,53	86,86	Al, Fe, Si	Quartzo, Caulinita	-	49,77	Al= 0.200 mg/l Fe= 1,150 mg/l	Esse trabalho

Nota: (-): Dado não fornecido pelo autor.

Fonte: Próprio Autor.

Mendes *et al.* (2001) citam que o lodo é composto de argilas, siltes, areia fina, material húmico e microrganismos, como também de produtos provenientes do processo de coagulação. A distribuição do tamanho das partículas é inferior a 100mm (Pereira *et al.*, 2004). O lodo possui elevado teor de umidade (superior a 80% do volume) possuindo uma concentração de sólidos em suspensão entre 0,004 e 4,0%, valor que representa uma faixa de 0,2 a 5,0% do volume de água tratada (Andreoli 2001; Richter, 2001).

Devido à grande variação na composição do LETA, é fundamental a caracterização desse material, para compreender o comportamento e influência nas misturas com outros materiais ou diversos destinos de uso benéfico. Conforme Araújo *et al.* (2015), a caracterização dos resíduos evidencia que existe uma diversidade de propriedades analisadas, as quais interferem diretamente nas possibilidades de seu uso. De acordo com Amâncio *et al.* (2017), caracterizar esse resíduo é importante para propor alternativas corretas para seu destino ou disposição final, reduzindo o impacto causado pelo seu lançamento indevido nos cursos d'água. A importância da caracterização do lodo de estação de tratamento de água pode ser destacada em dois pontos essenciais, a valorização e reutilização.

Logo, há uma variação importante nas características físicas e químicas do lodo de ETA que, certamente, implicará em diferentes materiais com propriedades, funcionalidades e comportamento específicos (Gomes *et al.*, 2019) e que não serão constantes ao longo do tempo, nem de uma ETA para outra. A questão da variação das características do LETA quando a sazonalidade não é bem explorada pela comunidade científica, o que gera dificuldades para as aplicações práticas e funcionais dos produtos formados.

3.4 LEGISLAÇÃO

3.4.1 Âmbito Nacional – Esfera Federal e Estadual

No Brasil, na década de 1970, a potabilização de água bruta para consumo humano tornou-se um tema de preocupação devido ao elevado adensamento populacional urbano. A atenção com o resíduo gerado nos filtros e decantadores das estações de tratamento de água tornou-se foco apenas na década de 1980, com a promulgação das primeiras orientações de cunho legal no país.

A Lei Federal n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, em seu artigo 2º é citado os princípios adotados para a racionalização do uso do solo, subsolo, ar e água, bem como da preservação e restauração dos recursos naturais. O artigo 3º dessa Lei, enquadra as Companhias de saneamento como poluidores, caso infrinjam os incisos II e III, alíneas c, d, e, desse artigo.

II - degradação da qualidade ambiental, a alteração adversa das características do meio ambiente;

III - poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (Brasil, 1981).

A Lei Federal n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, conhecida como Lei dos Crimes Ambientais, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Na seção III do Capítulo V o artigo Art. 54. dispõe crime sobre “poluição”, o que inclui aquela que pode ser causada pela destinação incorreta do LETA, como exemplo, a disposição em corpos hídricos:

Causar poluição de qualquer natureza que resultem ou possam provocar danos à saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou a destruição significativa da fauna (Brasil, 1998).

A Lei Federal n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Federal n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. No Capítulo II, Art. 7º inciso II ressalta os princípios do adequado gerenciamento de diversos resíduos sólidos, prezando pela:

II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010)

Tais resíduos contemplam o LETA, resíduo sólido classe II (ABNT, 2004). Logo, o lodo não é um rejeito e, portanto, não deve ser disposto em aterro sanitário, como é comum observar nas ETAs que possuem algum tipo de sistema de desaguamento para este resíduo.

A Lei estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006, institui a Política de Resíduos Sólidos no Estado de São Paulo, No Capítulo I, Art 2º inciso VI define princípios para o adequado gerenciamento de diversos resíduos sólidos, prezando pela:

VI - minimização dos resíduos por meio de incentivos às práticas ambientalmente adequadas de reutilização, reciclagem, redução e recuperação (São Paulo, 2006).

Entre outras providencias, em 2014, o Estado de São Paulo publicou o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, uma iniciativa que tem por finalidade fornecer diretrizes e orientações para o adequado planejamento e gestão dos resíduos sólidos em diversas esferas governamentais. O principal objetivo desse plano é promover a implementação de ações integradas e sustentáveis para o correto gerenciamento dos resíduos sólidos em todo o estado, levando em consideração os aspectos ambientais, sociais e econômicos envolvidos. Com essa estratégia, busca-se atingir um sistema mais eficiente e responsável, que garanta o bem-estar da população e a preservação do meio ambiente. Em 2020 houve a revisão do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, contemplando temas atuais e as diretrizes pautadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU).

3.4.2 Âmbito Internacional

Na esfera internacional, grande parte dos países desenvolvidos implantaram um sistema de gestão ambiental, de caráter preventivo baseados em políticas, programas e projetos de desenvolvimento sustentável quanto ao gerenciamento de resíduos.

Nos Estados Unidos da América (EUA), o lodo de ETA é considerado resíduo industrial de acordo com a emenda da *“National Pollutant Discharge Act”* de 1972, e torna crime ambiental o descarte e manejo incorreto desses resíduos. Segundo Cordeiro (1993), a partir de 1970, passou a ser proibido o lançamento de qualquer tipo de resíduo nos Estados Unidos, inclusive lodo de ETAs, nas águas superficiais sem a autorização das autoridades responsáveis.

AWWA (2011) e Gervasoni (2014) mostram que os resíduos sólidos gerados nas ETAs dos EUA 51% são dispostos em aterros sanitários, 35% são efetuados o

reuso, tais como aplicação superficial no solo e recuperação de área degradada, 8% disposto em ETEs juntamente com o efluente de entrada e 6% são colocados em pedreiras desativadas.

Conforme Juras (2005), a Alemanha tem sido pioneira na implementação de medidas para lidar com a questão dos resíduos sólidos. Inicialmente, adotava-se uma política de coleta e disposição de resíduos, mas a abordagem mudou para a prevenção e valorização antes da eliminação. Essa nova política foi estabelecida pela Lei de Minimização e Eliminação de Resíduos, de 1986. Em 1994, a Lei de Economia de Ciclo Integral e Gestão de Resíduos substituiu a norma anterior, ampliando a responsabilidade do fabricante ao longo do ciclo de vida do produto. De acordo com a legislação alemã, a prioridade é evitar a geração de resíduos, no caso dos resíduos inevitáveis devem ser valorizados através da reciclagem ou outros fins, enquanto os resíduos não valorizáveis devem ser eliminados de forma ambientalmente compatível.

Esse modelo de gestão de resíduos sólidos não se limita apenas à Alemanha. Muitos países europeus também adotam normas rigorosas em relação aos resíduos sólidos (Juras, 2005). A União Europeia, nos últimos anos, emitiu diversas diretrizes sobre resíduos sólidos, incluindo a Diretiva 75/442/CEE. Ela foi adotada em 15 de julho de 1975 e estabeleceu as bases para a legislação sobre resíduos em toda a UE, é importante ressaltar que a Diretiva 75/442/CEE foi revogada e substituída por outras legislações mais atualizadas, como a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, conhecida como Diretiva-Quadro de Resíduos (UE, 2008).

4 AS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM ESTUDO

Para a consecução do objetivo desta pesquisa foram escolhidas três ETAs localizadas na região Noroeste do interior do estado de São Paulo. As ETAs denominadas CT (Rio Tietê) e CB (Rio Baguaçu) estão situadas no município de Araçatuba/SP, enquanto a ETA CP (Rio Preto) está localizada no município de São José do Rio Preto/SP. A escolha das três ETAs foi pelo fato dessas apresentarem características distintas, desde a composição do solo até os processos empregados no tratamento de água e na limpeza dos tanques, onde o LETA é armazenado. O Quadro 3 sintetiza todas as informações necessárias sobre as características locais e de tratamento de água de cada ETA abordada no estudo.

As Figuras 3 a 5 apresentam a localização dos Municípios do Estado de São Paulo onde as ETAs do estudo estão instaladas e seus respectivos pontos de captação. Os pontos de captação de água bruta das ETAs CB (Figura 3) e CP (Figura 5) ficam próximos da ETA, já a captação da ETA CT (Figura 4) fica a uma distância média de 15 km. Todos os sistemas contam com bombas de sucção para retirada da água do corpo hídrico encaminhando para a entrada do sistema de tratamento.

Figura 3 - Localização da ETA CB e ponto de captação de água bruta no rio Baguaçu



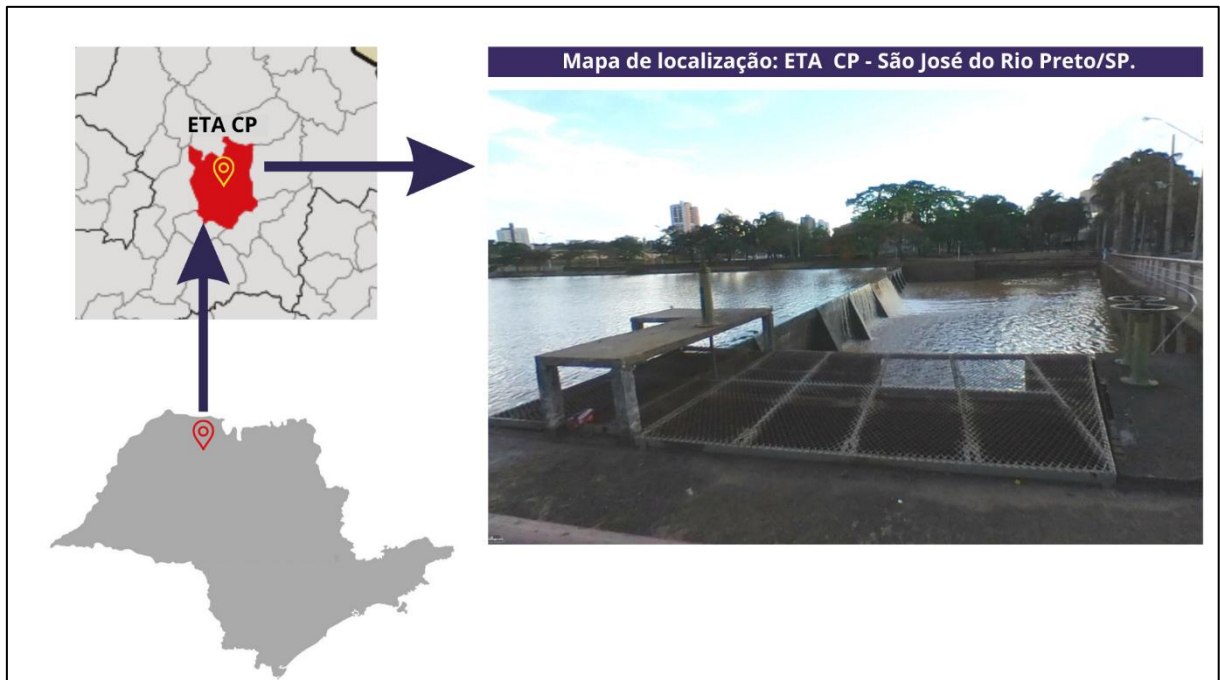
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4 - Localização da ETA CT e ponto de captação de água bruta no Rio Tietê



Fonte: Próprio Autor.

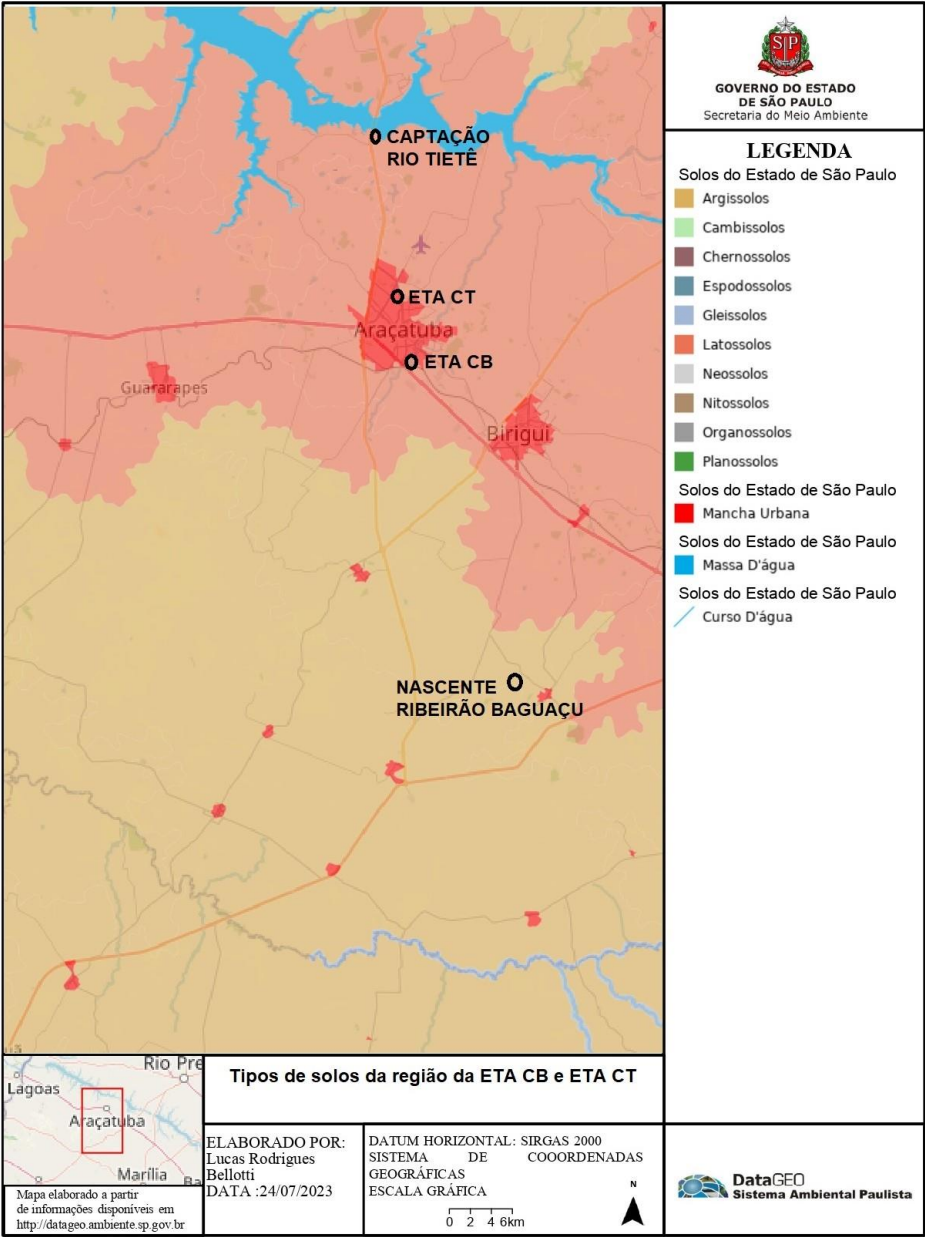
Figura 5 - Localização da ETA CP e ponto de captação de água bruta no rio Rio Preto



Fonte: Próprio Autor.

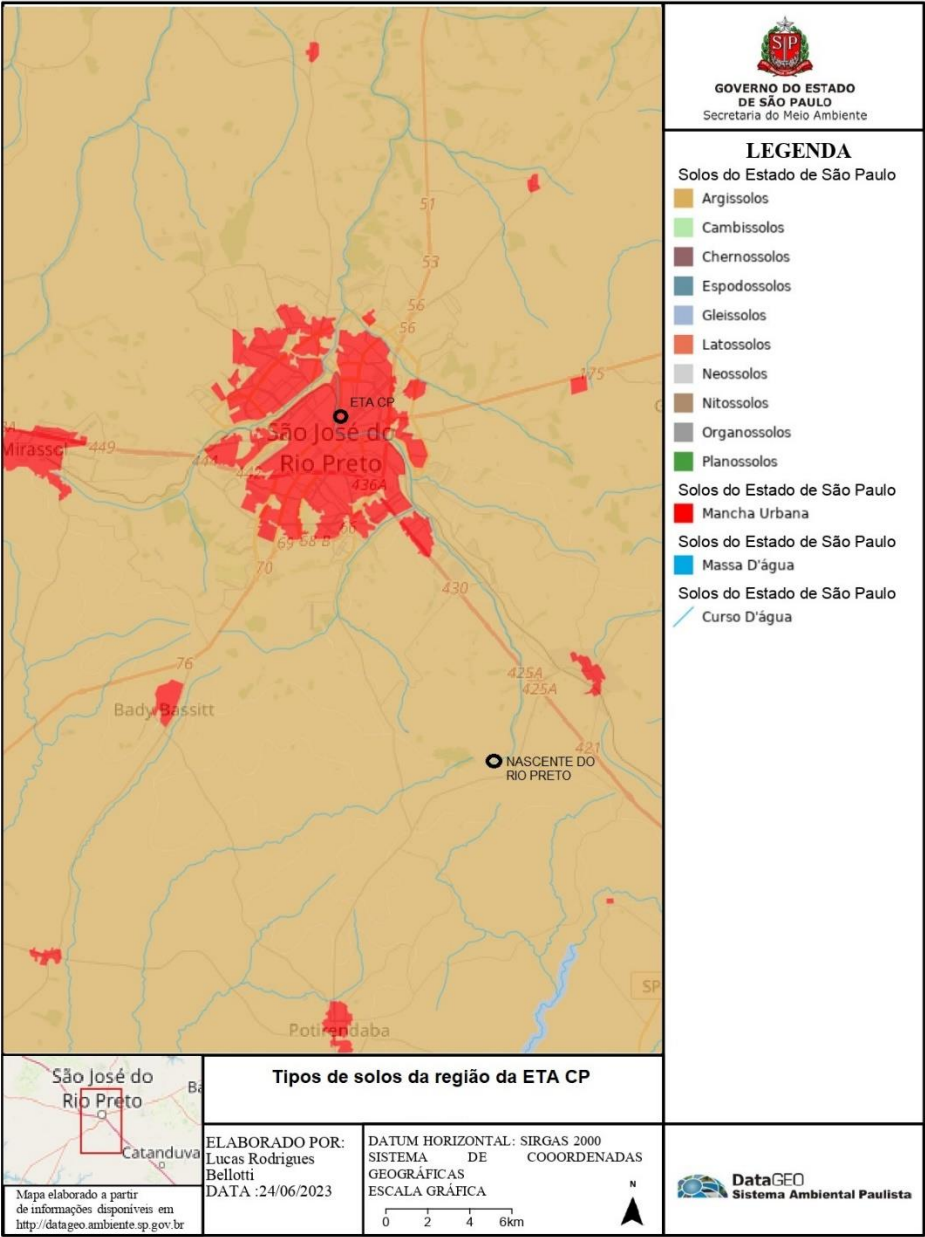
A Figura 6 mostra a classificação do solo, na região de captação de água bruta da ETA CB. O solo apresenta características de Latossolo, porém a nascente do Ribeirão Baguaçu está situada em região com predominância de Argissolos. A captação de água bruta da ETA CT ocorre em uma região caracterizada por um solo do tipo Latossolo (Figura 6). A ETA CP está situada em uma região com predominância significativa de solo do tipo Argissolo (Figura 7). A área de influência abrange desde a nascente do Rio Preto até o ponto de captação de água bruta.

Figura 6 - Tipos de solos da região da ETA CB e ETA CT



Fonte: Datageo (2023).

Figura 7 - Tipos de solos da região da ETA CP



Fonte: Datageo (2023).

Quadro 3 - Caracterização das ETAs em estudo: CP (Rio Preto), CT (Rio Tietê), CB (Rio Baguaçu)

CARACTERÍSTICAS	ETA		
	CP	CB	CT
Localização geográfica	São José do Rio Preto - SP.	Araçatuba - SP	Araçatuba - SP
Tipo de solo	Argissolo	Argissolo e Latossolo	Latossolo
Corpo hídrico de captação	Rio Preto	Rio Baguaçu	Rio Tietê
Enquadramento do corpo hídrico	Classe 3	Classe 2	Classe 2
Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos	UGRHI15 – Turvo Grande	UGRHI19 – Baixo Tietê.	UGRHI19 – Baixo Tietê.
Capacidade de captação e tratamento	25.920 m³/d	9.300 m³/d	16.700 m³/d
Produtos químicos empregados no pré-tratamento	Hipoclorito de sódio, Dióxido de Cloro, Carvão ativado pulverizado (CAP), hidróxido de cálcio, Cal hidratada, Cloreto férrico,	Policloreto de alumínio (PAC)	Policloreto de alumínio (PAC)
Produtos químicos empregados no pós-tratamento (desinfecção)	Ortopolifosfato de Sódio, Ácido Fluossilícico, Hipoclorito de sódio e hidróxido de cálcio	Hipoclorito de Sódio e flúor	Hipoclorito de Sódio e flúor
Tratamento empregado	Tratamento convencional (Coagulação / Floculação / decantação / filtração / desinfecção)	Tratamento convencional (Coagulação / Floculação / decantação / filtração / desinfecção)	Tratamento Flotofiltração (Coagulação / Floculação / Flotação por ar dissolvido / filtração / desinfecção)
Método de limpeza	Retrolavagem automática dos decantadores, com descarte do lodo através de acionamento também automatizado de registros no fundo dos decantadores.	Limpeza manual	Limpeza manual
Disposição final do lodo	Rede de esgoto municipal	Rede de esgoto municipal	Rede de esgoto municipal
Periodicidade de limpeza	6 horas	15 dias	6 horas

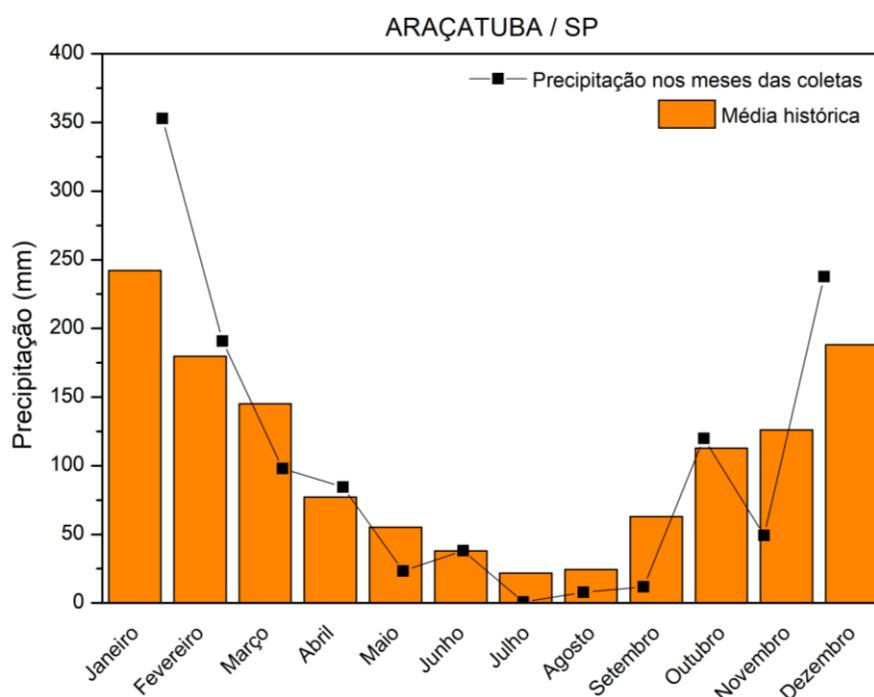
Fonte: Adaptado de Datageo e SigRH (2024).

4.1 SAZONALIDADE NAS ÁREAS DE ESTUDO

A compreensão dos padrões sazonais desempenha um papel crucial nas diversas áreas do conhecimento, desde a ecologia até a gestão de recursos hídricos. A sazonalidade, caracterizada por variações periódicas em fenômenos naturais ao longo do ano, é uma força motriz que molda ecossistemas e influencia as atividades humanas (Alvares *et al.*, 2009). No âmbito ambiental, o entendimento da sazonalidade é essencial para a conservação da biodiversidade e a gestão sustentável de ecossistemas. As mudanças climáticas, que têm impacto direto nos padrões sazonais, tornam ainda mais crucial a compreensão desse fenômeno, (Altizer *et al.*, 2013).

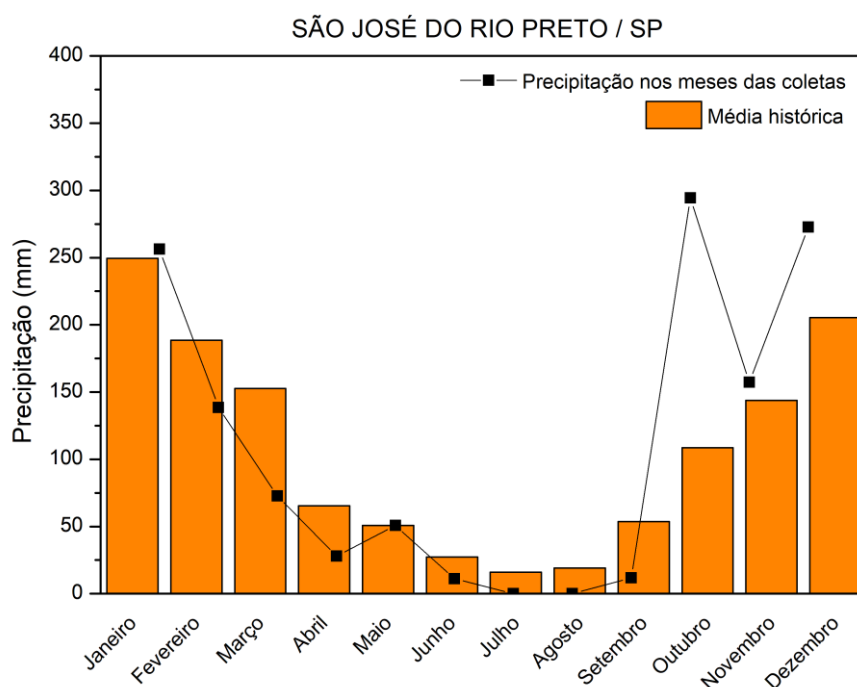
A fim de identificar a sazonalidade pluviométrica das regiões do estudo, foram adquiridos dados por meio do site do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) (DAEE, 2023). Onde a estação pluviométrica localizada no município de Araçatuba (Figura 8) é identificada pelo prefixo C7-003, enquanto a estação pluviométrica em São José do Rio Preto (Figura 9) é designada pelo prefixo B6-020.

Figura 8 - Valores de precipitação média histórica (mm) e precipitação nos meses de coleta de LETA (mm), da região das ETAS CB, CT em Araçatuba/SP.



Fonte: Adaptado de DAAE (2024).

Figura 9 - Valores de precipitação média histórica (mm) e precipitação nos meses de coleta de LETA (mm), da região das ETA CP em São José do Rio Preto/SP.



Fonte: Adaptado de DAAE (2024).

A análise da sazonalidade meteorológica revela uma distinta variação ao longo do ano, destacando-se dois períodos contrastantes. O intervalo compreendido entre outubro e março é caracterizado pela predominância de chuvas, configurando-se como a estação chuvosa. Este período exibe uma maior incidência de precipitações, fenômeno associado a influências climáticas específicas que prevalecem durante essa fase. Em contraste, os meses situados entre abril e setembro constituem a estação seca, caracterizada pela escassez significativa de chuvas e condições atmosféricas mais estáveis. Essa alternância sazonal entre períodos chuvosos e secos é essencial para compreender e contextualizar as dinâmicas climáticas das regiões em questão, influenciando diretamente em diversos aspectos, desde os recursos hídricos até os ecossistemas locais e atividades socioeconômicas.

Portanto, para análise de sazonalidade desse trabalho, foi considerado os meses de Abril a Setembro como meses secos (S) e de Outubro a Março como meses chuvosos (C).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 COLETA DE AMOSTRAS DE LODO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ESTUDO

As amostras de lodo foram obtidas de três ETAs, localizadas no interior paulista, conforme apresentado no item 4 “As estações de tratamento de água em estudo”. A coleta foi realizada mensalmente (Quadro 4) durante os meses de junho de 2021 a maio de 2022, no período da manhã, quando ocorre o descarte do LETA dos tanques.

Quadro 4 - Coletas mensais de lodo de Estação de Tratamento de Água. CP: Rio Preto; CT: Rio Tietê; CB: Rio Baguaçu

Coleta	Data de coleta nas ETAs			
	CP	CB	CT	Período
1	17/06/2021	28/06/2021	28/06/2021	Manhã
2	19/07/2021	02/08/2021	02/08/2021	Manhã
3	21/08/2021	13/09/2021	13/09/2021	Manhã
4	25/09/2021	04/10/2021	04/10/2021	Manhã
5	24/10/2021	25/10/2021	25/10/2021	Manhã
6	27/11/2021	06/12/2021	06/12/2021	Manhã
7	18/12/2021	20/12/2021	20/12/2021	Manhã
8	30/01/2022	27/01/2022	27/01/2022	Manhã
9	01/03/2022	05/03/2022	05/03/2022	Manhã
10	10/04/2022	06/04/2022	06/04/2022	Manhã
11	07/05/2022	11/05/2022	11/05/2022	Manhã
12	12/06/2022	20/06/2022	20/06/2022	Manhã

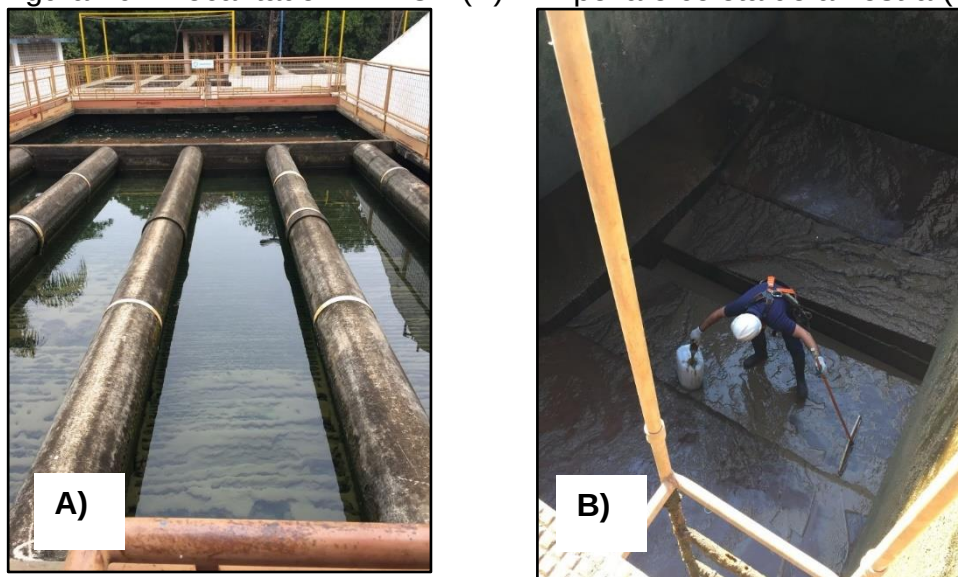
Fonte: Próprio Autor.

O procedimento foi realizado no momento de limpeza dos decantadores das ETAs CB e CP e do flotador da ETA CT. As Figuras 10 a 15 ilustram os decantadores das ETAs CB (Figura 10), CP (Figura 11), o flotador da ETA CT (Figura 12) e seus respectivos métodos de limpeza e coleta das amostras.

A limpeza do decantador da ETA CB (Figura 10-B) é realizada de maneira convencional (manual), em intervalos aproximados de 15 dias. Durante o processo, o tanque é esvaziado e o LETA decantado é removido por meio de jato de água de alta pressão utilizando uma mangueira.

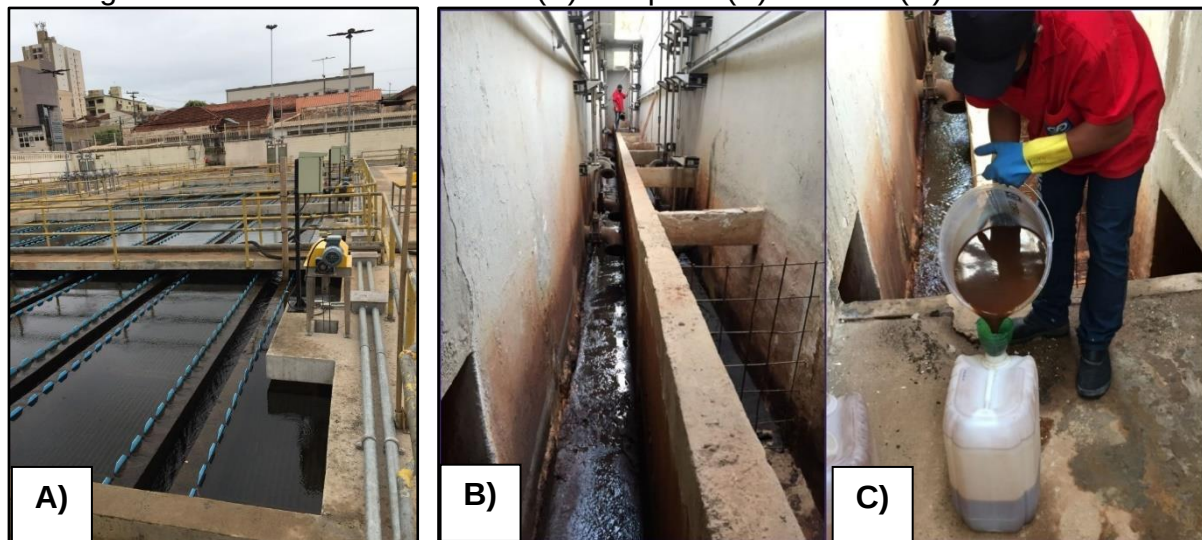
A remoção do LETA no decantador da ETA CP (Figura 11-A) é realizada de forma automatizada, utilizando um sistema controlado por painel. Esse sistema aciona a abertura dos registros localizados no fundo dos tanques, permitindo que um raspador direcione o lodo de ETA para um canal de drenagem (Figura 11-B). O lodo de ETA, então, é conduzido pelo canal e desagua na rede coletora de esgoto, a limpeza ocorre a cada 6 horas. Foi realizada a coleta do LETA e em seguida armazenado na bombona de 20 litros (Figura 11-C).

Figura 10 - Decantador ETA CB (A). Limpeza e coleta de amostra (B).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 11 - Decantador ETA CP (A). Limpeza (B) e coleta (C) de amostra.



Fonte: Próprio Autor.

O LETA da ETA CT é removido por meio do processo de flotação por ar dissolvido (Figura 12). Esse sistema utiliza microbolhas geradas na câmara de saturação, as quais se incorporam no interior dos flocos presentes no lodo, promovendo sua suspensão até a superfície do tanque. Nesse ponto, o lodo de ETA é removido da superfície do tanque através de raspadores, direcionando o LETA para um tanque de acúmulo e posteriormente para rede de coletora de esgoto.

Figura 12 - Flotofiltro (A) e coleta de amostra (B) na ETA CT



Fonte: Próprio Autor.

Após a coleta, o material foi armazenado e transportado em bombonas de polietileno de 20L (Figura 13-A), garantindo a preservação das características do lodo. Além disso, foram realizadas coletas adicionais em embalagens de 1L, com o objetivo de manter a amostra do lodo *in natura*, a fim de realizar análises laboratoriais de caracterização (Figura 13-B).

Figura 13 - Armazenamento de amostra LETA em bombonas de polietileno de 20 litros (A) e em embalagens de 1 litro (B)



Fonte: Próprio Autor.

5.2 PREPARO DAS AMOSTRAS PARA A CARACTERIZAÇÃO

Parte do material coletado passou por desaguamento em leito de drenagem gravitacional simples, composto por manta geotêxtil (105 g/m², Bidim) e mantido à sombra, (Figura 14). Após 96 h o LETA foi retirado do leito de drenagem (Figura 15) e armazenado em potes plásticos de 2L, para as análises de caracterização.

Figura 14 - Desaguamento de LETA das ETAs CB, CT e CP



Fonte: Próprio Autor.

Figura 15 - LETA desaguado das ETAs CB, CT e CP



Fonte: Próprio Autor.

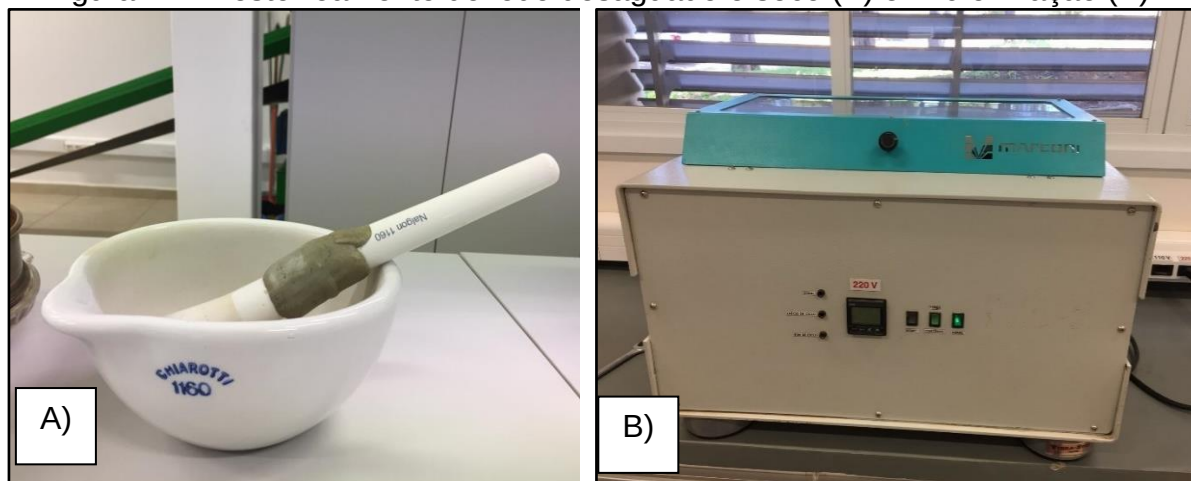
As amostras de LETA desaguado (Figura 16-A) tiveram a umidade residual retirada (Figura 16-B) em estufa Lucadema (100°C) por 24 horas, passando por destorroamento com almofariz e pistilo (Figura 17-A), moagem em moinho de disco e câmara em cerâmica (Figura 17-B), com movimento orbital Marconi– modelo MA360, e posterior peneiramento com granulometria fina ($< 0,355$ mm),(Figura 18-A), resultando em pó ($<0,355$ mm), conforme Figura 18-B.

Figura 16 - Amostras de LETA desaguadas (A) e seca (100°C) (B).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 17 - Destorroamento do lodo desaguado e seco (A) e micronização (B)



Fonte: Próprio Autor

Figura 18 - Peneiramento da amostra de lodo desaguada e seca (A) resultando em pó (B) de textura fina ($< 0,355$ mm).



Fonte: Próprio Autor.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA

As análises de caracterização foram realizadas nas dependências Laboratório de Águas, Águas Residuais e Reuso (LAARR), do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP Campus de Presidente Prudente/SP e no Laboratório Multiusuário de Apoio à Pesquisa (LAMAP) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus de Apucarana/PR.

Visando caracterizar o lodo de três estações de tratamento de água do interior do estado de São Paulo, esse trabalho buscou abordar parâmetros necessários para

caracterização, assim como métodos reconhecidos, conforme apresentado no Quadro 5. O detalhamento e relevância de cada parâmetro encontram-se apresentados na estrutura subsequente ao presente tópico.

Quadro 5 - Descrição dos métodos e referências empregadas para caracterização do lodo de estação de tratamento de água.

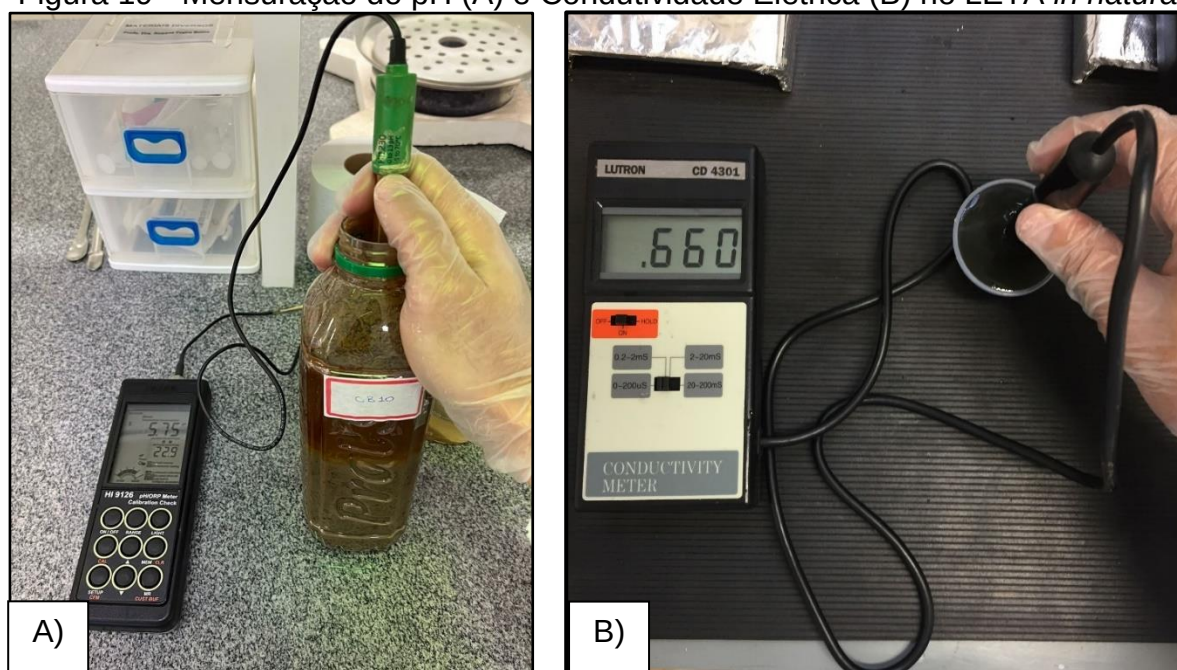
Parâmetro	Forma da Amostra	Unidade	Método	Equipamento/Modelo	Normativa
pH	<i>In natura</i>	-	Potenciométrico	Medidor – Hanna (HI 9126)	-
Condutividade elétrica	<i>In natura</i>	μS/cm	Potenciométrico	Medidor - Lutron (CD-4301)	-
Teor de umidade/teor de sólidos/sólidos fixo/ sólidos voláteis	Desaguada	%	Gravimétrico	Balança - (Adventurer Ohaus)/ Estufa - (Lucadema)/ Mufla - (EDG 3000 3p-s)	NBR 10664/89
Frações granulométricas (areia, silte e argila)	Pulverizada (<0,355mm)	-	Dispersão Total	Pipeta	Camargo <i>et al.</i> , 2009
Sólidos sedimentáveis	<i>In natura</i>	mL/L	Decantação	Cone de Imhoff (1000mL)	NBR 10561/88
Estrutura cristalina	Pulverizada (<0,355mm)	-	Difração de Raio X	Equipamento Shimadzu (XRD 6100)	-
Comportamento térmico	Pulverizada (<355mm)	%	Análise Termogravimétrica	Equipamento TA instruments (SDT Q600)	-
Limite de liquidez	Pulverizada (<355mm)	%	Método de golpeamento	Equipamento Casa Grande	NBR 6459/16
Limite de plasticidade	Pulverizada (<355mm)	%	Método de cisalhamento	-	NBR 7180/16
Composição química elementar	Pulverizada (<0,355mm)	%	Fluorescência de Raio X	Equipamento Shimadzu (XRD 6100)	-
Ensaio de solubilizado	Pulverizada (<0,355mm)	mg/L	Extrato solubilizado	Espectrômetro de absorção atômica Perkin Elmer (Aanalyst 200)	NBR 10006/04

Fonte: Próprio Autor.

5.3.1 pH e condutividade elétrica

No lodo *in natura* foram determinadas as medidas de pH, em medidor Hanna (HI 9126) (Figura 19-A), e a Condutividade elétrica (CE) ($\mu\text{S}/\text{cm}$) foi determinada em medidor Lutron (CD-4301) (Figura 19-B). Por compreender um período de restrição de acesso aos laboratórios, as medidas foram realizadas aproximadamente 3 meses após a coleta.

Figura 19 - Mensuração do pH (A) e Condutividade Elétrica (B) no LETA *in natura*



Fonte: Próprio Autor.

5.3.2 Teor de sólidos e Teor de umidade

Para a determinação do teor de sólidos e umidade, as cápsulas de porcelana foram devidamente preparadas. Primeiramente, as cápsulas foram lavadas com água deionizada e secas. Em seguida, as cápsulas foram colocadas em um forno tipo mufla modelo EDG 3000 3p-s (Figura 20-A) e aquecidas a uma temperatura de 500°C por 1h. Após o processo de aquecimento, foi aguardado o resfriamento das cápsulas na bancada até atingirem a temperatura ambiente.

Porções homogêneas de 25g da amostra do LETA desaguado foram separadas em cápsulas de porcelana previamente taradas. Em seguida, as cápsulas contendo as amostras (Figura 20-B) foram pesadas utilizando uma balança Adventurer Ohaus

e colocadas em uma estufa Lucadema a uma temperatura de 100°C por um período de 24 h.

Após a conclusão dos procedimentos, as cápsulas foram resfriadas na bancada (Figura 20-C) e pesadas novamente, obtendo-se os valores necessários para a determinação dos teores de sólidos e umidade presentes no LETA. Esses procedimentos seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 10664/1989 – Método J, Método L e Método M (ABNT, 1989).

O teor de sólidos, também denominado resíduo total (método J) foi obtido pela equação 1. A partir do percentual do resíduo total pode-se determinar o percentual de umidade presente na amostra, como apresentado na equação 2:

$$RT (\%) = \frac{M_A}{M_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$UA (\%) = 100 - RT \quad (2)$$

Em que:

RT = resíduo total ou teor de sólidos (%)

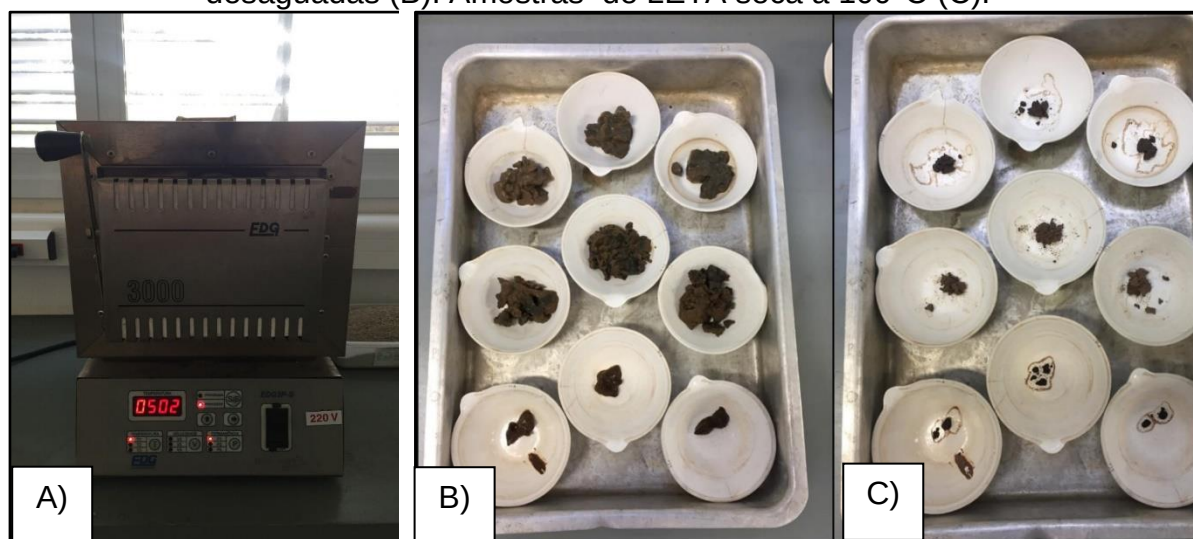
UA = umidade da amostra ou teor de umidade (%)

M_A = massa do resíduo total, em g

M₀ = massa da amostra, em g

As análises foram conduzidas em triplicatas.

Figura 20 - Forno tipo mufla modelo EDG 3000 3p-s (A). Amostras de LETA desaguadas (B). Amostras de LETA seca a 100°C (C).



Fonte: Próprio Autor.

5.3.3 Sólidos totais fixos e Sólidos totais voláteis

Após a determinação de teor de sólidos e umidade (Método J) as amostras foram submetidas a calcinação à 500°C por uma hora em forno tipo mufla modelo EDG 3000 3p-s. Após a conclusão dos procedimentos, as cápsulas foram resfriadas e pesadas novamente em balança Adventurer Ohaus. O material restante representou o resíduo fixo, determinado pelo Método L (Equação 3), o resíduo volátil foi determinado pelo método M (Equação 4).

$$RF (\%) = \frac{M_B}{M_A} \cdot 100 \quad (3)$$

$$RV (\%) = \frac{M_A - M_B}{M_A} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que:

RF = resíduo fixo (%)

RV = resíduo volátil (%)

M_B = massa do resíduo fixo, em g

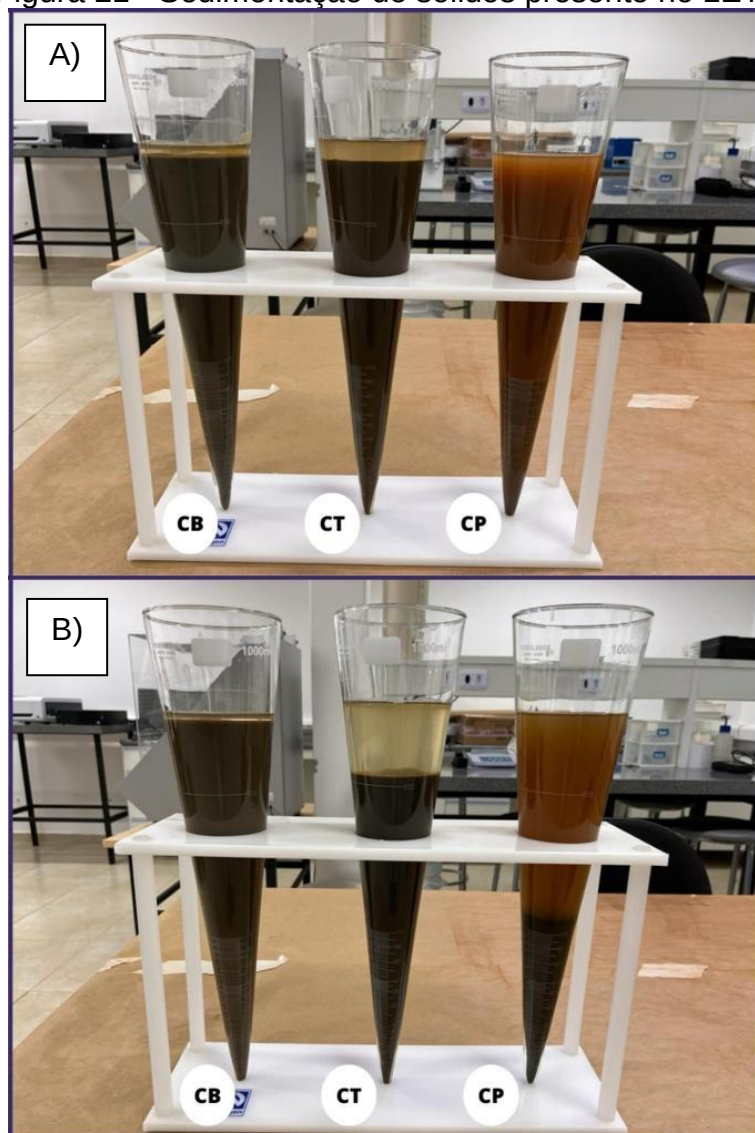
M_A = massa do resíduo total, em g

As análises foram conduzidas em triplicatas

5.3.4 Sólidos sedimentáveis

Com amostras coletadas mensalmente por 12 meses do LETA *in natura*, foi determinado sólidos sedimentáveis (mL) em vidraria tipo cone de Imhoff com capacidade de 1000mL. A Figura 21-A apresenta o início do ensaio, a Figura 21-B mostra o resultado após 1 h de sedimentação dos sólidos presentes do LETA. O ensaio foi realizado conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 10561/1988 (ABNT, 1988).

Figura 21 - Sedimentação de sólidos presente no LETA



Fonte: Próprio Autor.

5.3.5 Frações granulométricas

Com o LETA e destorroado e peneirado, as frações granulométricas (areia, silte e argila) foram obtidas pelo Método da Pipeta - Dispersão Total (Camargo *et al.*, 2009).

Para a obtenção da fração Areia foram transferidos 10g de amostra de LETA e 50 ml de solução dispersante em uma garrafa Stohmann, após o processo, as garrafas foram devidamente tampadas e submetidas a agitação por um período de 16h. Após agitação, a solução foi transferida para um *becker* de 400ml, passando por peneira de 0,053 mm, o material retido na peneira foi transferido para outro *becker* e em seguida

foi submetido a secagem a 110°C por aproximadamente 8h. O material retido na peneira de 0,053 mm é a massa da fração areia total (M_{areia}).

A areia total foi fracionada em 5 frações (areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina).

Para determinação das 5 frações da areia o procedimento foi transferir a areia total seca para um conjunto de peneiras com fundo, montadas na ordem crescente do tamanho de abertura das malhas das peneiras: fundo, 0,106, 0,210, 0,50 e 1,00 mm.

Para a obtenção da fração silte e argila, amostras de 40g de LETA foram adicionados em uma proveta, após foi completado o volume da proveta com água, ocorreu agitação por trinta segundos com um bastão contendo na extremidade inferior um êmbolo de borracha com diâmetro um pouco menor que o do cilindro, com movimento da boca para o fundo e vice-versa.

Após agitação, permitiu-se o tempo necessário para a sedimentação das frações de argila+silte e argila, seguindo os princípios da lei de Stokes. Posteriormente, introduziu-se uma pipeta de 10 ml a uma profundidade de 10 cm para a coleta da amostra de argila+silte, e de 5 cm para a amostra de argila, mantendo uma sucção contínua para evitar a formação de turbulências. As alíquotas obtidas foram transferidas para cápsulas de porcelana, que foram previamente taradas e submetidas à secagem a 110°C por aproximadamente 8h. O procedimento descrito foi repetido para a prova em branco, que continha a solução dispersante e água destilada. As cápsulas foram então retiradas da estufa e resfriadas em um dessecador contendo cloreto de cálcio anidro, em seguida foram pesadas para obter a massa da suspensão argila + silte + dispersante ($M_{\text{ARG+SILT+D}}$), argila + dispersante ($M_{\text{ARG+D}}$) e dispersante (M_D).

Os resultados são expressos em fração da terra fina seca ao ar, em g kg⁻¹, e estão representados nas equações (5 a 9).

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (5)$$

Em que:

U = Umidade da amostra (%)

M_u = Amostra úmida, em g

M_s = Amostra seca, em g

$$Fc = \frac{Ms}{Mu} \quad (6)$$

Em que:

Fc= Fator de correção da umidade

Mu = Amostra úmida, em g

Ms = Amostra seca, em g

$$ARG = \frac{M_{ARG+SILT+D}-MD}{M_{TFSA} \cdot \frac{Valiq}{Vprov}} \cdot FC - ARG \quad (7)$$

Em que:

ARG = Fração argila, g kg⁻¹

MARG+D = massa de 10 mL da suspensão de argila + dispersante, g

MD = massa de 10 mL da suspensão com dispersante, g

MTFSA = massa inicial de terra fina seca ao ar (10g)

Valiq = volume da alíquota da suspensão (10 mL)

Vprov = volume da proveta utilizada (500 mL)

Fc = fator de correção da umidade

$$SILTE = \frac{M_{ARG+D}-MD}{M_{TFSA} \cdot \frac{Valiq}{Vprov}} \cdot FC - ARG \quad (8)$$

Em que:

SILTE = Fração silte, g kg⁻¹

MARG+SILT+D = massa de 10 mL da suspensão de argila + silte + dispersante, g

MD = massa de 10 mL da suspensão com dispersante, g

MTFSA = massa inicial de terra fina seca ao ar (10g)

Valiq = volume da alíquota da suspensão (10 mL)

Vprov = volume da proveta utilizada (500 mL)

Fc = fator de correção da umidade

$$AREIA = \frac{M_{AREIA}}{M_{TFSA}} \cdot FC \quad (9)$$

Em que:

AREIA = Fração areia, g kg⁻¹

Mareia = massa de areia seca em estufa, g

Fc = fator de correção da umidade

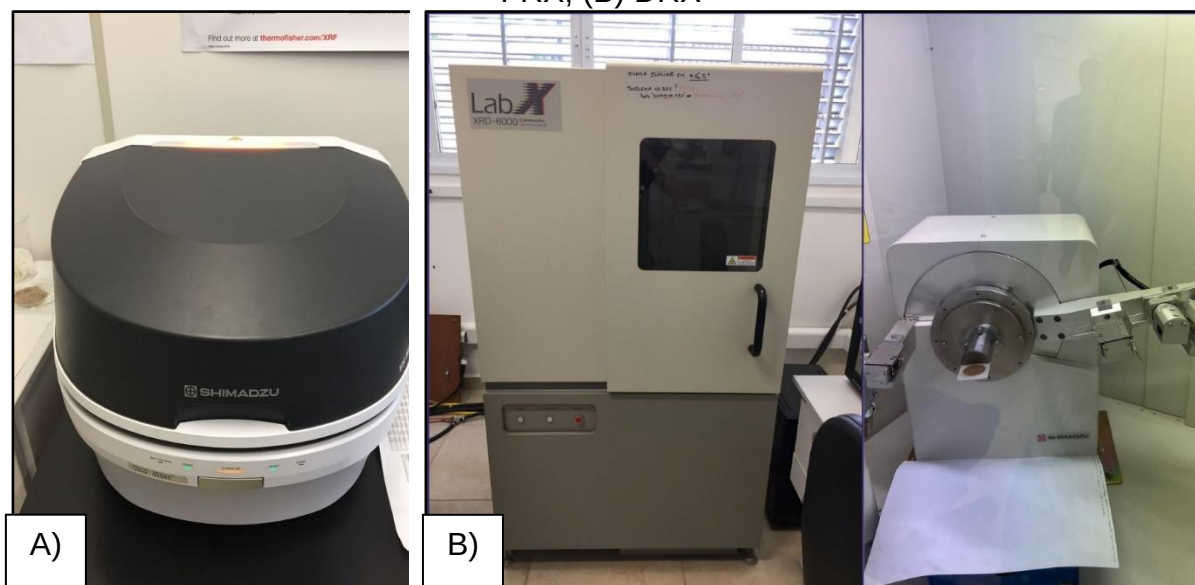
5.3.6 Composição química elementar

A composição elementar do lodo foi determinada por Fluorescência de Raio X em Espectrômetro Shimadzu modelo XRF-700 (Figura 22-A).

A análise foi conduzida em um recipiente de vácuo para assegurar a investigação precisa da composição dos óxidos, incluindo elementos mais leves. Utilizou-se uma fonte primária de radiação composta por um cátodo de Ródio (Rh) posicionado em um colimador de diâmetro de 5mm.

A amostra foi acomodada em uma cápsula de material polimérico, fixada por um *myler* na parte inferior. Para assegurar a análise em vácuo, mesmo com a amostra em pó, outro *myler* foi colocado na parte superior.

Figura 22 - Equipamento para análise de composição química e mineralógica: (A) FRX; (B) DRX



Fonte: Próprio Autor.

5.3.7 Estrutura Cristalina

As análises mineralógicas foram feitas com amostra em pó, disposta em porta amostras de alumínio e acopladas (Figura 22-B) em equipamento de Difração de Raio X Shimadzu (XRD 6100), com fonte de radiação Cu-Ka-2~1,54Å (radiação

característica), tensão de 40 kV e corrente de 30mA em varredura angular de 10° a 90° (2 θ) sob uma taxa de 2°/minuto.

As fases presentes nos picos identificados foram determinadas utilizando o software *Crystallographica Search-Match*, versão 2.1. Esse método consistiu em realizar uma comparação direta entre os difratogramas obtidos e as fichas contidas no banco de dados cristalográficos JCPDS-ICDD (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards - International Center for Diffraction Data*).

5.3.8 Comportamento térmico

A análise do comportamento térmico foi realizada em equipamento de Análise Térmica TA instruments-waters modelo SDT Q600 (Figura 23) com rampa de aquecimento de 10°C/min até 800°C, sob vazão de ar sintético de 100 ml/minuto. Os parâmetros foram ajustados no software do equipamento.

Figura 23 - Equipamento de Termogravimetria



Fonte: Próprio Autor.

5.3.9 Limite de liquidez

O ensaio de limite de liquidez foi realizado de acordo com a norma NBR 6459/2016 (ABNT, 2016). A amostra de LETA seca e peneirada foi preparada de acordo com os procedimentos descritos na norma. Inicialmente, uma porção de aproximadamente 200g de LETA seco e peneirado com granulometria $< 0,355$ mm, foi acomodada em uma placa de vidro jateada, onde foi adicionado aproximadamente 10 ml de água destilada e misturado com espátulas até obter uma consistência homogênea. Em seguida, a amostra foi colocada na cápsula do aparelho de Casagrande (Figura 24-A), calibrado de modo que o ponto de contato da concha com a base estivesse 10mm acima da base.

Com o auxílio do cinzel (Figura 24-B) a massa homogênea de LETA foi dividida em duas partes (Figura 25-A), de forma que a espessura central ficou com aproximadamente 10mm. A amostra foi então submetida a uma série de golpes padronizados com a finalidade de fechar uma ranhura no solo. O número de golpes foi anotado e verificado como satisfatórios. Então, uma pequena parte da amostra junto a borda foi retirada para a determinação de umidade (Figura 25-B). O restante da massa foi novamente transferido para a placa de vidro jateada, em que foi adicionado aproximadamente 2ml de água destilada e passou por homogeneização por aproximadamente 3 minutos. Em seguida, a massa retornou para o equipamento Casagrande novo ensaio de golpes.

Esse processo foi repetido várias vezes até obter uma consistência no qual a ranhura se feche com um número específico de golpes, geralmente 25. O limite de liquidez foi calculado com base no número médio de golpes necessários para fechar a ranhura, usando a equação 10, estabelecida na norma. O valor calculado representa a umidade na qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico.

$$T.U (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \cdot 100 \quad (10)$$

Em que:

T.U = Teor de Umidade (%)

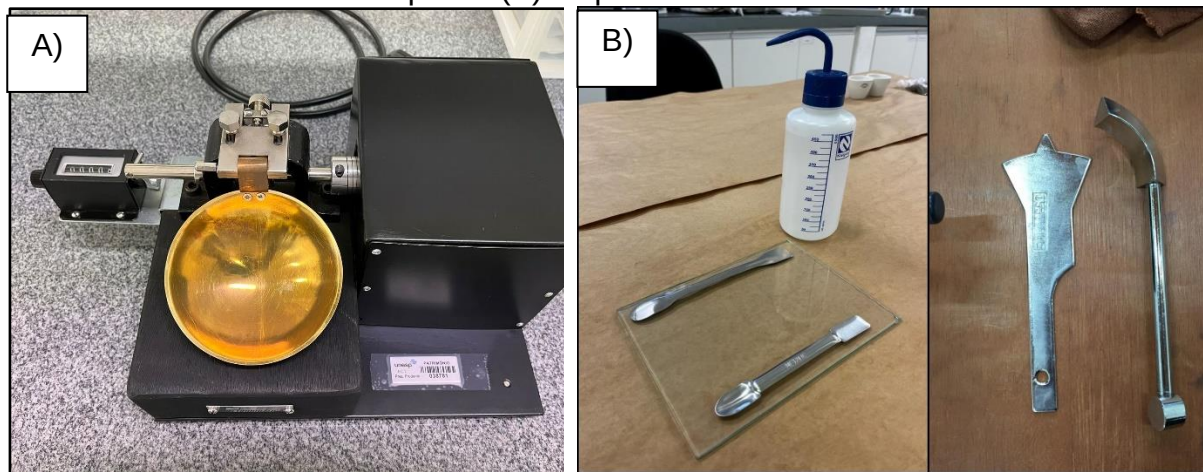
M_1 = Massa da amostra úmida mais a massa do recipiente, em g

M_2 = Massa da amostra seca mais a massa do recipiente, em g

M_3 = massa do recipiente, em g

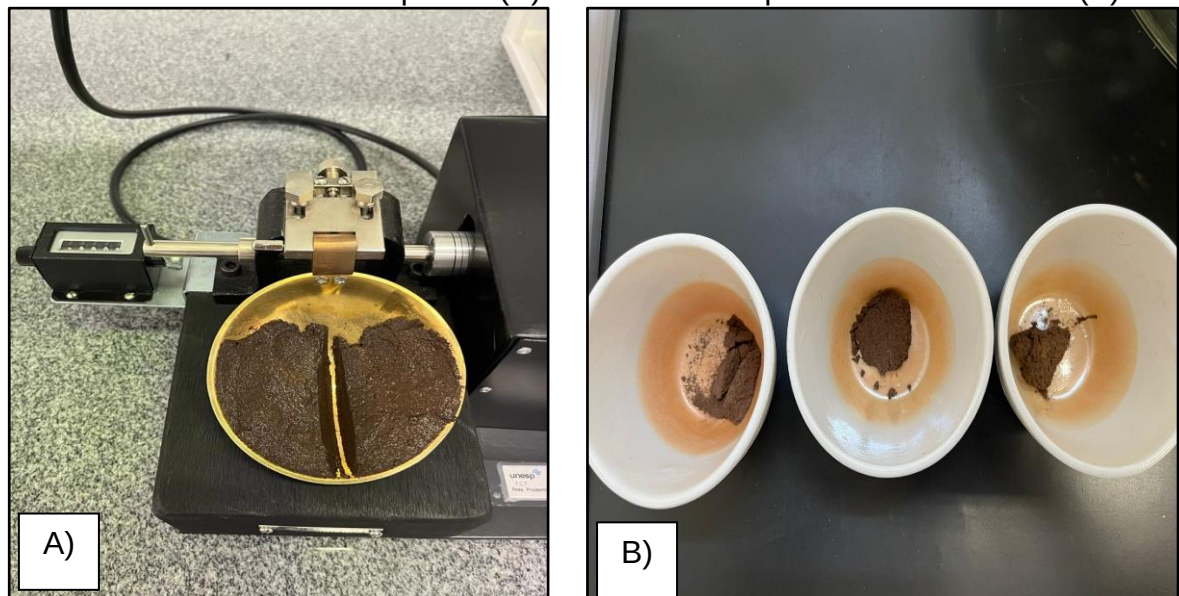
As amostras foram pesadas inicialmente em uma balança Adventurer Ohaus e, em seguida, submetidas à estufa Lucadema a uma temperatura constante de 100 °C por um período de 24 horas. Após o resfriamento das cápsulas contendo as amostras, as mesmas foram pesadas novamente para determinar os teores de umidade das amostras. Esse cálculo foi realizado utilizando a diferença entre as massas iniciais e finais das amostras, expressando o resultado em termos percentuais.

Figura 24 - Equipamento de Casagrande (A). Acessórios para ensaio de Limite de Liquidez (B): espátulas e cinzel.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 25 - Ensaio da determinação do limite de liquidez. Massa homogênea de LETA dividida em duas partes (A). Amostra seca por 24 horas a 100°C (B)



Fonte: Próprio Autor.

5.3.10 Limite de plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade foi realizado conforme especificado na norma NBR 7180/2016 (ABNT, 2016). Após o preparo da amostra para a realização do Limite de Liquidez, foi separado uma amostra para a realização do ensaio de Limite de plasticidade. A massa de LETA plástica foi moldada em formato de uma pequena esfera e, posteriormente, um cilindro, com diâmetro de 3mm e comprimento de 100mm padronizados, conforme a Figura 26.

O ensaio consistiu em determinar o limite de plasticidade da amostra de LETA por meio de um processo de cisalhamento. Inicialmente, a amostra foi moldada em uma superfície de vidro, com os dedos. Os dedos e a palma da mão movimentaram o cilindro de amostra para frente e para trás, aplicando-se uma força de cisalhamento. Esse processo foi repetido diversas vezes, com ajustes graduais na umidade do solo, até que a amostra não apresentasse mais capacidade de se moldar sem quebrar (Figura 27-A). O limite de plasticidade foi determinado pela umidade em que o solo apresentou uma resistência específica ao cisalhamento, chamada de resistência ao cisalhamento específica (Pinto, 2006). Esse valor foi obtido por meio da média de três determinações (triplicata) e foi expresso em percentual de umidade, de acordo com a equação 11.

$$LP (\%) = \frac{TUa_1 + TUa_2 + TUa_3}{3} \quad (11)$$

Em que:

LP = Limite de Plasticidade (%)

TUa₁ = Teor de umidade da amostra 1, em g

TUa₂ = Teor de umidade da amostra 2, em g

TUa₃ = Teor de umidade da amostra 3, em g

Para a definição do percentual de umidade do Limite de Plasticidade foram utilizados balança Adventurer Ohaus para aferição dos pesos das amostras, estufa Lucadema a uma temperatura constante de 100 °C por um período de 24 horas, após o resfriamento das cápsulas contendo as amostras (Figura 27-B), as mesmas foram pesadas novamente. Os teores de umidade das amostras foram determinados

utilizando a diferença entre as massas iniciais e finais das amostras, expressando o resultado em termos percentuais, conforme a equação 12.

$$T.U (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \cdot 100 \quad (12)$$

Em que:

T.U = Teor de Umidade (%)

M₁ = Massa da amostra úmida mais a massa do recipiente, em g

M₂ = Massa da amostra seca mais a massa do recipiente, em g

M₃ = massa do recipiente, em g

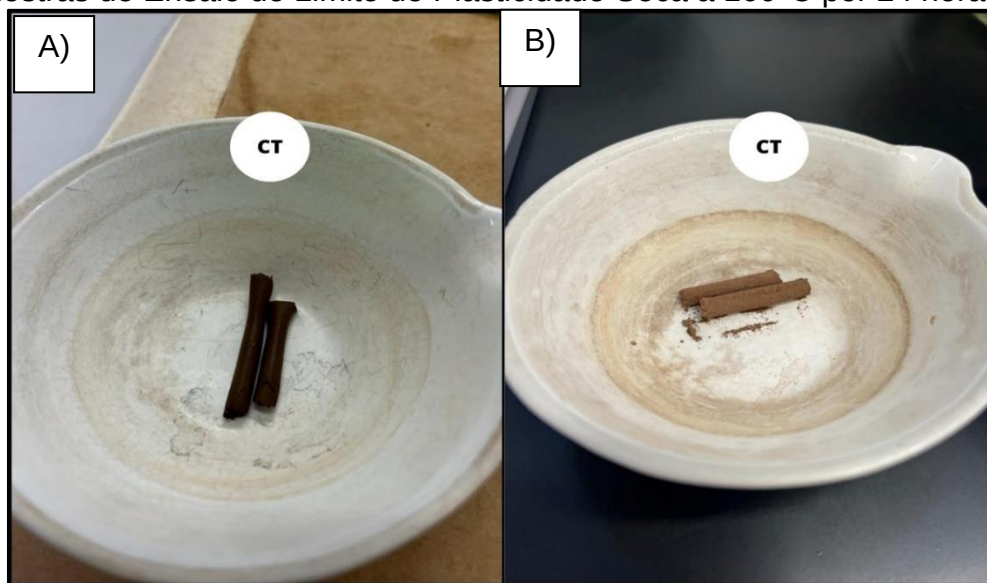
As análises foram conduzidas em triplicatas

Figura 26 - Ensaio de Limite de Plasticidade, amostra e gabarito



Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 - Amostras de Ensaio de Limite de Plasticidade com umidade(A) e Amostras de Ensaio de Limite de Plasticidade Seca a 100°C por 24 horas (B)



Fonte: Próprio Autor.

5.3.11 Ensaio de solubilização

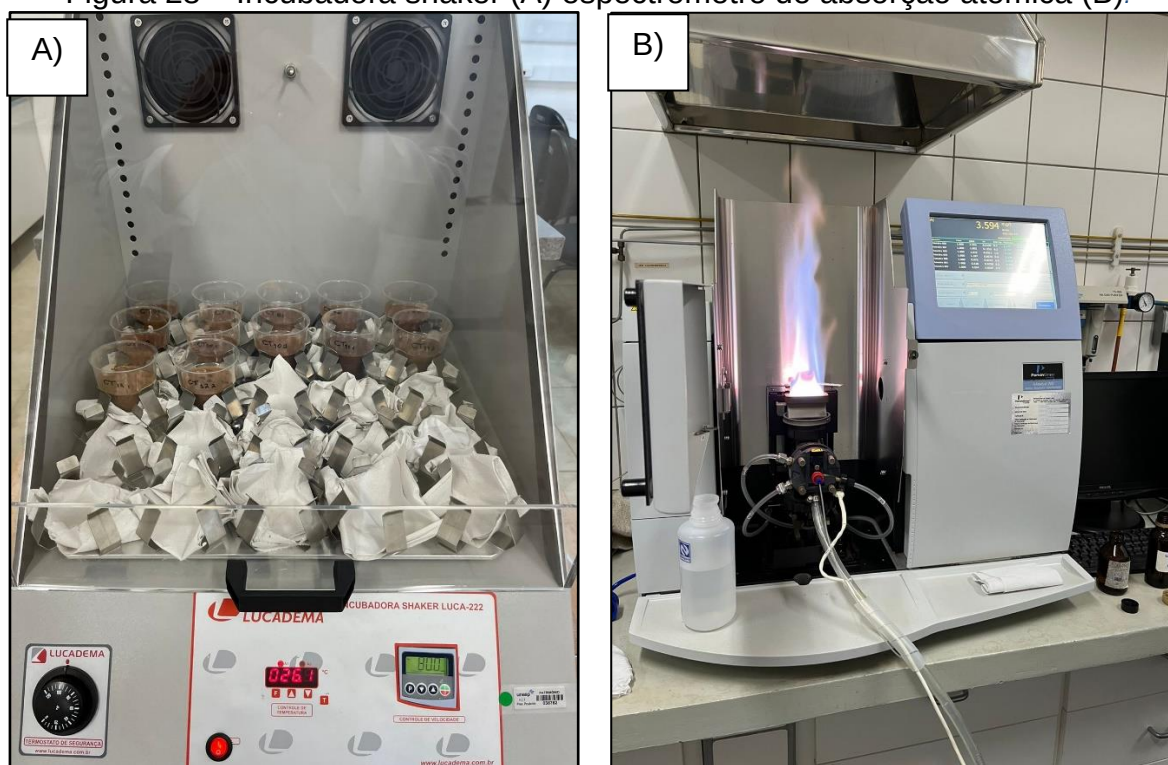
O procedimento para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos foi realizado conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 10006/2004, (ABNT, 2004). Vinte gramas de cada amostra de resíduo foram acondicionados em frascos PET, aos quais foram adicionados 80 mL de água deionizada. A amostra foi agitada por 5 minutos em incubadora shaker Lucadema – modelo Luca 222 (Figura 28-A) e deixada em repouso por 7 dias a uma temperatura de 25°C. Após esse período, as soluções foram filtradas a vácuo por meio de membranas de 0,45 µm e armazenadas em frascos de vidro em temperatura ambiente até a leitura da concentração dos elementos químicos de interesse.

Um dos elementos analisados foi o alumínio (Al), devido às implicações associadas à sua presença em concentrações elevadas no ambiente. Tais consequências incluem a contaminação do lençol freático, toxicidade para a saúde humana e efeitos nocivos para o solo e as plantas, inibindo a assimilação de fósforo e nitrogênio pelas raízes e, assim, reduzindo a produção (Exley, 2016; Singh et al., 2017). Conforme a ABNT NBR 10004 (2004), no Anexo G, o valor limite estabelecido para o teor de alumínio em resíduos sólidos é de 0,2 mg/L.

Outro elemento analisado foi o ferro (Fe), um micronutriente essencial para as plantas, mas que, em excesso no ambiente, pode causar redução no crescimento e, conseqüentemente, diminuição da produtividade vegetal (Jucoski et al., 2016; Audebert; Fofana, 2009). Embora o ferro não seja considerado um metal tóxico, sua presença em excesso na água pode acarretar problemas no abastecimento público, conferindo coloração e sabor à água e promovendo o desenvolvimento de depósitos nas canalizações. De acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), Anexo G, o valor limite estabelecido para o teor de ferro em resíduos sólidos é de 0,3 mg/L.

A determinação das concentrações de alumínio e ferro foi realizada por meio de espectroscopia de absorção atômica, utilizando um espectrômetro de absorção atômica PerkinElmer - modelo AAnalyst 200 (Figura 28-B), com gás de óxido nitroso e acetileno para as análises, conforme protocolo estabelecido no manual do equipamento, todas conduzidas em duplicata.

Figura 28 – Incubadora shaker (A) espectrômetro de absorção atômica (B).



Fonte: Próprio Autor.

5.3.12 Análise estatística de dados

Os dados referentes à condutividade elétrica, teor de sólidos, teor de umidade, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, composição química elementar, limite de liquidez e plasticidade e solubilização foram submetidos a análises estatísticas utilizando o software SISVAR[®]. Para a compreensão das variações da sazonalidade (chuva e seca) e localização espacial das ETAs em estudo, foram realizadas análises de variância (ANAVA), e o teste Tukey.

O teste de Tukey, por sua vez, é frequentemente aplicado após uma ANAVA quando há diferenças significativas entre as médias dos grupos. Esse método possibilita a identificação de diferenças significativas nas médias, contribuindo para a interpretação dos resultados e para a tomada de decisões embasadas em dados (Ferreira, 2019).

Dessa forma, fixou-se o valor da significância em 5%, que é o default do SISVAR[®], com isso, se $(Pr > F_c)$ for menor que 0,05 o tratamento é significativo, se $(Pr > F_c)$ for maior que 0,05, os tratamentos são estatisticamente iguais.

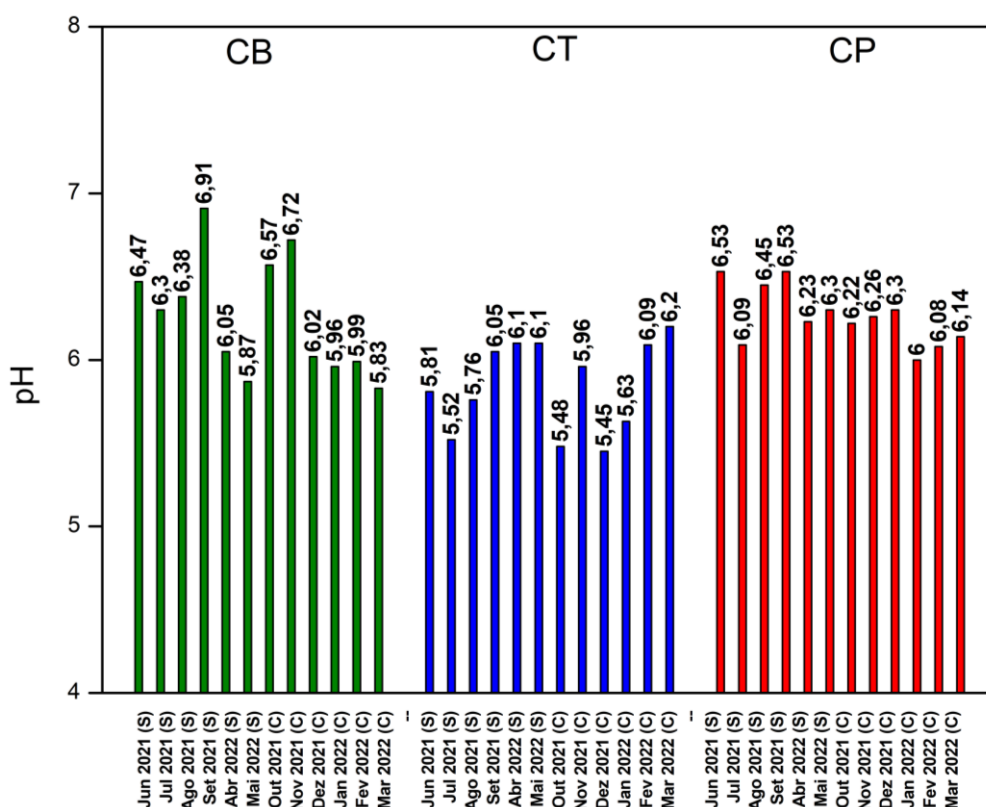
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A análise dos dados de pH do LETA *in natura* foi conduzida considerando a variação sazonal ao longo do ano (12 meses). Os meses de junho a setembro de 2021, abril e maio de 2022 foram categorizados como períodos de seca (S), enquanto os meses de outubro de 2021 a março de 2022 foram classificados como meses de período chuvoso (C).

Os resultados foram representados na (Figura 29), revelando valores de pH que oscilaram de 5,87 a 6,91 durante o período de seca e de 5,83 a 6,72 no período chuvoso para o LETA CB (em verde). Para o LETA CT (em azul), os valores variaram de pH 5,52 a 6,1 no período de seca e de pH 5,45 a 6,2 no período chuvoso. Já o LETA CP apresentou variação de pH de 6,09 a 6,53 durante o período de seca e de pH 6,00 a 6,3 no período chuvoso (em vermelho).

Figura 29 - Variação do valor de pH das amostras de LETA das ETAS CB (verde), CT (azul) e CP (vermelho) referente aos meses de junho de 2021 a maio de 2022, contemplando período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

Os valores de pH, por serem expressos em base logarítmica, não foram submetidos a análise estatística. Os resultados da avaliação de pH do LETA nas três ETAs estudadas demonstraram uma variação tênue, porém significativa, em relação à sazonalidade e à localização geográfica das ETAs.

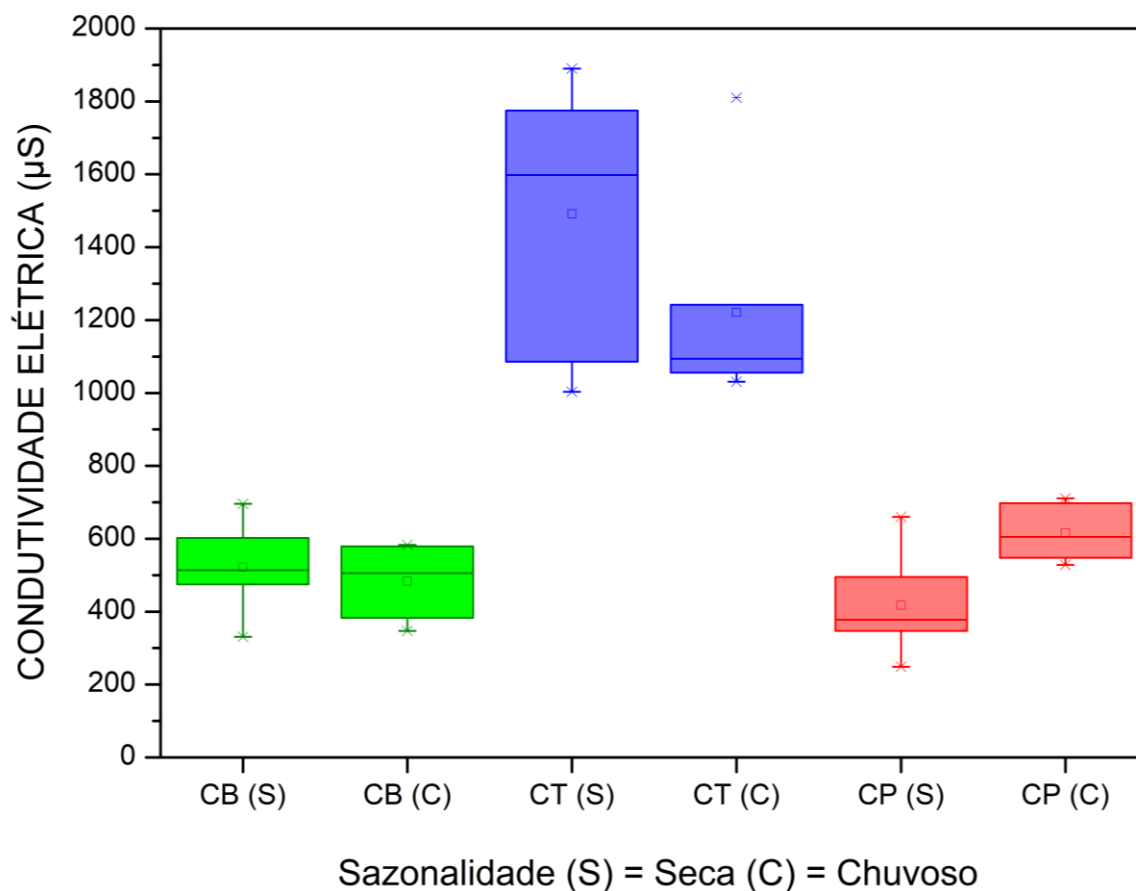
Os valores obtidos estão de acordo com faixa conhecida para LETA, situando-se entre 5 e 8 (Almeida *et al.*, 2017). Essa faixa de pH indica uma condição neutra com uma leve tendência ácida, o que sugere possíveis oportunidades em relação ao destino do resíduo. O pH é um indicador da corrosão de materiais, bem como na determinação da fertilidade do solo (Novak *et al.*, 1995).

Ainda, os resultados obtidos no presente estudo concordam com aqueles apresentados na literatura específica de LETA: Richter (2001) obteve valores de pH na faixa de 6 a 8; Bitencourt (2016) encontrou em seu estudo valor de pH 7; e, Franco (2019) aferiu valor de pH 6,9 em seu trabalho, assim como Bensitel *et al.* (2023) encontrou valores de pH na faixa de 7,52 em Marrocos, Zhou *et al.* (2014) aferiu pH de 7,6 na China e Boina *et al.* (2024) obteve valor de pH 6,6 no estado de São Paulo.

Os valores de condutividade elétrica (CE – $\mu\text{S}/\text{cm}$) no LETA *in natura* das ETAs CB, CT e CP medidos entre os meses de junho a setembro de 2021, abril e maio de 2022 categorizados como seco (S), e os meses de outubro de 2021 a março de 2022 classificados como chuvosos (C), estão apresentados em diagrama de caixa (*boxplot*) (Figura 30).

No LETA CB, durante o período (S) a condutividade elétrica manteve-se entre 331 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 696 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto no período (C) a CE aferida foi de 383 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 583 $\mu\text{S}/\text{cm}$. No LETA CT, os valores de CE durante o período (S) situaram-se entre 1.003 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1.890 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto no período (C), variaram de 1.031 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1.810 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esses elevados valores em relação a CB sugere uma maior concentração de íons e compostos dissolvidos no LETA. Já no LETA CP, a variação da CE em período (S) ocorreu entre os valores de 249 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e no período (C) valores de 528 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 711 $\mu\text{S}/\text{cm}$ foram aferidos, apresentando uma faixa de valores relativamente mais baixa em relação a ETA CT.

Figura 30 – Diagrama de caixa para valores de Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) das amostras de referente aos meses de junho de 2021 a maio de 2022, contemplando período de seca (S) e chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

A análise estatística de variância revelou que os valores de CE não apresentam diferença significativa em relação à sazonalidade no LETA CB e no LETA CT. No entanto, para LETA CP a sazonalidade se mostrou significativa para as características do lodo, com valor elevado no período chuvoso, fato que está relacionado com maior arraste de partículas.

Tabela 1 – Resultados das análises estatísticas sazonal de CE.

Análise estatística sazonal			
	ETA CB	ETA CT	ETA CP
CE	Pr>Fc= 0,5282	Pr>Fc= 0,1999	Pr>Fc= 0,0248

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados obtidos para as amostras de LETA indicam que a CE pode estar relacionada às diferentes composições químicas e concentrações de íons presentes em cada ETA, como apresentado no Quadro 3.

Locais com solos que possuem uma proporção mais elevada de partículas argilosas apresentam CE superior, devido à presença de minerais condutores, maior teor de umidade e maior concentração de matéria orgânica (Brady; Weil, 2016). Em contrapartida, solos arenosos tendem a exibir CE inferior devido à maior porosidade, menor teor de umidade e menor presença de matéria orgânica (Brady; Weil, 2016).

Em relação a outros trabalhos, Boina *et al.* (2024) aferiu CE com valor de 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em LETA do estado de São Paulo, caracterizado por uma predominância de LETA com textura argilosa, demonstrando que LETA com predominância argiloso, tendem a ter valor de CE mais elevado.

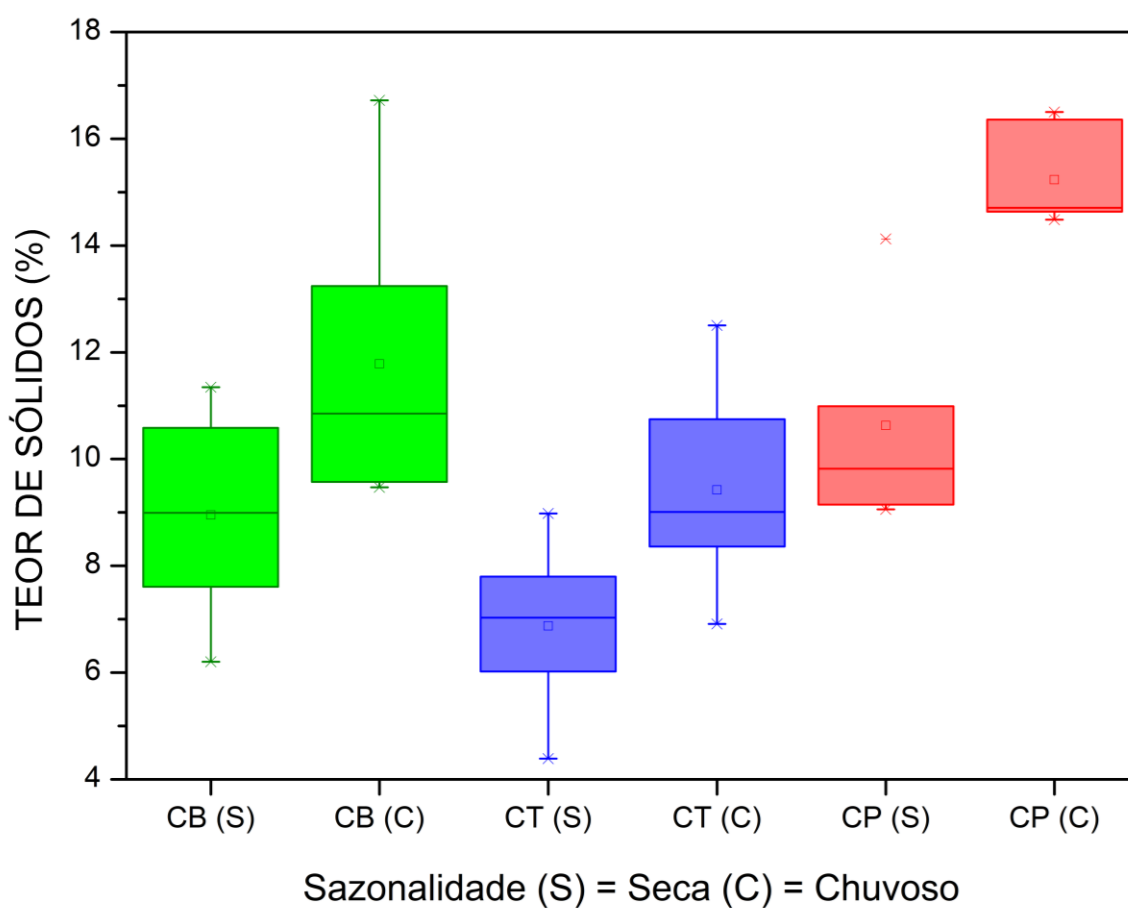
Os valores elevados de CE observados nas amostras do LETA da ETA CT, em comparação com as demais ETAs do estudo, não estão relacionados apenas às propriedades do solo. Isso se deve à localização da captação da ETA CT em uma região com solo do tipo latossolo, caracterizado por sua menor riqueza em íons. Além disso, a ETA CT emprega uma quantidade reduzida de produtos químicos durante o tratamento em comparação com a ETA CP. Esses fatores indicam que as propriedades do solo e a quantidade de produtos químicos utilizados não são os únicos responsáveis pelos elevados valores de CE observados.

Possivelmente, esse fenômeno pode ser atribuído, à presença significativa de matéria orgânica, à qualidade do corpo hídrico e à bacia hidrográfica da área de captação da ETA CT. Esses resultados de CE também guardam relação com as práticas de tratamento, notadamente na ETA CT, onde ocorre a remoção do lodo por meio do sistema de flotação (Quadro 3). Este sistema se destaca como uma ferramenta eficaz na eliminação de micro-organismos e matéria orgânica presentes na água, contribuindo para a eficiência do processo de tratamento e concentração desses elementos no lodo.

6.2 TEOR DE SÓLIDOS / TEOR DE UMIDADE E SÓLIDOS FIXOS / SÓLIDOS VOLÁTEIS

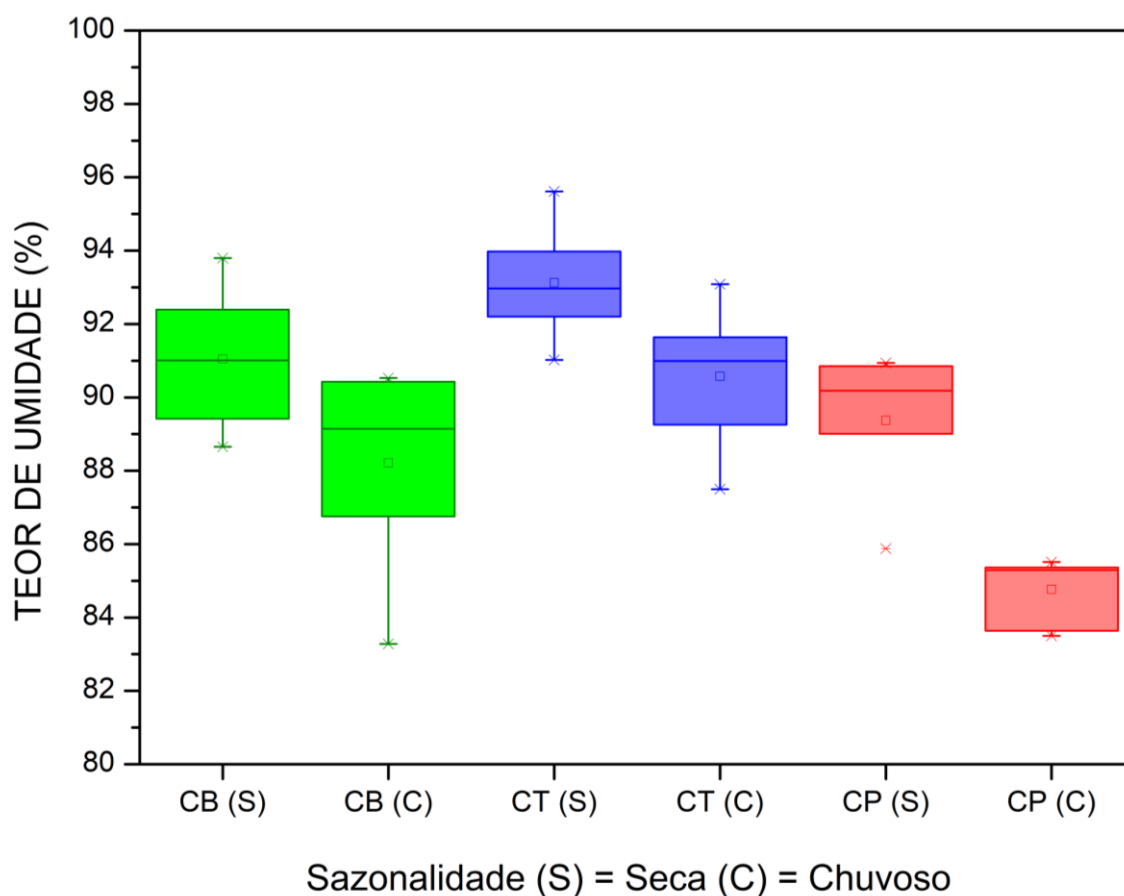
A análise dos dados obtidos revelou informações importantes sobre as características do LETA em relação aos teores de sólidos e umidade, juntamente com a massa de sólidos fixos e voláteis. As (Figuras 31 e 32) apresentam em diagrama de caixa (*boxplot*) os valores do teor de sólidos (%) e teor de umidade (%) das amostras de LETA das três ETAs do estudo.

Figura 31 – Diagrama de caixa com valores de Teor de Sólidos do LETA da ETA CB (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 32 - Diagrama de caixa com valores de Teor de Umidade do LETA da ETA (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

O teor de sólidos do LETA CB no período (S) foi de $(8,95\% \pm 2,02)$ e o teor de umidade foi de $(91,05\% \pm 2,02)$. Já o teor de sólidos do LETA CB no período (C) foi de $(11,8\% \pm 2,81)$, enquanto o teor de umidade foi de $(88,2\% \pm 2,81)$. Considerando o conjunto de amostra de LETA CB, a análise estatística indicou que não houve variação significativa nos valores de teor de sólidos nem no teor de umidade, com ambos os valores de significância superiores a 5% em relação à sazonalidade.

No LETA CT, o teor de umidade foi de $(93,1\% \pm 1,57)$ no período (S) e $(90,6\% \pm 1,95)$ no período (C). Os valores de teor de sólidos foram de $(6,9\% \pm 1,57)$ (S) e $(9,4\% \pm 1,95)$ (C), respectivamente. A análise estatística revelou variação significativa entre os períodos (S) e (C) tanto no teor de sólidos quanto nos valores de teor de umidade, com ambos os resultados abaixo de 5% de significância.

Amostras de LETA da ETA CP apresentaram valores de teor de sólidos de $(10,6\% \pm 2,10)$ (S) e $(15,2\% \pm 0,93)$ (C), com teor de umidade de $(89,4\% \pm 2,10)$ (S) e $(84,8\% \pm 0,93)$ (C). A análise estatística indicou que houve variação significativa em relação à sazonalidade tanto nos valores de teor de umidade quanto no teor de sólidos.

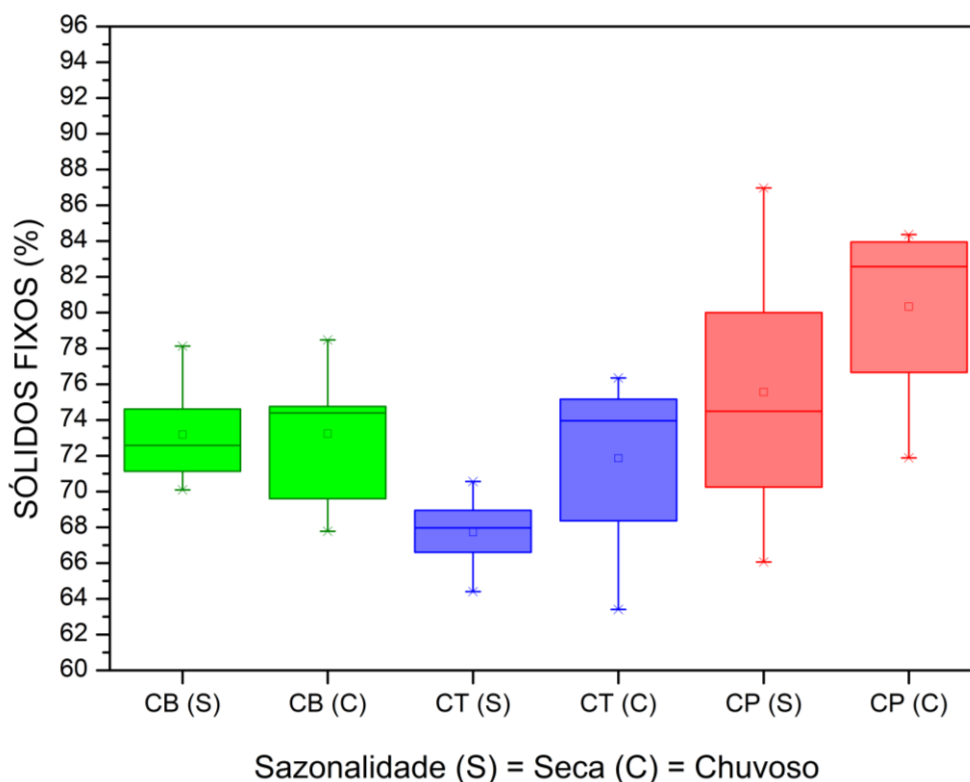
Tabela 2 – Resultados das análises estatísticas sazonal de Teor de sólidos e Teor de umidade.

Análise estatística sazonal			
	ETA CB	ETA CT	ETA CP
Teor de sólidos	Pr>Fc= 0,1451	Pr>Fc= 0,0119	Pr>Fc= 0,0019
Teor de umidade	Pr>Fc= 0,1343	Pr>Fc= 0,0127	Pr>Fc= 0,0020

Fonte: Próprio Autor.

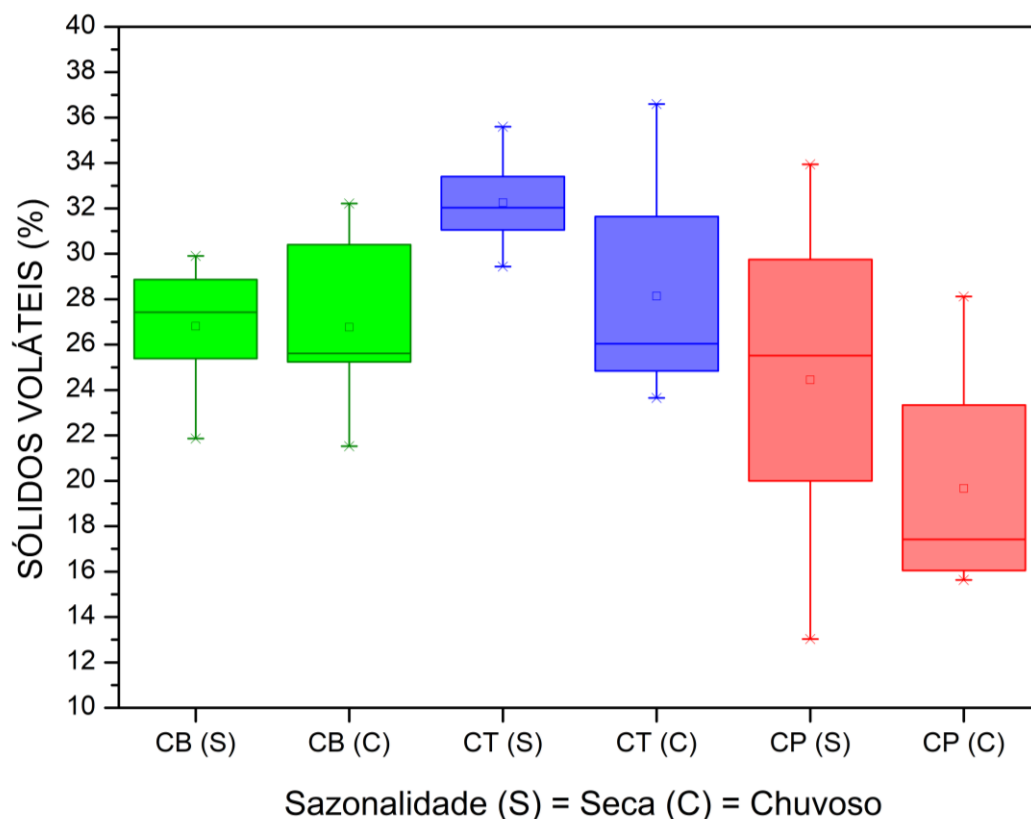
As Figuras 33 e 34 mostram, respectivamente, os teores de sólidos fixos (%) e sólidos voláteis (%) das amostras de lodo de cada ETA em estudo.

Figura 33 - Diagrama de caixa com valores de Sólidos Fixos do LETA da ETA CB (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 34 - Diagrama de caixa com valores de Sólidos Voláteis do LETA da ETA CB (verde), ETA CT (azul) e ETA CP (vermelho), ETA CT e ETA CP, contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

Os valores de sólidos fixos do LETA CB no período (S) foram de $(73,2\% \pm 2,91)$, enquanto os valores de sólidos voláteis foram de $(26,8\% \pm 2,91)$. No período (C), os valores de sólidos fixos do LETA foram de $(73,23\% \pm 3,88)$, com valores de sólidos voláteis de $(26,77\% \pm 3,88)$. A análise estatística não revelou variação significativa nos valores de sólidos fixos nem de sólidos voláteis, ambos apresentando significância superior a 5% em relação à sazonalidade.

No LETA CT, os valores de sólidos fixos foram de $(67,75\% \pm 2,10)$ no período (S) e $(71,9\% \pm 4,97)$ no período (C). Para os sólidos voláteis, os valores foram de $(32,25\% \pm 2,10)$ (S) e $(28,1\% \pm 4,97)$ (C), respectivamente. A análise estatística não indicou variação significativa de sazonalidade entre os períodos (S) e (C) tanto nos valores de sólidos fixos quanto nos valores de sólidos voláteis. Ambos os resultados apresentaram valores acima de 5% de significância.

Dessa forma, para as amostras de LETA da ETA CP, foram encontrados valores de sólidos fixos de $(75,55\% \pm 8,21)$ (S) e $(80,3\% \pm 5,03)$ (C), e valores de

sólidos voláteis de $(24,45\% \pm 8,21)$ (S) e $(19,7\% \pm 5,03)$ (C). A análise estatística revelou a ausência de variação significativa em relação à sazonalidade, tanto nos valores de sólidos fixos quanto nos valores de sólidos voláteis.

De modo geral, os dados mostram pouca quantidade de sólidos e que esses são, majoritariamente, materiais mineralizados. Os resultados de teor de sólidos e teor de umidade apresentam variação sazonal na ETA CT e ETA CP, já os resultados de sólidos fixos e sólidos voláteis não apresentaram variação sazonal no período avaliado.

Análises estatísticas evidenciaram a inexistência de variação significativa nos valores de teor de sólidos, teor de umidade, sólidos fixos e sólidos voláteis ao comparar as ETAs CB, CT e CP, indicando que as variações são predominantemente sazonais e não espaciais.

Tabela 3 – Resultados das análises estatísticas sazonal de Sólidos fixos e Sólidos voláteis.

Análise estatística sazonal			
	ETA CB	ETA CT	ETA CP
Sólidos fixos	Pr>Fc= 0,8693	Pr>Fc= 0,0906	Pr>Fc= 0,3487
Sólidos voláteis	Pr>Fc= 0,9083	Pr>Fc= 0,0906	Pr>Fc= 0,2414

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4 – Resultados das análises estatísticas espacial de Teor de sólidos, Teor de umidade, Sólidos fixos e Sólidos voláteis

Análise estatística espacial	
Teor de sólidos	Pr>Fc= 0,2897
Teor de umidade	Pr>Fc= 0,2897
Sólidos fixos	Pr>Fc= 0,1105
Sólidos voláteis	Pr>Fc= 0,1111

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados de teor de sólidos e umidade demonstrados nas Figuras 31 e 32 apresentam uma faixa de similaridade com o trabalho realizado por Gheller (2021) que obteve resultados de teor de umidade em torno de 70% e sólidos totais 30% em ETAS do estado de São Paulo e no Paraná. Igualmente, Bitencourt (2016), na caracterização do lodo da ETA de Piracicaba – SP, identificou um teor de umidade de aproximadamente 79,42 %.

Da mesma forma, valores de sólidos fixos na faixa entre 70% a 90% foram obtidos por Richter (2001) e Gheller (2021) na faixa de 80%. De acordo com Richter (2001), o teor de sólidos voláteis nos LETAs normalmente varia de 10% a 30%, e os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com essa faixa, apresentando um valor aproximado de 26%.

Segundo Hillebrand e Benetti (2020), os valores de sólidos fixos e voláteis são parâmetros que permitem aproximar a composição da matéria inorgânica e orgânica, respectivamente, presentes no lodo de ETA. A presença de matéria orgânica de origem natural, proveniente de fontes naturais presentes em corpos hídricos, pode afetar negativamente os processos de tratamento de água e posteriormente em formas de reaproveitamento do LETA, onde, conseqüentemente, não é considerada vantajosa.

6.3 SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS

A análise do volume de sólidos sedimentáveis foram organizados nas Tabelas 5 e 6, considerando a categorização dos meses de junho a setembro de 2021, abril e maio de 2022 como (S) na (Tabela 5), e os meses de outubro de 2021 a março de 2022 como (C) na (Tabela 6). No LETA CB e LETA CT, durante o período (S), o volume de sedimentação de sólidos em suspensão variou entre 500 mL e 1000 mL. No LETA CP, durante o mesmo período, o volume de sedimentação foi inferior a 100 mL.

Tabela 5 - Resultados das análises de Sólidos Sedimentáveis nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período de seca (S).

ETAs	Volume de lodo de ETA sedimentado (mL)					
	Jun 2021 (S)	Jul 2021 (S)	Ago 2021 (S)	Set 2021 (S)	Abr 2022 (S)	Mai 2022 (S)
CB	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000
CT	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000
CP	<100	<100	<100	<100	<100	<100

Fonte: Próprio Autor.

No período (C), tanto no LETA CB quanto no LETA CT, observou-se um volume de sedimentação de sólidos em suspensão na faixa de 500 mL a 1000 mL. No LETA CP, o volume de sedimentação variou entre 100 mL a 500 mL e inferior a 100 mL.

Tabela 6 - Resultados das análises de Sólidos Sedimentáveis nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período chuvoso (C).

ETAs	Volume de lodo de ETA sedimentado (mL)					
	Out 2021 (C)	Nov 2021 (C)	Dez 2021 (C)	Jan 2022 (C)	Fev 2022 (C)	Mar 2022 (C)
CB	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000
CT	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000	>500 <1000
CP	>100 <500	>100 <500	>100 <500	<100	>100 <500	<100

Fonte: Próprio Autor.

Esses resultados sugerem uma maior concentração de sólidos em suspensão no LETA da ETAs CB e CT em comparação com a ETA CP, sugerindo variação espacial da ETA CP em relação as ETA CB e CT.

Em relação a sazonalidade os valores de sólidos em suspensão do LETA da ETA CB E CT demonstraram valores constantes ao longo dos meses (S) e (C), enquanto na ETA CP houve variação nos valores em relação aos meses (S) e (C), indicando que no período chuvoso o arraste de sólidos se torna maior, o que demonstrando variação sazonal apenas na ETA CP.

Nota-se que o menor volume de sólidos sedimentáveis encontrado na ETA CP sugere que a utilização de um sistema automatizado de limpeza, realizado quatro vezes ao dia, pode contribuir significativamente para a redução da quantidade de sólidos sedimentáveis presentes na amostra.

Em relação a outros trabalhos, Gervasoni (2014) encontrou valores de sólidos sedimentáveis na faixa de 1000 mL em seis ETAs do estado do Paraná. Similarmente, Porras (2007) obteve valores em duas ETAs no município de Araraquara e São Carlos, na faixa de 700mL e 825mL.

6.4 FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

A análise textural das 12 amostras de LETA das ETAs CB, CT e CP resultou em uma classificação em dois períodos sazonais, (S) e (C), como apresentado nas (Tabelas 7 e 8).

Ao longo do ano, o LETA CB manteve a textura Arenosa (AR) durante todo o período (S) e com maior predominância no período (C). sendo classificados apenas dois meses com textura granulométrica média arenosa (MD-AR).

A análise textural do LETA da ETA CT revelou que durante os 2 períodos sazonais do ano, as classes texturais observadas foram (AR), (MD-AR) e média argilosa (MD-ARG). Por outro lado, no LETA CP foram identificadas as classes texturais (AR) E (MD-AR), com variação ao longo dos dois períodos sazonais analisados.

Tabela 7 - Resultados da análise textural nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período de seca (S).

CLASSE TEXTURAL						
Amostras	Jun 2021 (S)	Jul 2021 (S)	Ago 2021 (S)	Set 2021 (S)	Abr 2022 (S)	Mai 2022 (S)
CB	AR	AR	AR	AR	AR	AR
CT	AR	MD-AR	MD-AR	MD-ARG	AR	MD-ARG
CP	AR	AR	AR	AR	MD-AR	MD-AR

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 8 - Resultados da análise textural nas amostras do LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os seis meses do período chuvoso (C).

CLASSE TEXTURAL						
Amostras	Out 2021 (C)	Nov 2021 (C)	Dez 2021 (C)	Jan 2022 (C)	Fev 2022 (C)	Mar 2022 (C)
CB	AR	AR	AR	MD-AR	AR	MD-AR
CT	MD-AR	MD-AR	MD-ARG	MD-ARG	MD-AR	MD-AR
CP	AR	AR	MD-AR	MD-AR	MD-AR	MD-AR

Fonte: Próprio Autor.

A interpretação dos resultados aponta para a presença de variações tanto sazonais quanto espaciais no que tange à análise textural. Essa conclusão se baseia

na observação sistemática das classes texturais identificadas nas amostras coletadas ao longo dos dois períodos sazonais investigados. A variação sazonal sugere uma influência direta dos diferentes contextos climáticos, enquanto a variação espacial indica que as características texturais do lodo de ETA podem ser distintas em diferentes áreas ou ETAs, possivelmente devido a variações nas fontes de abastecimento e tipos de solos.

A característica arenosa está presente em solos do tipo Argissolo e Latossolo ambos os solos representativos das ETAs do estudo.

A análise granulométrica do lodo da ETA Capim Fino, Piracicaba – SP, realizada por Bitencourt (2016) resultou na caracterização da amostra como sendo predominantemente arenosa. Contudo, essa condição não é constante. Conforme Messias (2013) em uma amostra de lodo coletada na mesma ETA Capim fino no ano de 2009, apresentou ser arenosa e em outras coletas as amostras foram predominantemente argilosas.

De acordo com Souza (2004), solos arenosos são profundos e muito pobres em elementos, em consequência da composição do material de origem, fundamentalmente formado por quartzo, cristal encontrado majoritariamente nas amostras analisadas de DRX das ETAs do estudo. Os latossolos apresentam tendência a formar crostas superficiais, possivelmente, devido à flocculação das argilas que passam a comportar-se funcionalmente como silte e areia fina, a fração argila dos latossolos é composta principalmente por caulinita e quartzo (Souza, 2004). Os argissolos a uma determinada profundidade e com cores mais claras, também possuem textura arenosa ou média arenosa (Souza, 2004).

6.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR

Os resultados da análise da composição química elementar das amostras de LETA da ETA CB estão detalhados conforme os períodos sazonais, (S) e (C), nas (Tabelas 9 e 10). Foi constatada a predominância dos elementos óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido sulfúrico (SO_3), óxido de cálcio (CaO), dióxido de titânio (TiO_2), óxidos de manganês (MnO) e fosfato (P_2O_5). Destacando os elevados valores de (Al_2O_3), esses estão associados ao produto químico utilizado no pré-tratamento, que consiste no policloreto de alumínio.

No entanto, em junho de 2021, o teor de alumínio registrou-se em 0,00, em decorrência da substituição temporária do coagulante à base de alumínio pelo coagulante à base de ferro para fins de avaliação na ETA CB, o que ocasionou um aumento significativo no teor de ferro em relação aos meses anteriores analisados.

Tabela 9 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CB dos seis meses de período de seca (S).

ETA CB						
Elemento (%)	Jun 2021 (S)	Jul 2021 (S)	Ago 2021 (S)	Set 2021 (S)	Abr 2022 (S)	Mai 2022 (S)
Al ₂ O ₃	0,00	47,97	48,77	47,69	41,01	42,68
Fe ₂ O ₃	79,20	12,32	12,10	12,83	18,16	14,33
SiO ₂	16,30	34,16	33,51	33,55	35,06	37,10
SO ₃	0,99	1,22	1,25	1,36	1,14	1,32
CaO	1,07	0,76	0,88	0,78	0,89	0,77
TiO ₂	0,00	1,55	1,28	1,59	1,75	1,77
P ₂ O ₅	0,00	1,19	1,43	1,27	0,93	0,11
MnO	1,21	0,00	0,00	0,00	0,20	0,94
Outros	1,23	0,83	0,78	0,93	0,86	0,98

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 10 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CB dos seis meses de período chuvoso (C).

ETA CB						
Elemento (%)	Out 2021 (C)	Nov 2021 (C)	Dez 2021 (C)	Jan 2022 (C)	Fev 2022 (C)	Mar 2022 (C)
Al ₂ O ₃	49,37	47,28	45,66	41,23	41,17	39,09
Fe ₂ O ₃	12,98	13,71	12,80	11,36	18,17	12,68
SiO ₂	32,67	33,91	35,72	41,12	34,29	42,54
SO ₃	1,21	1,02	1,56	1,17	1,39	0,93
CaO	0,68	0,66	0,71	0,52	0,93	0,45
TiO ₂	1,33	1,57	1,61	2,45	1,84	2,48
P ₂ O ₅	0,97	0,99	0,97	0,79	1,06	0,52
MnO	0,00	0,11	0,13	0,10	0,19	0,00
Outros	0,79	0,75	0,84	1,26	0,96	1,31

Fonte: Próprio Autor.

De forma semelhante, as amostras de LETA da ETA CT (Tabelas 11 e 12) e CP (Tabelas 13 e 14) também apresentaram os elementos óxido de alumínio (Al₂O₃), dióxido de silício (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido sulfúrico (SO₃), óxido de cálcio (CaO), dióxido de titânio (TiO₂), óxidos de manganês (MnO) e fosfato (P₂O₅). A ETA CT utiliza o policloreto de alumínio como coagulante no pré-tratamento, evidenciando

igualmente a ETA CB elevados níveis substanciais (Al_2O_3), em contrapartida à ETA CP, que utiliza o cloreto férrico como coagulante, resultando em teores mais altos de Fe_2O_3 . Nos meses de setembro de 2021, dezembro, janeiro e março de 2022, houve a aplicação tanto de coagulante à base de alumínio quanto de coagulante à base de ferro na ETA CP, isso resultou em valores significativos nas análises, proporcionando informações relevantes para a interpretação das análises de DRX com a presença de caulinita. A possível identificação da fase de caulinita pode estar relacionada às propriedades do produto químico empregado no tratamento, o hidróxido de alumínio tem a capacidade de adsorver partículas de argila, o que pode tornar mais evidente a presença do mineral caulinita nas análises.

Tabela 11 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CT dos seis meses de período de seca (S).

ETA CT						
Elemento (%)	Jun 2021 (S)	Jul 2021 (S)	Ago 2021 (S)	Set 2021 (S)	Abr 2022 (S)	Mai 2022 (S)
Al_2O_3	47,31	57,03	46,35	40,72	52,19	50,05
Fe_2O_3	8,79	5,36	10,12	9,93	10,68	8,15
SiO_2	37,29	30,20	36,25	42,62	27,52	33,57
SO_3	2,23	3,08	2,21	1,77	3,43	3,39
CaO	1,35	1,79	1,38	1,08	1,57	1,36
TiO_2	1,35	0,89	1,63	1,80	1,50	1,16
P_2O_5	0,46	0,45	0,31	0,65	1,02	0,72
MnO	0,45	0,44	0,53	0,65	1,03	0,81
Outros	0,77	0,75	1,24	0,78	1,06	0,79

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 12 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CT dos seis meses de período chuvoso (C).

ETA CT						
Elemento (%)	Out 2021 (C)	Nov 2021 (C)	Dez 2021 (C)	Jan 2022 (C)	Fev 2022 (C)	Mar 2022 (C)
Al_2O_3	36,10	39,86	40,29	40,60	47,94	54,52
Fe_2O_3	8,59	7,99	13,21	14,56	14,00	9,78
SiO_2	48,99	45,48	38,48	36,75	29,93	26,35
SO_3	1,58	1,70	1,92	1,67	2,66	3,70
CaO	1,09	1,29	1,50	1,12	0,99	1,25
TiO_2	1,54	1,49	2,36	2,70	2,11	2,00
P_2O_5	0,67	0,62	1,00	0,94	1,00	1,50
MnO	0,74	0,94	0,72	0,59	0,52	0,50
Outros	0,69	0,64	0,52	1,07	0,85	0,40

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 13 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA CP dos seis meses de período de seca (S).

ETA CP						
Elemento (%)	Jun 2021 (S)	Jul 2021 (S)	Ago 2021 (S)	Set 2021 (S)	Abr 2022 (S)	Mai 2022 (S)
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	43,70	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	82,59	85,09	84,77	11,82	81,98	79,45
SiO ₂	13,34	11,97	12,72	38,62	14,48	16,15
SO ₃	1,02	0,88	0,84	1,56	0,68	1,29
CaO	0,70	0,53	0,68	0,52	0,94	0,86
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00	0,00
P ₂ O ₅	0,92	0,00	0,00	0,82	0,67	0,95
MnO	1,02	0,84	0,61	0,00	0,96	0,93
Outros	0,41	0,69	0,38	1,04	0,29	0,37

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 14 - Resultados das análises de FRX nas amostras do lodo da ETA dos seis meses de período chuvoso (C).

ETA CP						
Elemento (%)	Out 2021 (C)	Nov 2021 (C)	Dez 2021 (C)	Jan 2022 (C)	Fev 2022 (C)	Mar 2022 (C)
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	7,80	10,48	0,00	5,24
Fe ₂ O ₃	82,67	80,83	66,73	64,36	79,92	71,90
SiO ₂	11,73	14,70	17,86	18,76	13,98	17,67
SO ₃	0,70	1,16	0,70	0,64	0,57	0,52
CaO	1,78	1,23	2,50	1,89	2,51	1,67
TiO ₂	0,00	0,00	1,14	1,28	0,00	0,79
P ₂ O ₅	1,00	0,66	1,80	1,28	1,02	0,00
MnO	1,76	0,99	0,96	0,82	1,62	0,98
Outros	0,36	0,43	0,51	0,49	0,38	1,23

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados mostram que Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂ compõem 90% das amostras de LETA de todas as ETAs do estudo. Outros trabalhos também mostram que a composição química elementar dos LETAs possui a presença dos mesmos compostos químicos (Huang; Wang, 2013; Gastaldini *et al.*, 2015; Ahmad *et al.*, 2016; Andrade *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2019; Godoy *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019; Bohorquez Gonzalez *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021).

Análises estatísticas realizadas no LETA da ETA CB, CT e CP não revelaram variações significativas nos valores de Al₂O₃, Fe₂O₃, e SiO₂, em relação a sazonalidade.

Com o propósito de avaliar o efeito da variação espacial, os valores dos elementos Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram comparados considerando apenas o lodo das ETAs CB e CT. Isso se deve ao fato de que a ETA CP utiliza um coagulante à base de ferro, o que a diferencia das outras ETAs que empregam coagulantes à base de alumínio. A análise relacionando as 3 ETAs foi conduzida apenas para o elemento SiO_2 .

As ETAs CB e CT revelaram efeito espacial significativo, indicando que a magnitude dos valores está associada à quantidade de coagulantes empregados no processo de tratamento e à qualidade da água captada. Para o elemento SiO_2 , relacionando as 3 ETAs as análises estatísticas também apresentaram variação significativa, confirmando a variação espacial devido as características do solo local. É importante ressaltar que nessas amostras de lodo de ETA a influência sazonal não ocorreu.

Tabela 15 - Resultados das análises estatísticas sazonal da composição química elementar.

Análise estatística sazonal			
	ETA CB	ETA CT	ETA CP
Valores de Al_2O_3	Pr>Fc= 0,4683	Pr>Fc= 0,1396	Pr>Fc= 0,6643
Valores de Fe_2O_3	Pr>Fc= 0,3305	Pr>Fc= 0,1079	Pr>Fc= 0,7844
Valores de SiO_2	Pr>Fc= 0,1800	Pr>Fc= 0,4767	Pr>Fc= 0,6392

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 16 - Resultados das análises estatísticas espacial da composição química elementar.

Análise estatística espacial	
Valores de Al_2O_3	Pr>Fc= 0,000
Valores de Fe_2O_3	Pr>Fc= 0,000
Valores de SiO_2	Pr>Fc= 0,000

Fonte: Próprio Autor.

As proporções de Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão diretamente relacionadas ao volume e tipo de coagulantes utilizados no tratamento processo, visto que os coagulantes metálicos à base de alumínio e à base de ferro são os produtos químicos mais populares usados para coagulação e processos de floculação (Bahadori *et al.*, 2013).

O elemento SiO_2 é proveniente da estrutura do solo (quartzo) presentes na água bruta captada (Nguyen *et al.*, 2022). Os demais elementos encontrados são

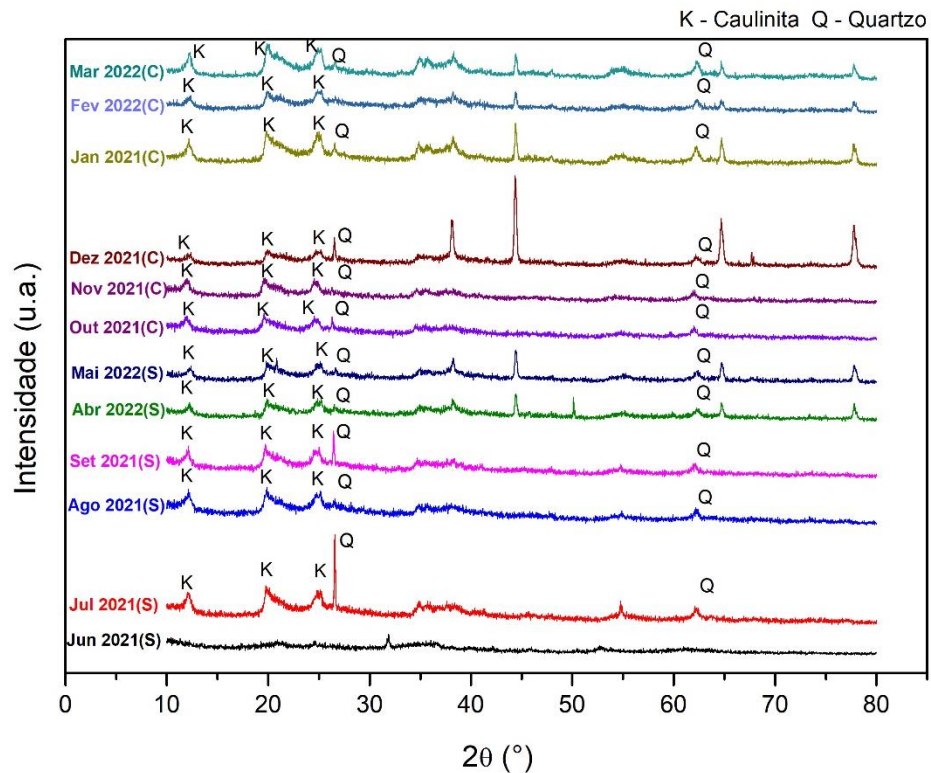
oriundos da composição da bacia hidrográfica de cada ETA. Os solos da região das ETAs do estudo apresentam área predominantemente do tipo Argissolo e do tipo Latossolo, caracterizados por apresentarem em sua composição óxidos de Al e Fe, minerais de argila, quartzo, entre outros minerais (Embrapa, 2006). Demonstrando a veracidade dos resultados obtidos nas análises.

6.6 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Na análise de Difração de Raios-X (DRX) das amostras de lodo provenientes da ETA CB e ETA CT (Figuras 35 e 36) foi identificado de forma constante nos períodos (S) e (C) pico de difração em torno do ângulo $26,6^\circ$ e 62° indicando a presença de cristais de quartzo (SiO_2) (Guzzo, 2008) e picos de difração em torno dos ângulos de 12° , 20° e 24° , que são característicos da presença da fase mineral caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Silva, 2001). Já no LETA da ETA CP, a estrutura cristalina encontrada também teve picos de difração em torno dos ângulos de 12° , 20° e 24° , que são característicos da fase mineral caulinita em quatro dos doze meses analisados, e picos de difração com definição em torno do ângulo $26,6^\circ$ e 62° que são características de quartzo em 3 meses dos doze analisados (Figura 37).

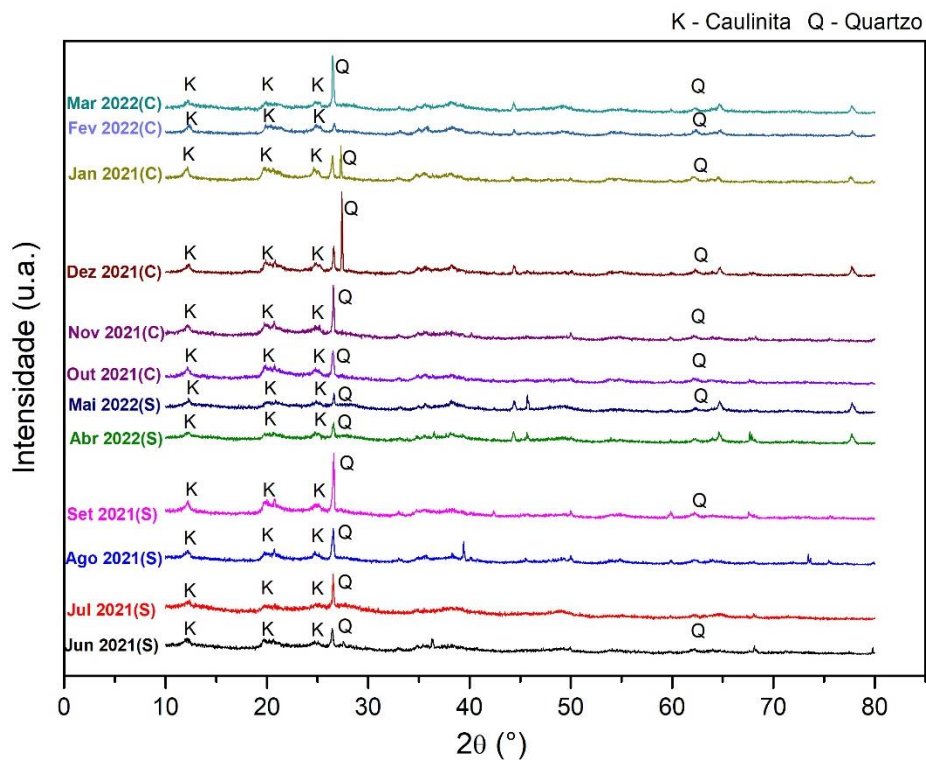
No mês de junho de 2021, na ETA CB, não foi detectado pico de caulinita, o que pode estar associado à ausência de coagulante à base de alumínio. Isso sugere uma possível influência das propriedades do produto químico utilizado no tratamento, já que o hidróxido de alumínio é capaz de adsorver partículas de argila, tornando mais evidente a presença do mineral caulinita nas análises.

Figura 35 - Resultados das análises de DRX nas amostras do lodo da ETA CB dos meses de junho de 2021 a maio de 2022.



Fonte: Próprio Autor.

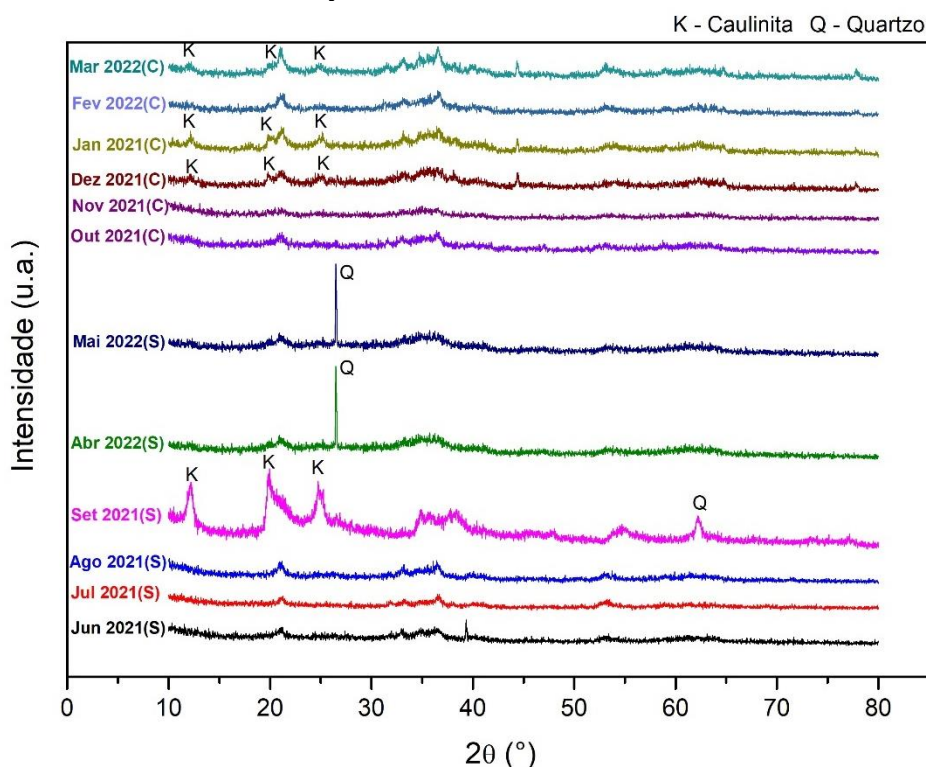
Figura 36 - Resultados das análises de DRX nas amostras do lodo da ETA CT meses de junho de 2021 a maio de 2022.



Fonte: Próprio Autor.

Na ETA CT, foram identificados picos de quartzo e caulinita em todos os meses analisados, indicando que esses minerais são os predominantes encontrados no LETA.

Figura 37 - Resultados das análises de DRX nas amostras do lodo da ETA CP dos meses de junho de 2021 a maio de 2022.



Fonte: Próprio Autor.

Durante os meses de setembro de 2021, dezembro, janeiro e março de 2022, tanto coagulante à base de alumínio quanto coagulante à base de ferro foram utilizados na ETA CP, resultando na detecção de caulinita nas análises de DRX. Isso sugere que a identificação da fase de caulinita pode estar associada às propriedades do produto químico utilizado no tratamento, especialmente o hidróxido de alumínio, que tem a capacidade de adsorver partículas de argila e tornar mais visível a presença do mineral caulinita nas análises.

As características mineralógicas entre as diferentes ETAs pode ser atribuída às diferenças nos processos de tratamento de água, nas características da água bruta captada e diferença na composição do solo da região de cada ETA. O quartzo (SiO_2) é um mineral comum encontrado em muitas rochas e tipos de solos. A caulinita

($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um mineral argiloso que pode ser encontrado em solos de regiões com características de Argissolos, (Ling *et al.*, 2017; Davarcioglu, 2011).

A identificação da caulinita corrobora com a localização da ETA CP em uma região onde predomina tipo de solo argissolo e com o a utilização de coagulante à base de alumínio

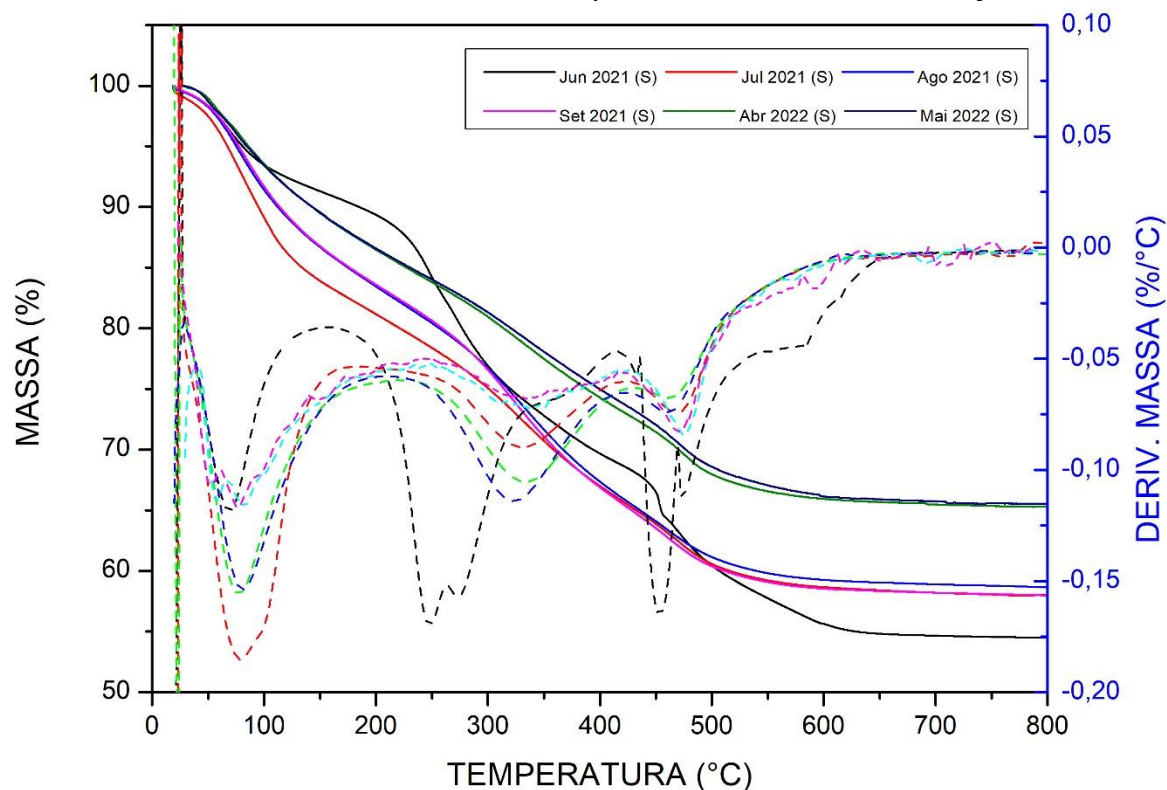
Igualmente, a identificação de cristais de quartzo e caulinita foram encontrados por González *et al.* (2020), Rozhkovskaya *et al.* (2021) e Agra *et al.* (2023), em seus respectivos estudos com lodo de ETA.

A presença de caulinita e quartzo é relevante para o processo de adsorção. El-Tawill *et al.* (2019) conseguiu remover 96% do mercúrio utilizando quartzo como adsorvente. Por sua vez, Quezada *et al.* (2022) estudou a adsorção de trifosfato em superfícies de caulinita e constataram a formação de interações por meio de ligações de hidrogênio, Assim como Boina *et al.* (2024) removeu efetivamente o corante reativo azul BF 5G até a ausência de cor.

6.7 COMPORTAMENTO TÉRMICO

As Figuras 38 e 39 apresentam as curvas de comportamento térmico do LETA da ETA CB, e estão detalhadas conforme os períodos sazonais, (S) e (C). Em análise, no período (S), houve perda de massa das amostras próximo a temperatura de 100°C, em média, $(7,90\% \pm 1,80)$. Entre 100°C e 250°C, a perda foi de aproximadamente $(10,20\% \pm 0,80)$ e, entre 250°C e 600°C a perda foi de $(21,20\% \pm 3,98)$. Após a temperatura de 600°C a massa não sofreu variação considerável. A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) evidenciou a presença de 3 processos endotérmicos.

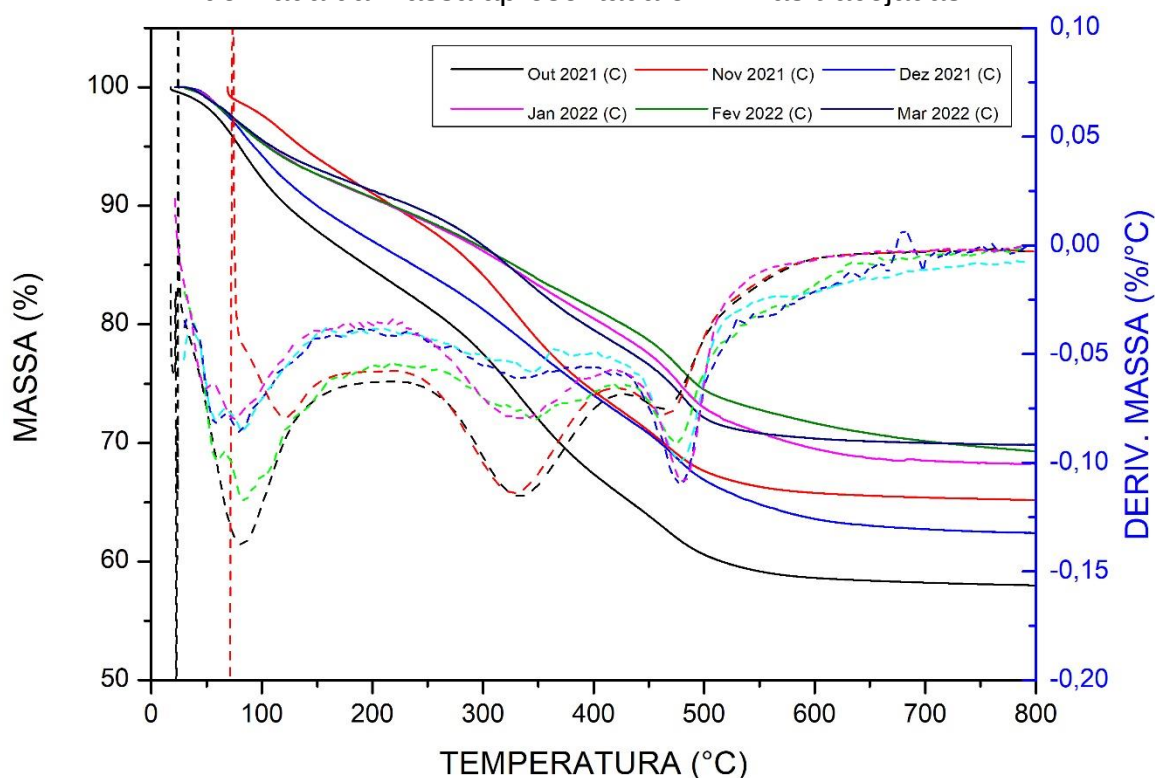
Figura 38 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CB referente aos seis meses de período de seca (S), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor.

Na análise correspondente ao período (C), térmico do LETA da ETA CB, foi constatada perda na massa das amostras próxima à temperatura de 100°C, com uma média de $(4,90\% \pm 1,75)$. Entre 100°C e 250°C, a perda foi aproximadamente $(8,30\% \pm 2,04)$, e entre 250°C e 600°C, a perda de massa foi de $(20,20\% \pm 2,19)$. Posteriormente à temperatura de 600°C, não foram observadas variações expressivas na massa, sendo que a análise de DSC evidenciou a ocorrência de 3 processos endotérmicos.

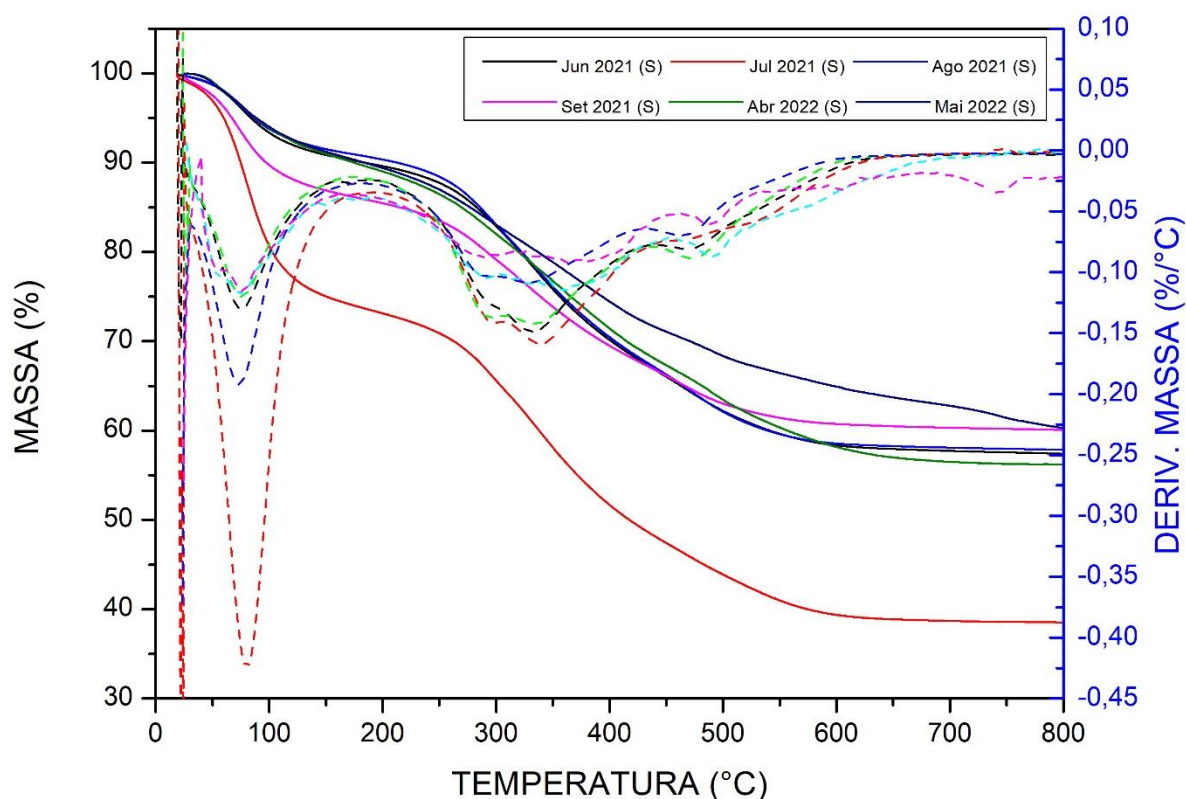
Figura 39 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CB referente aos seis meses de período chuvoso (C), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor.

As análises térmicas das amostras do LETA da ETA CT, durante os períodos sazonais, (S) e (C), ilustradas nas (Figuras 40 e 41), revelaram um comportamento térmico caracterizado por perdas de massa distintas em diferentes faixas de temperatura. Nas amostras do período (S), verificou-se, próximo a 100°C, uma perda média de massa de $(9,10\% \pm 5,28)$. Entre 100°C e 250°C, a perda de massa foi em torno de $(6,90\% \pm 1,61)$, enquanto entre 250°C e 600°C, a perda de massa foi de aproximadamente $(27,20\% \pm 3,87)$. Após a temperatura de 600°C, não foram observadas variações significativas na massa das amostras. A análise de DSC mostrou a ocorrência de 3 processos endotérmicos.

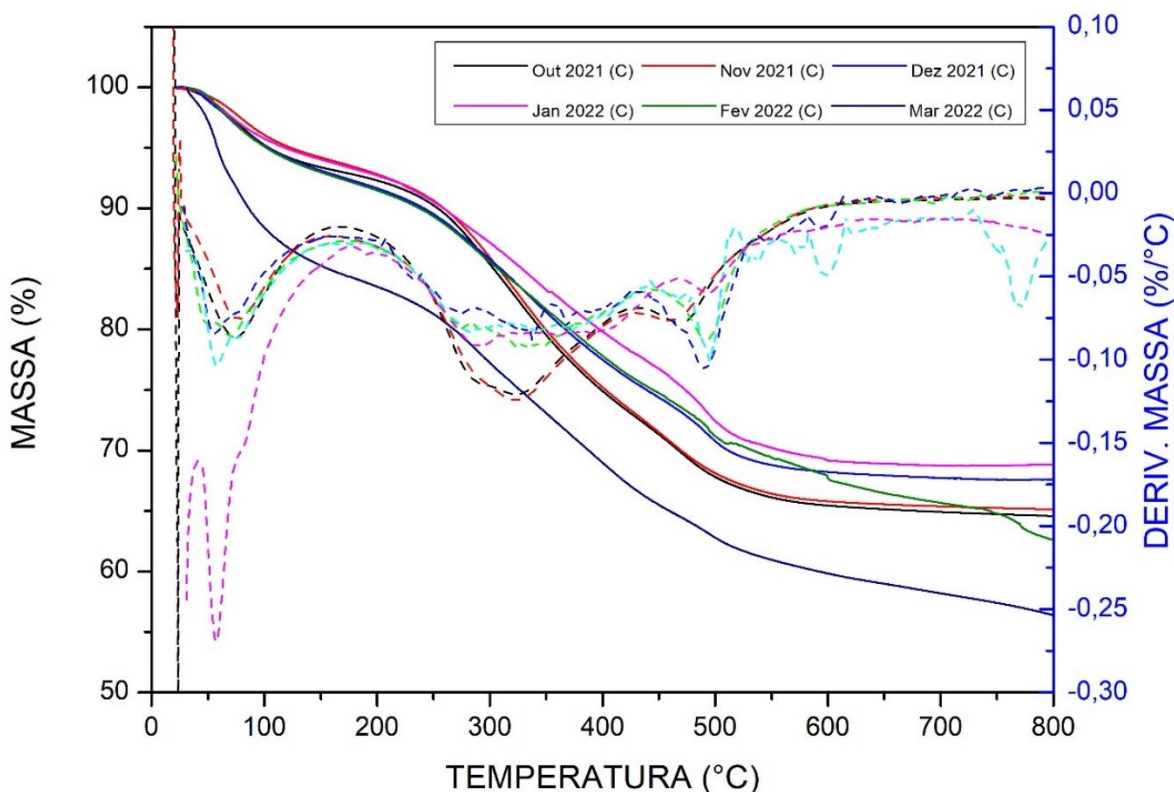
Figura 40 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CT referente aos seis meses de período de seca (S), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor.

Nas amostras de LETA CT no período (C), houve perda de massa das amostras próximo a temperatura de 100°C, em média ($5,70\% \pm 2,91$). Entre 100°C e 250°C, a perda de massa foi em torno de ($5,70\% \pm 0,76$), enquanto entre 250°C e 600°C, a perda de massa foi de aproximadamente ($22,60\% \pm 1,76$). Após a temperatura de 600°C, não foram observadas variações significativas na massa das amostras, e a análise de DSC indicou a presença de 3 processos endotérmicos.

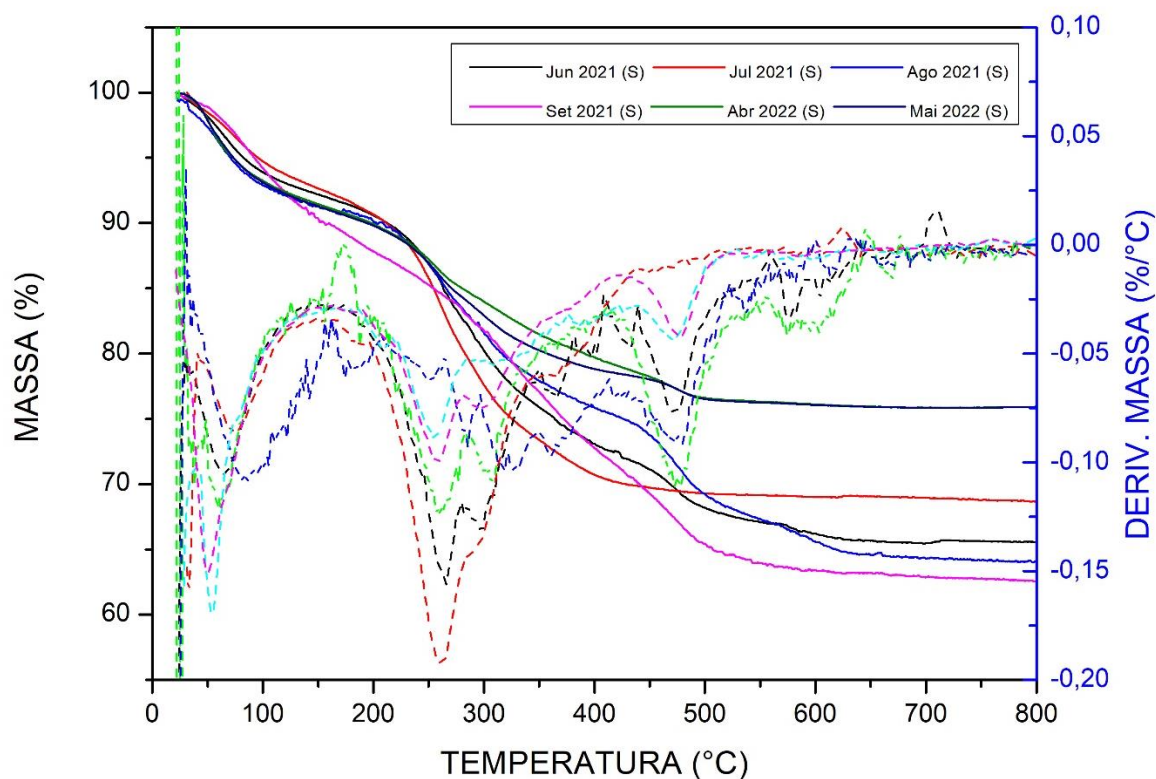
Figura 41 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CT referente aos seis meses de período chuvoso (C), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor.

Já as curvas de análise térmica das amostras de LETA da ETA CP, observadas nas (Figuras 42 e 43), mostra que no período (S) ocorre uma perda inicial média de massa a 100°C da ordem de $(6,30\% \pm 0,71)$, na faixa de temperatura entre 100°C e 250°C, foi observada uma perda de massa média de aproximadamente $(7,20\% \pm 1,41)$. Posteriormente, entre 250°C e 600°C, a perda de massa foi de cerca de $(17,10\% \pm 5,03)$. Após atingir a temperatura de 600°C, não foram registradas variações significativas na massa das amostras. A análise de DSC apresentaram a ocorrência de 4 processos endotérmicos.

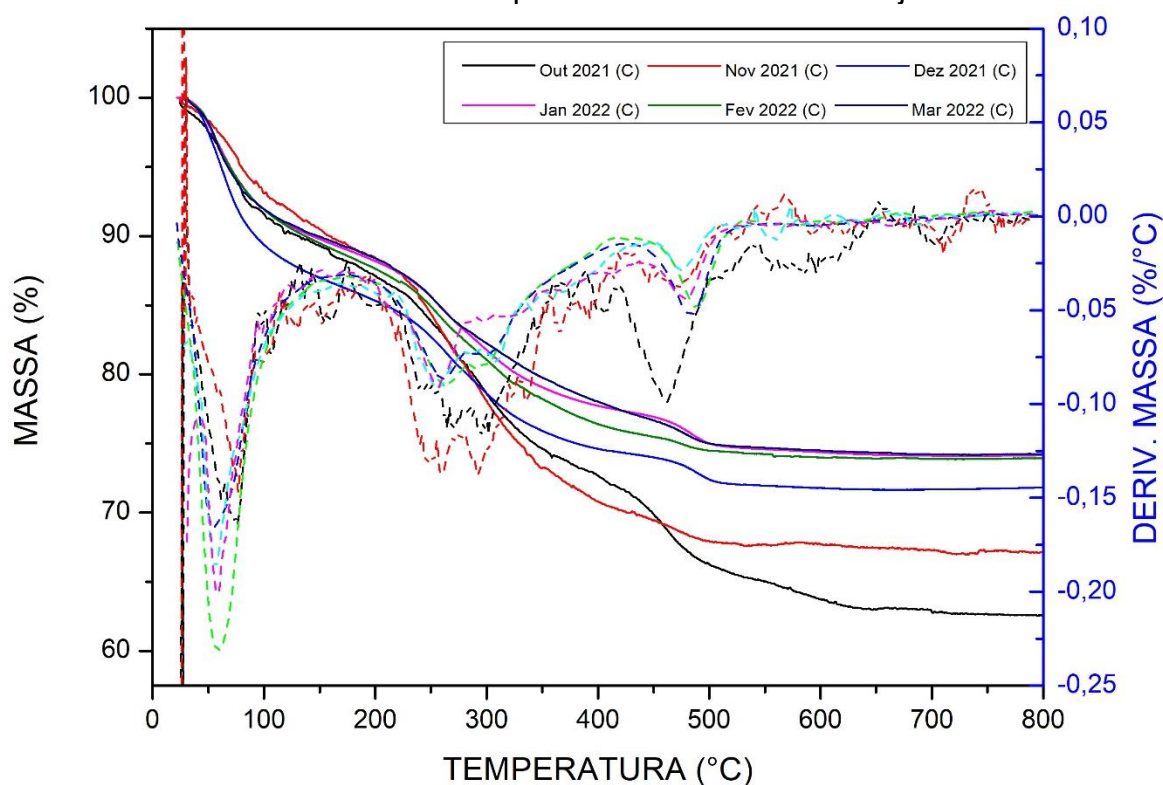
Figura 42 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CP referente aos seis meses de período de seca (S), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor.

Nas amostras de LETA da ETA CP durante o período (C), evidencia-se uma perda inicial média de massa em torno de $(8,40\% \pm 1,23)$ a 100°C . Na faixa de temperatura entre 100°C e 250°C , observa-se a perda média de massa de aproximadamente $(7,10\% \pm 0,94)$. Subsequentemente, entre 250°C e 600°C , a perda de massa é de cerca de $(13,50\% \pm 3,94)$. Após atingir a temperatura de 600°C , não se observam variações significativas na massa das amostras, sendo que estas manifestam a ocorrência de 3 processos endotérmicos.

Figura 43 - Amostras de análises térmicas do LETA da ETA CP referente aos seis meses de período chuvoso (C), perda de massa apresentada em linhas contínuas e derivada da massa apresentada em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor.

Em relação aos processos térmicos, de forma geral, as amostras analisadas sofreram perda de massa próximo a temperatura de 100°C devido à evaporação de água não estrutural. Em seguida, foram observadas duas perdas de massa distintas: entre 100°C e 250°C, referente à desidratação de hidróxidos e início da volatilização de matéria orgânica, e entre 250°C e 600°C, relacionada à volatilização de matéria orgânica e mudanças na estrutura dos minerais argilosos Gardolinski *et al.* (2003). Acima de 600°C, não houve perda de massa considerável. Foi também constatada a presença de processos endotérmicos em todas as amostras de LETA analisadas por DSC, esse comportamento térmico pode estar associado a processos como a desidratação, decomposição de compostos orgânicos, ou transições de fase, como a fusão de cristais.

A somatória da perda total média de massa do LETA CB foi de 39,30% no período (S) e 33,4% no período (C), revelando variação sazonal. No LETA CT a perda total média de massa foi de 43,20% no período (S) e 34,0% no período (C),

apresentando variação sazonal. Já No LETA CP a perda total média de massa foi de 30,60% no período (S) e 29,0% no período (C), evidenciando variação sazonal tênue.

Também é possível constatar a presença de variação espacial nos valores médios totais identificados nas ETAs deste estudo. No entanto, é observável que, em ambas as ETAs, a perda de massa é mais acentuada durante o período (S) em comparação com o período (C). Essa diferença é atribuída ao fato de que, durante os períodos de estiagem, há um aumento no carreamento de partículas na água captada, resultando em uma maior quantidade de matéria orgânica no LETA. Além disso, verifica-se uma maior perda de massa na faixa de temperatura entre 250°C e 600°C, onde ocorre a volatilização da matéria orgânica e alterações na estrutura molecular.

No entanto, a perda média total de massa das amostras do LETA na ETA CB foi aproximadamente de (36,35% $\pm$ 4,17). Na ETA CT, a perda média total de massa das amostras de LETA foi de (38,60% $\pm$ 6,54), enquanto, na ETA CP, a perda média total de massa das amostras de LETA foi de (29,08% $\pm$ 1,15).

De acordo com a investigação conduzida por Teixeira *et al.* (2006), o LETA oriundo de estações que utilizam coagulantes a base de Alumínio e a base de ferro, tiveram resultados semelhantes em relação a perda de massa, em seu estudo realizado com LETA de Presidente Prudente/SP os valores de perda de massa encontrados nas mesmas faixas de temperatura desse estudo, ficaram abaixo, na ordem de 25%, igualmente, Martins *et al.* (2022) que com o LETA de Presidente Prudente/SP obteve perda de massa na ordem de 20,5%. Agra *et al.* (2023) obtiveram valores de perda de massa de 23,5%, no LETA de Pernambuco/PE. Já Capana (2009) obteve 29,7% de perda de massa no LETA de Araraquara/SP.

A variação observada na perda de massa do LETA entre os diferentes trabalhos é atribuída à heterogeneidade espacial das características do LETA.

6.8 LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Os valores referentes aos limites de liquidez (LL - %) e limites de plasticidade (LP - %) do LETA das ETAs CB e CT foram obtidos a partir de 12 amostras coletadas, e seus respectivos valores médios estão apresentados na (Tabela 17). Por outro lado, no caso da ETA CP, somente os valores relacionados ao (LP) foram obtidos, uma vez que não havia uma quantidade suficiente de amostras para conduzir os ensaios

correspondentes ao (LL), posteriormente, o resultado do Índice de Plasticidade (IP - %) foi obtido a partir da subtração dos resultados de LL e LP.

Tabela 17 - Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) das amostras de LETA CB, CT e CP.

ETAs	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
CB	55,72 ± 6,49	41,35 ± 8,46	14,37 ± 10,22
CT	71,93 ± 17,01	67,35 ± 12,88	4,59 ± 15,47
CP	-	49,77 ± 8,61	-

Nota: (-) = Amostra não realizada

Fonte: Próprio Autor.

A análise estatística demonstrou uma variação significativa nos valores médios de (LL) e (LP) entre as ETAs CB e CT em termos de variação espacial. Em contraste, devido à ausência de ensaios de (LL) na ETA CP, esta foi submetida à análise estatística apenas no parâmetro (LP) em comparação com as ETAs CB e CT. Essa análise também indicou a existência de variação significativa nos valores em relação à variação temporal.

Tabela 18 - Resultados das análises estatísticas espacial de LL e LP.

Análise estatística espacial	
Limite de Liquidez	Pr>Fc= 0,000
Limite de Plasticidade	Pr>Fc= 0,000

Fonte: Próprio Autor.

O (IP) foi de 14,37% na ETA CB, e de 4,59% na ETA CT, o valor da ETA CB define o LETA como material de plasticidade média, segundo a classificação qualitativa de Burmister (1949), Braja e Sobhan (2007) definida para o intervalo de Índice de Plasticidade entre 10% e 20%. Cabe salientar que quanto maior for o intervalo plástico, ou seja, o valor do IP, mais plástico será.

De acordo com Araújo *et al.* (2015). A plasticidade é uma característica típica de solos argilosos e desempenha um papel fundamental como um requisito essencial para a matéria-prima utilizada na fabricação de materiais cerâmicos. Com plasticidade média (15%), o resíduo poderia ser aplicado para confecção de corpos cerâmicos, pois garantiriam uma retração média das peças moldadas (Araújo *et al.*, 2015).

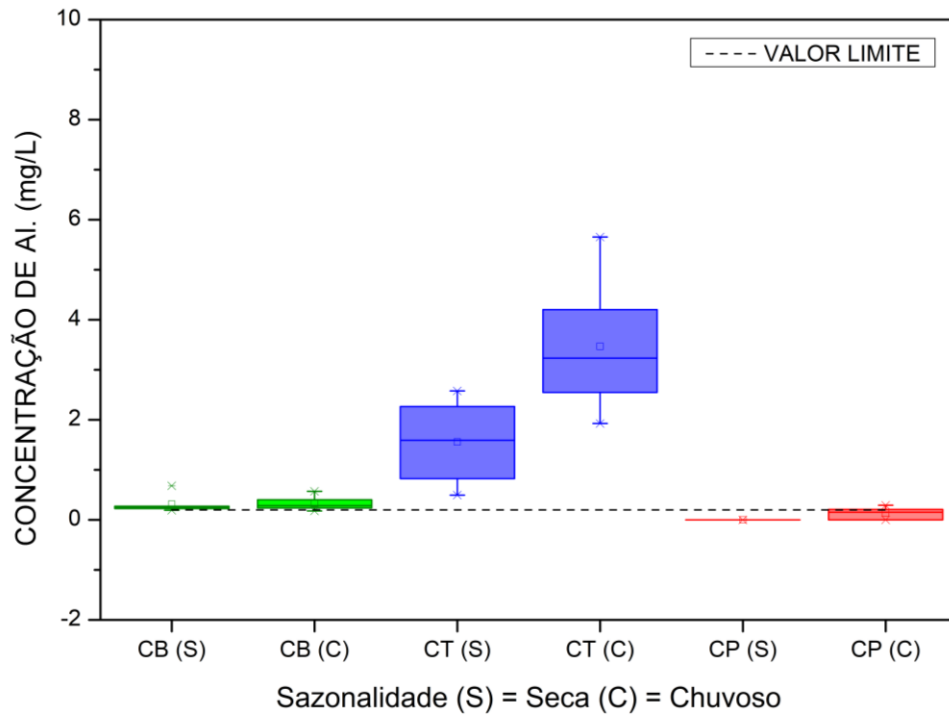
Similarmente Araújo *et al.*, (2015) obteve resultado do (LL) de 56%, e (LP) de 40%, resultando no (IP) de 16%, em uma ETA do estado de Goiás. Em estudo conduzido por Oliveira; Holanda (2008) foi encontrado resultado de (LL) de 73%, e (LP) de 53%, resultando no (IP) de 20% em uma ETA em Campos dos Goytacases/RJ. Da mesma forma Benlalla *et al.* (2015) encontrou (LL) de 63,6% e (LP) de 39,1% resultando em (IP) de 24,5% em uma ETA em Rabat/Marrocos, os valores que correspondem ao intervalo de 10% e 20%, ou superiores, conforme indicado por Burmister (1949), Braja e Sobhan (2007).

A variação nos valores de (LL) e (LP) em relação às ETAs pode estar associada às propriedades intrínsecas do solo, à carga biológica presente, incluindo microorganismos e plantas, bem como à presença de matéria orgânica.

6.9 ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

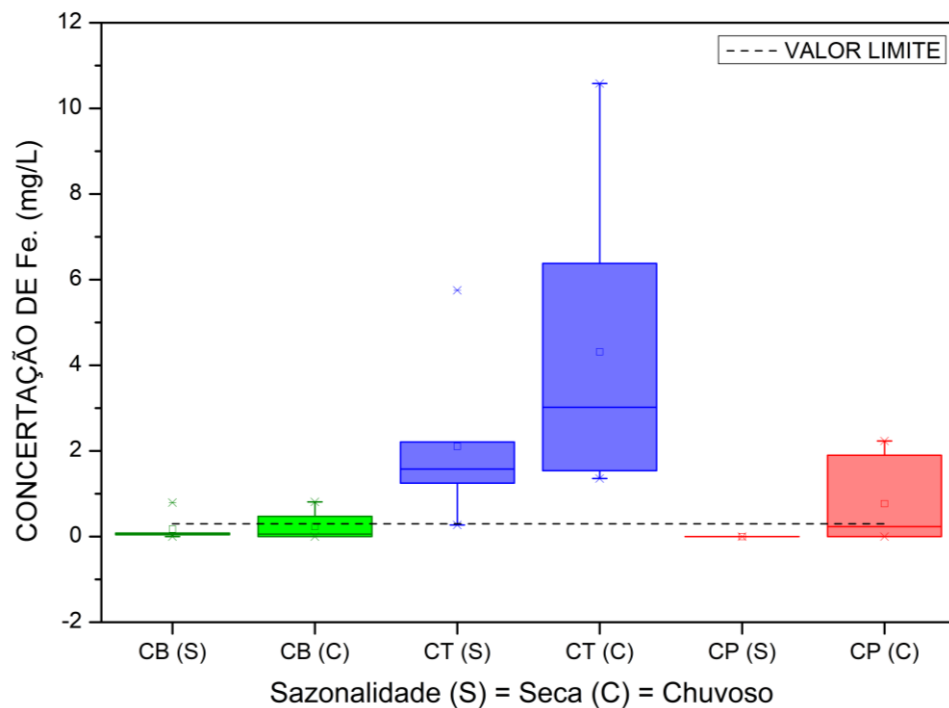
As concentrações encontradas de alumínio e ferro no extrato solubilizado dos LETAs CB, CT e CP foram apresentadas em diagrama de caixa (*boxplot*) e separadas por períodos, (S) e (C), também estão apresentados os limites máximos estabelecido pela ABNT NBR 10004 (2004) no Anexo G, que possibilitam a categorização dos lodos, sendo os limites máximos de alumínio de 0,2 mg/L e ferro de 0,3 mg/L. Os resultados estão presentes nas (Figuras 44 e 45).

Figura 44 - Diagrama de caixa com valores de concentração de alumínio (Al - mg/L) presente no LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 45 - Diagrama de caixa com valores de concentração de ferro (Fe - mg/L) presente no LETA da ETA CB, ETA CT e ETA CP, contemplando os doze meses de coletas e separados em período de seca (S) e período chuvoso (C).



Fonte: Próprio Autor.

A concentração média de alumínio no estrato solubilizado do LETA da ETA CB no período (S) foi de $(0,31 \text{ mg/L} \pm 0,18)$ e a concentração média de ferro foi de $(0,17 \text{ mg/L} \pm 0,30)$. Já a concentração média de alumínio no período (C) foi de $(0,32 \text{ mg/L} \pm 0,14)$, enquanto concentração média de ferro foi de $(0,23 \text{ mg/L} \pm 0,20)$.

A análise estatística indicou que não houve variação significativa nos valores de concentrações de alumínio nem nas concentrações de ferro, com ambos os valores de significância superiores a 5% em relação à sazonalidade. Ainda, as concentrações de alumínio indicaram valores acima do limite estabelecido pela norma, já as concentrações de ferro permaneceram abaixo do limite estabelecido.

No LETA CT a concentração média de alumínio no estrato solubilizado durante o período (S) foi de $(1,55 \text{ mg/L} \pm 0,89)$ e a concentração média de ferro foi de $(2,10 \text{ mg/L} \pm 1,89)$, no período (C) a concentração média de alumínio foi de $(3,46 \text{ mg/L} \pm 1,30)$, e a concentração média de ferro foi de $(4,32 \text{ mg/L} \pm 3,57)$.

A análise estatística revelou que não houve variação estatisticamente significativa nos níveis de concentração de ferro em relação à sazonalidade, contudo houve variação significativa nos níveis de concentração de alumínio, em relação à sazonalidade. No entanto, é importante ressaltar que as concentrações de alumínio e ferro evidenciaram valores acima do limite estabelecido pela norma regulatória.

No LETA CP. No período (C), a concentração média de alumínio foi registrada em $(0,20 \text{ mg/L} \pm 0,06)$, enquanto a concentração média de ferro atingiu $(1,15 \text{ mg/L} \pm 1,00)$. A falta de dados impede a análise da variação sazonal na ETA CP, entretanto, os valores das concentrações de alumínio indicam conformidade com os limites normativos, ao passo que as concentrações de ferro excedem os parâmetros estabelecidos pela norma regulatória.

Os resultados indicam a ausência de variação sazonal nos parâmetros analisados na ETA CB, enquanto na ETA CT, a variação sazonal ocorreu apenas nos níveis de alumínio. Na ETA CB, que emprega coagulante à base de alumínio, o elevado teor desse elemento está diretamente relacionado a essa prática, sendo que as concentrações de ferro se encontram dentro dos limites estabelecidos, indicando uma presença natural. Por outro lado, na ETA CT, ambas as concentrações excedem os limites preconizados, mesmo com a utilização de coagulante à base de alumínio. Por fim, na ETA CP, os valores de concentração de alumínio estão em conformidade

com os limites estabelecidos, enquanto as concentrações de ferro ultrapassam esses limites, devido ao uso de coagulantes à base de ferro.

Análises estatísticas evidenciaram a existência de variação significativa nos valores de concentrações de alumínio, e valores de concentrações de ferro, ao comparar as ETAs CB, CT e CP, indicando que as variações são apenas sazonais e não espaciais.

Tabela 19 - Resultados das análises estatísticas sazonal de ensaio de solubilizado.

Análise estatística sazonal			
	ETA CB	ETA CT	ETA CP
Concentração de Al.	Pr>Fc= 0,8867	Pr>Fc= 0,0148	-
Concentração de Fe.	Pr>Fc= 0,7280	Pr>Fc= 0,2110	-

Nota: (-) = Amostra não realizada

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 20 - Resultados das análises estatísticas espacial de ensaio de solubilizado.

Análise estatística espacial	
Concentração de Al.	Pr>Fc= 0,000
Concentração de Fe.	Pr>Fc= 0,000

Fonte: Próprio Autor.

Neste cenário, as concentrações de alumínio medidas nas ETAs CB e CT ultrapassaram os limites normativos, categorizando os resíduos resultantes do tratamento de água como resíduos sólidos não perigosos e não inertes (Classe II A). De maneira análoga, as concentrações de ferro nas ETAs CT e CP também ultrapassaram os limites estabelecidos.

Conforme Silva *et al.* (2012), foram identificadas concentrações de alumínio e ferro nos solubilizados de LETA acima dos padrões estabelecidos pela NBR. Em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada no município de Maringá/PR, as concentrações alcançaram 0,38 mg/l para alumínio e 1,32 mg/l para ferro.

Margem (2008) reportou concentrações de 13,4 mg/L de alumínio e 14,3 mg/L de ferro no extrato solubilizado do LETA no estado do Rio de Janeiro. Gheller (2021) observou concentrações de alumínio de 6,11 mg/l e ferro de 24,98 mg/l em uma ETA no estado de SP, além de concentrações de alumínio de 5,97 mg/l e ferro de 4,79 mg/l em uma ETA no estado do PR, corroborando a classificação do lodo de ETA como resíduo Classe II A.

Com o propósito de economia circular redirecionar do LETA, a presença excessiva de alumínio pode ocasionar impactos ambientais, contaminação de recursos hídricos, e efeitos adversos na vegetação e na saúde humana. Entretanto, para atenuar os impactos resultantes da solubilização de alumínio em água, é necessário adotar medidas como monitoramento regular, análises sistemáticas, utilização criteriosa, e implementação de tratamento prévio do LETA.

7 CONCLUSÃO

A análise das características do lodo permitiu avaliar os efeitos sazonais, considerando os períodos de seca e chuva, bem como os impactos espaciais associados à localização de distintas ETAs. Também, foram entendidas as influências das tecnologias de tratamento da água e remoção do lodo nas propriedades do material coletado.

Os resultados obtidos indicam que as características do lodo proveniente de três estações de tratamento de água apresentam variações significativas em função da sazonalidade, localização geográfica, tipo de coagulante utilizado e tecnologia empregada no tratamento.

A compilação dos dados obtidos resultou na criação de um banco de dados, essa iniciativa representa uma contribuição relevante para diversos setores, fornecendo informações aplicáveis em diferentes contextos relacionados à economia circular do lodo de ETA. O enfoque na disposição final ambientalmente adequada do lodo destaca a importância de considerações sustentáveis na gestão desses resíduos.

Assim, os resultados desta dissertação não apenas atenderam às metas estabelecidas, mas também iniciam uma base para futuras pesquisas e práticas, buscando a otimização do tratamento e destinação do lodo de ETA. Essas iniciativas estão alinhadas com os princípios da sustentabilidade e preservação ambiental, promovendo abordagens mais eficientes e responsáveis na gestão desse relevante subproduto do tratamento de água.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. J. O.; WENZEL, M. C.; ROCHA, G. H.; SILVA, S. R. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 192, p. 159-168, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10561**: águas: determinação de resíduo sedimentável (sólidos sedimentáveis): método do cone de Imhoff: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10664**: águas: determinação de resíduos (sólidos): método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1989.
- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, p. 115-122, 2013.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Riscos da destinação de lodos de ETAs: leis 9.605/1998 e 12.305/2010. *In*: EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, 43º., 2013, ASSEMBLÉIA NACIONAL DO ASSEMAE, 17., 2013, Vitória. **Anais [...]** Vitória: [s. n.], 2013. 2013.
- AGRA, T. M. S.; LIMA, V. M. E.; BASTO, P. E. A.; MELO NETO, A. A. Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 236, p. 1-11, 2023.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept, **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 124, 2016, P 1-13, 2016.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. **Procedia Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 35, p. 950-955, 2016.

ALMEIDA, M. C.; SILVA, M. M.; DE PAULA, M. Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água em relação à turbidez, cor e pH da água. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Salvador, v. 5, n. 1, p. 25-40, 2017.

ALTIZER, S.; OSTFELD, R. S.; JOHNSON, P. T.; KUTZ, S.; HARVELL, C. D. Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework. **Science**, Washington, v. 341, n. 6145, p. 514-519, 2013.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019.

AMÂNCIO, D. V.; RODRIGUES, F. N.; RIBEIRO, K. D.; COELHO, G. Caracterização do lodo gerado numa estação de tratamento de água. **Sustentare**, Três Corações, v. 1, n. 1, p. 29-44, 2017.

ANDRADE, J. J. O.; WENZEL, M. C.; ROCHA, G. H.; SILVA, S. R. Performance of rendering mortar containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 192, p. 159-168, 2018.

ANDREOLI C.V. **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 282 p. Projeto PROSAB.

ARAÚJO, F. D. C.; SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A.; ANGELIM, R. R. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 450-456, 2015.

AUDEBERT, A.; FOFANA, M. Rice yield gap due to iron toxicity in West Africa. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 195, p. 6676, 2009.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA. **Report a Disposal of Sludge from Water Treatment Plant**. New York: AWWA, 2011.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, New York, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.

BAHADORI, A.; CLARK, M.; BOYD, B. **Essentials of water systems design in the oil, gas, and chemical processing industries**. Berlin: Springer, 2013.

BALLOU, I.; KOUNBACH, S.; NAJA, J.; BAKHER, Z. E.; LARAKI, K.; RAIBI, F.; SAADI, R.; KHOLTEI, S. A new approach of aluminum extraction from drinking water treatment sludge using ammonium sulfate roasting process. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 189, p. 107859, 2022.

BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 118, p. 171-177, dez. 2015.

BENSITEL, N.; HABOUBI, K.; AZAR, F. Z.; HAMMOUDANI, Y. E.; ABDOUNI, A. E.; HABOUBI, C.; DIMANE, F.; KASMI, A. E. Potential reuse of sludge from a potable water treatment plant in Al Hoceima city in northern Morocco. **Water Cycle**, Beijing, v.4, p.154-162, 2023.

BERNARDO, L.; BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2002.

BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2008.

BERNARDO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2011.

BITENCOURT, G. A. **Caracterização ecotoxicológica de lodo gerado em estação de tratamento de água**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BOHORQUEZ G., K.; PACHECO, E.; GUZMÁN, A.; AVILA PEREIRA, Y.; CANO CUADRO, H.; VALENCIA, J.A.F. Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, Oxford, v. 23, p. 1-10, 2020.

BOINA, R. F.; ESTEVAM, B. R.; FREITAS, R. F.; RODRIGUES, J. M. M.; BONA, W. L. de O.; SALES, D. H.; SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; PEREIRA, N. C. Ceramic adsorbent material in removing reactive blue bf 5G dye from synthetic wastewater. **Separation And Purification Technology**, Oxford, v. 331, p. 125555, mar. 2024.

BOTERO W. G.; SANTOS A.; OLIVEIRA L. C.; ROCHA J. C. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química nova**, São Paulo, v. 32, p. 2018-2022, 2009.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 15. ed. Columbus: Pearson, 2016.

BRAJA, M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 561 p.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 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, seção 1, n. 147, p. 3-7, 03 ago. 2010. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=3&data=03/08/2010>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998: dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, n. 31, p. 1-5, 13 fev. 1998. Disponível em:

<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=13/02/1998&jornal=1&pagina=25&totalArquivos=128>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981: dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *In*: CODEX Ambiental. Brasília, DF: Âmbito Comercial, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021: Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, n. 96, p. 69-79, 21 maio 2021. Disponível em:

<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=515&pagina=69&data=24/05/2021>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011: Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, n. 239, p. 39-46, 14 dez. 2011. Disponível em:

<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=14/12/2011&jornal=1&pagina=46&totalArquivos=192>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Resolução CONAMA n.º 430 de 13 de maio de 2011: dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89-91, 16 maio de 2011. Disponível em:

<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=16/05/2011&jornal=1&pagina=91&totalArquivos=132>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BURMISTER, D. M. Annual highway research board meeting. **National Research Council**, Washington, v. 13, n. 8 p. 121-136, 1949.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p.

CAPANA, A. S. **Caracterização e estudo do comportamento térmico de resíduo (lodo) proveniente de estações de tratamento de água e de esgoto do município de Araraquara-SP**. 2009. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 1985.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos: vol. 6. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARNEIRO, C.; WEBER, P. S.; ROSS, B. Z. L.; GERVASONI, R.; SIMON, P. L.; MORO, B. G.; MOTTA, A. C. V. Caracterização do Lodo de ETA gerado no Estado do Paraná. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Lodo de estações de tratamento de água**: gestão e perspectivas tecnológicas. Curitiba: SANEPAR, 2013. p.131-178.

CASTANEDA, L.F.; RODRÍGUEZ, J.F.; NAVA, J.L. Electrocoagulation as an affordable technology for decontamination of drinking water containing fluoride: a critical review. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 413, p. 1-18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127529>.

CHOO, G.; OH, J. E. Seasonal occurrence and removal of organophosphate esters in conventional and advanced drinking water treatment plants. **Water Research, Oxford**, Oxford, v. 186, p. 1-6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116359>.

CORDEIRO, J. S. **O Problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água**. 1993. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia, USP, São Carlos, 1993. 342 f.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (coord.). **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. cap. 5, p. 121-142.

CORREIA, J. E. **Caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto Contorno**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.

CREMADES, L. V.; CUSIDO, J. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 201, p. 1071-1080, 2018.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Banco de dados hidrológicos no estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE, 2023.

DASSANAYAKE, K.; JAYASINGHE, G.; SURAPANENI, A.; HETHERINGTONNE, C. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, Oxford, v. 38, p. 321-335, 2015.

DATAGEO. Datageo Sistema Ambiental Paulista. **Camadas disponíveis**. São Paulo: DATAGEO, 2023. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/#>. Acesso em: 28 abr. 2024.

DAVARCIOGLU, B. Spectral characterization of non-clay minerals found in the clays (Central Anatolian-Turkey). **International Journal of the Physical Sciences**, Landover, v. 6, n. 3, p. 511-522, 2011.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. **Resources Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 145, p. 148-159, 2019.

GODOY, L.G.G.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R.; COSTA, E. B.; DALT, S.; ANDRADE, J.J. O. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 223, p. 939-950, 2019.

DING, W.; JIN, W.; CAO, S.; ZHOU, X.; WANG, C.; JIANG, Q. Ozone disinfection of chlorine-resistant bacteria in drinking water. **Water Research**, Oxford, v. 160, p. 339-349, 2019.

PARLAMENTO EUROPEU E O CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho: dispõe sobre a de relativa aos resíduos e que revoga certas directivas. **Jornal Oficial da União Europeia**, Luxemburgo, v. 312, p. 3-28, 19 nov. 2008. (Texto relevante para efeitos do EEE). Disponível em: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:pt:P> DF. Acesso em 29 abr. 2024.

DOUTERELO, I.; DUTILH, B.E.; CALERO, C.; ROSALES, E.; MARTIN, K.; HUSBAND, S. Impact of phosphate dosing on the microbial ecology of drinking water distribution systems: fieldwork studies in chlorinated networks. **Water Research**, Oxford, v. 187, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116416>.

DUBE, S.; MUCHAONYERWA, P.; MAPANDA, F.; HUGHES, J. Effects of sludge water from a water treatment works on soil properties and yield and elemental uptake of brachiaria decumbens and lucerne (Medicago sativa) **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 208, p. 335-343, 2018.

EL-DIDAMONY, H.; KHALIL, K. A.; HEIKAL, M. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. **HBRC Journal**, Cairo, v. 10, p. 73-81, 2014.

EL-TAWIL, R. S. *et al.* Silver/quartz nanocomposite as an adsorbent for removal of mercury (II) ions from aqueous solutions. **Heliyon**, London, v. 5, n. 9, p. 1-9, 2019

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Drinking water treatment plant residuals management technical report**. Washington: EPA, 2011.

EQMA ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Portifólio**. São Paulo: EQMA, 2018. Disponível em: <http://www.eqma.com.br/portifolio.html>. Acesso em: 29 abr. 2024.

ESCOBAL, A. D.; ACHON, C. L. Uso de diferentes tipos de geotêxtil no desaguamento de resíduos gerados em estações de tratamento de água. **Fundações e Obras Geotécnicas**, São Paulo, ano 7, n. 76, p. 28-32, 2017.

EXLEY, C. The toxicity of aluminium in humans. **Morphologie**, Issy les Moulinaux Cedex, v. 100, p. 51-55, 2016.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 529-535, 20 dez. 2019.

FERRETTI, M; TIRELLO, R. A. Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais. **Revista CPC**, São Paulo, n. 7, p. 74-98, 2009.

FINLAY, N. **Using water treatment residual to immobilise lead for in-situ remediation of contaminated soil**. 2015. Thesis (Doctor of Philosophy) – Durham University, Durham, 2015.

FRANCO, N. M. **Manejo de lodo de Estação de Tratamento de Água, visando ao aproveitamento na agricultura como condicionante de solos**. 2019. Trabalho de formatura (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

FREELAND, R. S. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. **Transactions of the ASAE**, Michigan, v. 32, n. 6, p. 2190 -2194, 1989.

FUJIOKA, T.; UEYAMA, T.; MINGLIANG, F.; LEDDY, M. Online assessment of sand filter performance for bacterial removal in a full-scale drinking water treatment plant. **Chemosphere**, Oxford, v. 229, P. 509–514. 2019.

FUJIWARA, M. Outline of sludge treatment and disposal at water purification plant in Japan. In: JAPAN AND SINGAPORE WORKSHOP AND SYMPOSIUM, 1st., 2011, [s. l.]. **Proceedings** [...] [s. l.: s. n.], 2011.

GARDOLINSKI, J. E.; MARTINS FILHO, H. P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. **Química nova**, São Paulo, v. 26, p. 30-35, 2003.

GASTALDINI, A.L.G.; HENGGEN, M.F.; GASTALDINI, M.C.C.; AMARAL, F. D.; ANTOLINI, M. B.; COLETTI, T. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 94, p. 513-520, 2015.

GERVASONI, R. **Caracterização e avaliação do potencial de destinação do lodo de estações de tratamento de água do estado do Paraná**. 2014. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

GHELLER, M. B. **Estabilização e solidificação de resíduos de ETA em matrizes de concreto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.

GHORPADE, A.; AHAMMED, M. M. Water treatment sludge for removal of heavy metals from electroplating wastewater. **Environmental Engineering Research**, Seoul, v. 23, n. 1, p. 92-98, 2018.

GOMES, S. D. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, conservation and recycling**, Amsterdam, v. 145, p. 148-159, 2019.

GONZÁLEZ, K. B.; PACHECO, E.; GUZMÁN, A.; PEREIRA, Y. A.; CUADRO, H. C.; VALENCIA, J. A. F. Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, Oxford, v. 23, p. 1-10, jun. 2020.

GUZZO, P. L. Quartz. *In*: GUZZO, P. L. **Rochas e minerais industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 681-721.

HAGEMANN, S. E.; GASTALDINI, A. L. G.; COCCO, M.; JAHN, S. L.; TERRA, L. M. Synergic effects of the substitution of portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 214, p. 916-926, 2019.

HILLEBRAND, F. J.; BENETTI, A. D. Caracterização da matéria orgânica dissolvida em processos de tratamento de água para consumo humano usando fracionamento rápido. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 237-246, 2020.

HUANG, C. H.; WANG, S. Y. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 43, p. 174-183, 2013.

IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K. A.; ELLIOT, H. A. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 40, p. 1-12, 2011.

JING, F.; HUI, B.; YUDAN, X.; RUI, Z.; PULI, Z.; DUO, B.; ZENG, D.; WEI, L.; XUEBIN, L. Recycling of iron and aluminium from drinking water treatment sludge for synthess of a magnetic composite material (ALCS-Fe-AL) to remove fluoride from drinking water. **Groundwater for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 11, p. 1-9, 2020.

JUCOSKI, G. O.; CAMBRAIA, J.; RIBEIRO, C.; OLIVEIRA, J. A. Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em *Eugenia uniflora* L.1. **Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 4, p. 720-728, 2016.

JURAS, I. A. G. M. **Legislação sobre resíduos sólidos**: exemplos da Europa, Estados Unidos e Canadá. Brasília, DF: Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, 2005.

KANG, S.; CHOI, J. H.; PARK, J-G.; BAEK, K. Pellet adsorbent derived from molasses and dewatered alum sludge for arsenic removal, **Journal of CO₂ Utilization**, Amsterdam, v. 33, p. 31-36, 2019.

KEELEY, J.; JARVIS, P.; SMITH, A.D.; JUDD, S.J. Reuse of recovered coagulants in water treatment: an investigation on the effect coagulant purity has on treatment performance. **Separation and Purification Technology**, Oxford, 131, 69 e 78, 2014.

KING, P.H.; CHEN, B.H.H.; RANDALL, C.W. Alum recovery from representative water treatment plant sludges. **Journal AWWA**, Denver, v. 68, n. 4, p. 204-207, 1976.

KUMARI, S.; KUMAR, R.N. River water treatment using electrocoagulation for removal of acetaminophen and natural organic matter. **Chemosphere**, Oxford, v. 273, p. 1-10, 2020.

LEONETI, A. B; PRADO, E. L; OLIVEIRA, S. V. W. B. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 2, p. 331-348, 2011.

LI, J.; HE, J.; LI, Y.; LIU, Y.; LI, W.; WU, N. Assessing the threats of organophosphate esters (flame retardants and plasticizers) to drinking water safety based on USEPA oral reference dose (RfD) and oral cancer slope factor (SFO). **Water Research**, Oxford, v. 154, p. 84-93, 2019.

LI, Z.; JIANG, N.; WU, F.; ZHOU, Z. Experimental investigation of phosphorus adsorption capacity of the waterworks sludges from five cities in China. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 53, p. 165-172, 2013.

LIMA, R.S.R.; LIMA, R.; OKANO, N.H. **Saneamento ambiental**. Curitiba: CREA-PR, 2016.

LING, Y. P.; THAM, R.; LIM, S.; FAHIM, M.; OOI, C.; KRISHNAN, P.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plantas a green clay substituent. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 143, p. 300-306, 2017.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; CHOW, C. W.; KEEGAN, A.; MA, J.; HALL, C; WANG, L. Cementitious composites containing alum sludge ash: an investigation of microstructural features by an advanced nanoindentation technology. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 299, p. 1-9, 2021.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; CHOW, C. W.; KEEGAN, A.; PHAM, P. N.; LI, D.; QIAN, G; WANG, L. Recycling drinking water treatment sludge into eco-concrete blocks with CO₂ curing: Durability and leachability. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 746, p. 1-10, 2020.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; CHOW, C.W.K.; KEEGAN, A.; PHAM, P.N.; LI, D.; OH, J.A.; SIDDIQUE, R., 2021. The potential use of drinking water sludge ash as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete blocks. **Resources Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 168, p. 1-9, 2021.

LUND, E.D; COLIN, P.E; CHRISTY, D; DRUMMOND, P.E. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. *In*:INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., St. Paul, 1998. MN. **Proceedings [...]** St. Paul: ASA/CSSA/SSSA, p. 1089 -1100. 1998.

MALLORY, A.; AKROFI, D.; DIZON, J.; MOHANTY, S.; PARKER, A.; VICARIO, D. R.; PRASAD, S.; WELVITA, I.; BREWER, T.; MEKALA, S.; BUNDHOO, D.; LYNCH, K.; MISHRA, P.; WILLCOCK.; HUTCHINGS, P. Evaluating the circular economy for satiation: Findings from multicase-approach. **Science of Total Environment**, Amsterdam, v. 744, p. 1-10, 2020.

MARASCHIN, M.; FERRARI, K. F. H.; CARISSIMI, E. Acidification and flocculation of sludge from a water treatment plant: new action mechanisms. **Separation And Purification Technology**, Oxford, v. 252, p. 1-8, 2020.

MARGEN, J. I.; **Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água (e.t.a.) em cerâmica vermelha**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Goytacazes, 2008.

MARTINS, D. S.; ESTEVAM, B. R.; PEREZ, I. D.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; ISIQUE, W. D.; BOINA, R. F. Sludge from a water treatment plant as an adsorbent of endocrine disruptors. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 10, n. 4, p. 1-10, ago. 2022

MENDES R. L.; FERREIRA FILHO S. S.; SCIAN J. B.; Desaguamento mecânico por filtro prensa de placas de lodos gerados em estações de tratamento de água. *In*: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ABES, 2001.

MENEZES, M. P. **Gerenciamento do Resíduo Sólido Oriundo de Estação de Tratamento de Água e Estudo da Disposição no Meio Ambiente**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Química Agroindustrial) – CEFET, Goiânia, 2006.

MESSIAS, T.G. **Avaliação ecotoxicológica de lodo gerado por estação de tratamento de água**. 2013. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

METCALF; EDDY, Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2003.

MIROSLAV, KYNCL. Opportunities for water treatment sludge reuse. **GeoScience Engineering**, Ostrava, v. 54, n. 1, p. 11-22, 2008.

MONTEIRO, N. B.; SILVA, C. R. S.; TAVERES, R. G.; ROCHA, E. E. M.; SOBRINHO, M. A. M. Avaliação do deságue de lodo físico-químico de estação de tratamento de água por geotêxteis. **Revista AIDIS**, México, v. 11, n. 2, p. 266-277, 2018.

NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER., C. C.; LEME, T. G. **Livro de referências de materiais comuns e economicamente relevantes: filossilicatos**. Rio Claro: Museu de minerais, minérios e rochas Heinz Ebert, 2017.

NGUYEN, M. D.; THOMAS, M.; SURAPANENI, A.; MOON, E. M.; MILNE, N. A. Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. **Environmental Technology and Innovation**, Amsterdam, v. 28, p. 102651, 2022.

NIE. F; LI. Y; TONG. K; WU. B; ZHANG. M; REN. W; XIE. S; LI. X. Volatile evolution during thermal treatment of oily sludge from a petroleum refinery wastewater treatment plant: TGA-MS, PY-GC(EGA)/MS and kinetics study. **Fuel**, Oxford, v. 278, p. 118332, out. 2020.

NOVAK, J. T., KNOCKE, W. G., DOVE, D.; TAYLOR, A.; MUTTER, R. An assessment of cropland application of water treatment residuals. **Research Foundation and American Water Work Association**, Kansas City, 1995. Estudo publicado pelo AWWA.

O'KELLY, B.C. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. **Geotechnical Research**, London, v. 3, n. 4, p. 148-179, 2016.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, p. 167-173, 2008.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, p. 324-330, 2004.

PAPAGEORGIOU, A.; VOUTSA, D.; PAPADAKIS, N. Occurrence and fate of ozonation byproducts at a full-scale drinking water treatment plant. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 481, p. 392-400, 2014.

PEREIRA, F. R.; NUNES, A. F.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Refractory formulations made of different wastes and natural sub-products. **Key Engineering Materials**, Baech, v. 264-268, p. 1743-174, 2004.

PIEPER, K. M. C. **Avaliação do uso de geossintético para o deságue e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PINCELLI, A. L. S. **Desenvolvimento e ensaios de um sistema de mensuração de condutividade elétrica do solo**. 2004. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORRAS, A. C. **Uso de lodo de estação de tratamento de água e agregado reciclado miúdo na fabricação de elementos de alvenaria**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

QUEZADA, G. R. *et al.* Describing the adsorption of sodium tripolyphosphate on kaolinite surfaces in a saline medium by molecular dynamics. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 175, p. 107280, 2022.

RICHTER, C.A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da Estação de Tratamento de Água Taiaçupeba. **Geotecnia**, Coimbra, n. 151, p. 33-52, 2021.

ROZHKOVSKAYA, A; RAJAPAKSE, J; MILLAR, G.J. Synthesis of high-quality zeolite LTA from alum sludge generated in drinking water treatment plants. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 104751, abr. 2021.

SABESP. Sabesp, 2023. **Tratamento de água**. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=47>. Acesso em: 22 abr. 2024.

SAIANI, C.C.S; TONETO JÚNIOR, R. Evolução do acesso a serviços de saneamento básico no Brasil (1970 a 2004). **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 19, n. 1, 2010.

SANTANA, J. E. **Estudo do lodo da ETA Agrestina Nova para adição em componentes cerâmicos e na obtenção de argilas aniônicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. revista e ampliada. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SANTOS, G.Z.B.; MELO FILHO, J.A.; PINHEIRO, M., MANZATO, L. Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 249, p. 109328, 2019.

SÃO PAULO (Estado) Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, v. 116, n. 51, p. 1-4, 2006. Disponível em: https://www.imprensaoficial.com.br/DO/BuscaDO2001Documento_11_4.aspx?link=%2f2006%2fexecutivo%2520secao%2520i%2fmarco%2f17%2fpag_0001_4MITFQJMRB8UMe3RH56QL6F3324.pdf&pagina=1&data=17/03/2006&caderno=Executivo%20I&paginaordenacao=100001. Acesso em 22 abr. 2024.

SILVA, S.P. Caulim. *In*: DNPM-PA. **Balanço mineral brasileiro**. Brasília, DF: DNPM-PA, 2001. p. 1-13.

SÃO PAULO (Estado). COORDENADORIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Sistema integrado de gerenciamento de recursos hídricos (SIGRH)**. São Paulo: COORDENADORIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2023.

SILVA, C. A.; SILVEIRA, C.; SILVA, F. A.; KLEN, M. R. F.; BERGAMASCO, R. Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes pac e moringa oleífera. **Engevista**, Niterói, v. 24, n. 3, p. 302309, 2012.

SINGH, S.; TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SHARMA, S.; DUBEY, N.K.; CHAUHAN, D. K.; VACULÍK, M. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v.137, p. 177193, mai. 2017.

SISWOYO, E.; QONIAH, I.; LESTARI, P.; FAJIRI, J. A.; SANI, R. A.; SARI, D. G.; BOVING, T. Development of a floating adsorbent for cadmium derived from modified drinking water treatment plant sludge. **Environmental Technology & Innovation**, Amsterdam, v. 14, p. 1-9, 2019.

SMIDERLE, J. J. **Estudo de viabilidade para destinação final do lodo da ETA Laranjal/RJ**. 2016. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. 99f.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004., 2004.

TALVY, S.; DEBASTE, F.; MARTINELLI, L.; CHAUVEHEID, E.; HAUT, B. Development of a tool, using CFD, for the assessment of the disinfection process by ozonation in industrial scale drinking water treatment plants. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 66, n. 14, p. 3185-3194, 2011.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA N.; MÓDENES A. N.; PIANARO S A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, p. 288-293, 2011.

TEIXEIRA, C. E. **Sobre a teoria da difração de raios-X em estruturas tridimensionais**. 2014. Dissertação (Mestrado em engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, A. S.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 53, p. 561-565, 2011

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, p. 215-220, 2006.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações e tratamento de água do Estado de São Paulo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais** [...] João Pessoa: ABES, 2001.

USEPA - NORTH AMERICAN STANDARD - Standard for the use or disposal of sludge of sewer. *In*: CRF. **Code of Federal Regulations**, Part 503, 2004, 44p. EPA 40

VANDERMAESEN, J.; HOREMANS, B.; DEGRYSE, J.; BOONEN, J.; WALRAVENS, E.; SPRINGAEL, D. The pesticide mineralization capacity in sand filter units of drinking water treatment plants (DWTP): consistency in time and relationship with intake water and sand filter characteristics. **Chemosphere**, Oxford, v. 228, p. 427-436, 2019.

VIANA, C.C.; RODRIGUES, F.N.; RIBEIRO, K.D. Caracterização físico-química e biológica do lodo gerado em Estação de Tratamento de Água (ETA). *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE. 4., 2014, Bento Gonçalves. **Anais** [...] Bento Gonçalves: UCS, 2014.

VOGEL, A. I. **Química analítica qualitativa**. 5ª ed. São Paulo: Ed. Mestre Jou, 1981.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 96, p. 282-289, jun. 2015.

YANG, J.; REN, Y.; CHEN, S.; ZHANG, Z.; PANG, H.; WANG, X.; LU, J. Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 365, p. 130027, fev. 2023.

ZAMORA, R.M.; AYALA, F.E.; GARCIA, L.C.; MORENO, A.D.; SCHOUWENAARS, R. Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges. **Journal of Environmental Science and Health. Part A: Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering**, New York, v. 43, p. 1562-1568, 2008.

ZENG, F.; CAO, S.; JIN, W.; ZHOU, X.; DING, W.; TU, R. Inactivation of chlorineresistant bacterial spores in drinking water using UV irradiation, UV/Hydrogen peroxide and UV/Peroxy monosulfate: efficiency and mechanism. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 243, p. 1-9, 2020.

ZHOU, Z.; YANG, Y.; LI, X.; ZHANG, Y.; GUO, Xuan. Characterization of drinking water treatment sludge after ultrasound treatment. **Ultrasonics Sonochemistry**, Oxford, v. 24, p. 19-26, maio 2015.

ANEXO A – Características de interesse na avaliação do LETA

pH e condutividade elétrica

Segundo Vogel (1981), o potencial hidrogênico (pH) é uma medida que expressa de forma logarítmica a atividade dos íons hidrogênio em um meio. Inicialmente, o pH é resultado da dissociação da própria molécula da água, mas também pode ser influenciado por alterações no equilíbrio químico, que podem incluir a presença de hidrogênio proveniente de outras fontes, como ácidos orgânicos e inorgânicos.

Já a condutividade elétrica (CE) é definida como a capacidade que um material possui em conduzir corrente elétrica (Lund *et al.*, 1998). Segundo Pincelli (2004), a condutividade elétrica depende principalmente da solução eletrolítica presente no solo ou água, devido ao seu teor de sais dissolvidos (Freeland, 1989).

Teor de sólidos e Teor de umidade

O teor de sólidos do LETA é uma propriedade que se refere à quantidade de material sólido presente em uma amostra. Ele é expresso como a porcentagem de massa dos componentes sólidos em relação à massa total da amostra, incluindo as partículas minerais e a matéria orgânica (Botero *et al.*, 2009). O teor de umidade do LETA refere-se à quantidade de água presente em uma determinada quantidade de lodo. É expresso como a relação entre a massa de água contida no lodo e a massa total do lodo, (Caputo, 1985).

Sólidos totais fixos e Sólidos totais voláteis

Os sólidos totais fixos correspondem aos componentes sólidos remanescentes após tratamento térmico à 550°C. Esses sólidos totais são compostos por substâncias inorgânicas e orgânicas que não são eliminadas durante os processos de secagem ou desidratação do lodo à 100°C, de acordo com a norma USEPA (2004).

Os sólidos totais voláteis são componentes sólidos que se volatilizam quando o lodo é exposto à temperatura de 550°C. Esses sólidos são compostos principalmente por matéria orgânica, incluindo componentes biológicos e outros compostos voláteis (Correia, 2009; USEPA, 2004).

Sólidos sedimentáveis

Conforme Carneiro *et al.* (2013), a concentração dos sólidos sedimentáveis presente no LETA varia segundo as características sazonais do manancial em que a água para potabilização é captada. Estas variações são de difícil quantificação quanto à origem, considerando ainda as características dos solos tais como textura, estrutura, plasticidade, grau de erosão entre outros.

Frações granulométricas

A fração granulométrica do resíduo sólido refere-se à distribuição de tamanhos de partículas presentes no solo (Cordeiro, 2001), ou no LETA e é uma propriedade fundamental na caracterização. A análise granulométrica permite determinar a proporção relativa de diferentes frações de partículas, como areia (diâmetro entre 2 e 0,053 mm), silte (diâmetro entre 0,053 e 0,002 mm) e argila (diâmetro menor que 0,002 mm), que compõem material analisado, conforme Santos *et al.* (2013).

Composição química elementar

A composição química elementar se refere à identificação e quantificação dos elementos químicos presentes no lodo, a identificação pode ser através da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX) (Ferretti; Tirello, 2009).

Estrutura cristalina

A estrutura cristalina refere-se à organização tridimensional dos minerais presentes na matriz analisada, sua obtenção pode ser através da técnica de difração de Raio X (DRX) (Teixeira, 2014).

Comportamento térmico

A análise de comportamento térmico ou Termogravimetria (TGA) é uma técnica utilizada para estudar as propriedades físicas e químicas de materiais em resposta a variações de temperatura. Essa técnica permite analisar as mudanças de estado, transições térmicas, decomposição e outras transformações que ocorrem em um material durante o aquecimento (Nie *et al.*, 2020).

Limite de liquidez

O limite de liquidez é uma propriedade física que indica a umidade em que um solo transita do estado semilíquido para o estado plástico. Ele é definido como o teor

de umidade em que uma ranhura fechada em uma amostra de solo, submetida a um golpe, comumente realizada pelo equipamento de Casagrande (Caputo *et al.*, 2015)

Limite de plasticidade

O Limite de Plasticidade é uma característica geotécnica que denota o teor de umidade no qual um solo transita do estado plástico para o estado semissólido. Tipicamente situado em uma faixa de 15% a 30%, esse parâmetro constitui a quantidade mínima de água requerida para que o solo seja modelado em uma forma predefinida sem ocorrência de rupturas (Caputo, 1996).

Ensaio de solubilização

O extrato solubilizado de resíduos sólidos refere-se a uma solução líquida obtida pela mistura de resíduos sólidos com um solvente, geralmente água, permitindo que componentes solúveis presentes nos resíduos sejam extraídos na solução (ABNT, 2004). Os ensaios de solubilização têm como objetivo avaliar a capacidade de contaminação por meio da transferência de possíveis contaminantes presentes no resíduo, como no LETA.

APÊNDICE A – Banco de dados

	CB - Araçatuba/SP	CT - Araçatuba/SP	CP - S.J do Rio Preto/SP
Tipo de ETA	Convencional	Convencional com flotação	Convencional
Tipo de LETA	Sedimentado (limpeza manual)	Flotado (limpeza manual)	Sedimentado (limpeza automatizada)
pH	5,83 a 6,91	5,45 a 6,20	6,00 a 6,53
CE (µS/cm)	331 a 696	1.003 a 1.810	249 a 711
Teor de Sólidos (%)	10,37	8,15	13,14
Teor de Umidade (%)	89,63	91,85	86,86
Sólidos Fixos (%)	73,20	69,8	77,95
Sólidos Voláteis (%)	26,8	30,2	20,05
Sólidos Sedimentáveis (ml)	>500 <1000	>500 <1000	<100 e >500 <1000
Fração granulométrica	AR e MD-AR	AR / MD-AR e MD-ARG	AR e MD-AR
Composição química majoritária	Al, Fe, Si	Al, Fe, Si	Al, Fe, Si
Composição mineralógica majoritária	Quartzo	Quartzo	Quartzo, Caulinita
Perda média de massa (%)	36,35	38,6	29,08
Índice liquidez (%)	55,72	71,93	-
Índice plasticidade (%)	41,35	67,35	49,77
Ensaio de Solubilizado (mg/L)	Al= 0.315 mg/l Fe= 0,200 mg/l	Al= 2,500 mg/l Fe= 3,210 mg/l	Al= 0.200 mg/l Fe= 1,150 mg/l
Autores	Esse trabalho	Esse trabalho	Esse trabalho

Nota: (-) = Dado não fornecido pelo autor.

Fonte: Próprio Autor.