



INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

ENGENHARIA QUÍMICA

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LODO REMOVIDO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO E DESAGUADO EM CONTÊINERES GEOTÊXTEIS

GABRIELLY SILVA MARQUES

**Rio Verde, GO
2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE**

ENGENHARIA QUÍMICA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E POTENCIAL DE
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LODO REMOVIDO
DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO E DESAGUADO EM
CONTÊINERES GEOTÊXTEIS**

GABRIELLY SILVA MARQUES

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio
Verde, como requisito parcial para a
obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Dr. Bruno de Oliveira Costa
Couto

Rio Verde – GO
Agosto, 2026



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

GABRIELLY SILVA MARQUES

Matrícula:

2022102203540067

Título do trabalho:

Physicochemical characterization and energy recovery potential of sludge removed from waste stabilization ponds and dewatered in geotextile containers

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: **03** / **08** / **2026**

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIELLY MARQUES MENESES
Data: 02/08/2026 15:13:44 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde- GO

Local

02 / **08** / **2026**

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

gov.br

Documento assinado digitalmente
BRUNO DE OLIVEIRA COSTA COUTO
Data: 30/07/2026 14:37:32 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 02 dias do mês de julho de dois mil e vinte e seis às dezenove horas e trinta minutos, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Bruno de Oliveira Costa Couto, orientador, Engenheira Ambiental Ísis Danielle Sousa, Prof. Karen Carvalho Ferreira, membro interno e Prof. Rogério Favareto, membro interno, para examinar o Trabalho de Curso (TCC) intitulado, **Caracterização físico-química e potencial de aproveitamento energético de lodo removido de lagoas de estabilização e desaguado em contêineres geotêxteis**, de Gabrielly Silva Marques, estudante do curso de Engenharia Química do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2022102203540067. A palavra foi concedida à estudante para a apresentação oral do trabalho, em seguida houve arguição da candidata pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela aprovação da estudante, com orientação de correção. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue assinada pela professora orientadora e segue assinada por todos os membros da banca.

Rio Verde, 02 de julho de 2026.

Bruno de Oliveira Costa Couto

Presidente da banca/orientadora

assinatura digital

Karen Carvalho Ferreira

Membro da Banca Examinadora

Rogério Favareto

Membro da Banca Examinadora

assinatura digital

Ísis Danielle Sousa

Membro da Banca Examinadora

assinatura digital

Documento assinado eletronicamente por:

- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 07/07/2026 05:41:12.
- **Rogério Favareto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 07/07/2026 06:23:20.
- **Karen Carvalho Ferreira**, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO , em 07/07/2026 21:09:49.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 837289

Código de Autenticação: 5bbd5c2d2b



Documento assinado digitalmente

ISIS DANIELLE SOUSA

Data: 09/07/2026 16:20:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

FICHA CATALOGRÁFICA

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586c	Silva Marques, Gabrielly CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LODO REMOVIDO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO E DESAGUADO EM CONTÊINERES GEOTÊXTEIS / Gabrielly Silva Marques. Rio Verde 2026. 31f. il. Orientador: Prof. Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto. Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220354 - Bacharelado em Engenharia Química - Integral - Rio Verde (Campus Rio Verde). 1. Lodo de esgoto. 2. Lagoas facultativas. 3. Biogás. 4. Digestão anaeróbia. 5. Desaguamento. I. Título.
-------	--

AGRADECIMENTOS

Agradeço à BRK Ambiental, empresa responsável pela expansão e operação do sistema de esgoto no município de Rio Verde, Goiás, pelo apoio técnico prestado durante o desenvolvimento deste estudo. Também agradeço ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) pelo apoio institucional e pelo incentivo à pesquisa científica.

RESUMO

As lagoas facultativas são amplamente utilizadas no tratamento de esgoto doméstico devido à simplicidade operacional e ao baixo custo. Entretanto, o acúmulo de lodo nesses sistemas exige manejo adequado em função dos impactos ambientais e do potencial de aproveitamento energético do material. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar as características físico-químicas do lodo removido de lagoas facultativas da ETE SAPO, em Rio Verde – GO, visando verificar seu potencial para produção de biogás. O lodo foi submetido aos processos de dragagem, desaguamento e armazenamento em contêineres geotêxteis, sendo analisados sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), relação SV/ST, pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica e demanda química de oxigênio (DQO). Os resultados demonstraram variações associadas ao desaguamento, armazenamento e heterogeneidade vertical do material. Os maiores teores de sólidos voláteis (SV) e os maiores valores da relação SV/ST foram observados nas amostras provenientes do contêiner correspondente ao período inicial da dragagem, indicando maior presença de matéria orgânica biodegradável e potencial para produção de biogás. Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas significativas entre os contêineres, os resultados descritivos indicaram tendência de segregação da fração orgânica. Conclui-se que o lodo analisado apresenta potencial para aproveitamento energético por digestão anaeróbia.

Palavras-chave: Lodo de esgoto; Lagoas facultativas; Biogás; Digestão anaeróbia; Desaguamento

ABSTRACT

Facultative ponds are widely used for domestic wastewater treatment due to their operational simplicity and low cost. However, sludge accumulation in these systems requires proper management because of its environmental impacts and energy recovery potential. In this context, this study aimed to evaluate the physicochemical characteristics of sludge removed from facultative ponds at the SAPO Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in Rio Verde, Goiás, Brazil, in order to assess its potential for biogas production. The sludge was subjected to dredging, dewatering, and storage in geotextile containers, and the following parameters were analyzed: total solids (TS), volatile solids (VS), VS/TS ratio, pH, dissolved oxygen (DO), electrical conductivity, and chemical oxygen demand (COD). The results demonstrated variations associated with dewatering, storage conditions, and vertical heterogeneity of the material. The highest VS contents and VS/TS ratios were observed in samples collected from the container corresponding to the initial dredging stage, indicating a greater presence of biodegradable organic matter and higher potential for biogas production. Although no statistically significant differences were observed among the evaluated containers, descriptive results indicated a tendency toward segregation of the organic fraction. Overall, the results suggest that the analyzed sludge presents potential for energy recovery through anaerobic digestion.

Keywords: Sewage sludge; Facultative ponds; Biogas; Anaerobic digestion; Dewatering

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANOVA	Análise de variância
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CH ₄	Metano
COD	Chemical Oxygen Demand
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DO	Dissolved Oxygen
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
HDPE	High-density polyethylene
IF Goiano	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
OD	Oxigênio dissolvido
PEAD	Polietileno de alta densidade
ST / TS	Sólidos totais / Total solids
SV / VS	Sólidos voláteis / Volatile solids
SV/ST / VS/TS	Relação entre sólidos voláteis e sólidos totais
VSS	Volatile suspended solids
WPCF	Water Pollution Control Federation
WWTP	Wastewater Treatment Plant
kWh m ⁻³	Quilowatt-hora por metro cúbico
mg L ⁻¹	Miligrama por litro
m ³	Metro cúbico
μS cm ⁻¹	Microsiemens por centímetro

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Distribuição dos recipientes de geotêxtil 13
- Figura 2 - Distribuição de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) 17
- Figura 3 - Variação da razão sólidos voláteis/sólidos totais 18
- Figura 4 - Oxigênio dissolvido (OD) e pH ao longo das camadas de lodo 20
- Figura 5 - Condutividade elétrica através das camadas de lodo 21
- Figura 6 - Valores de p obtidos por ANOVA para os parâmetros analisados 24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Tratamento de esgoto e geração de lodo	3
2.2 Lagoas de estabilização e formação do lodo	4
2.3 Dragagem, condicionamento e desaguamento	4
2.4 Caracterização físico-química do lodo	6
2.5 Digestão anaeróbia e produção de biogás	7
2.6 Potencial de aproveitamento energético do lodo	8
3 MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1 Caracterização de estação de tratamento de águas residuárias	10
3.2 Quantificação do lodo gerado	11
3.3 Desenho amostral e coleta de lodo	12
3.4 Análises físico-químicas	13
3.5 Estimativa teórica do potencial de produção de biogás	14
3.6 Estimativa do potencial de produção de biogás	14
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1 Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)	15
4.2 Razão SV/ST e estabilização da matéria orgânica	17
4.3 Oxigênio dissolvido (OD) e pH	18
4.4 Condutividade elétrica	20
4.5 Demanda química de oxigênio (DQO)	21
4.6 Análise estatística	23
4.7 Implicações para a recuperação de energia	24
5 CONCLUSÕES	26
6 REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto é fundamental para a proteção da saúde pública e dos recursos hídricos. Entretanto, a ampliação dos sistemas de tratamento resulta no aumento da geração de resíduos, especialmente o lodo (referência). No Brasil, apenas 52,2% do esgoto gerado é tratado (SNIS, 2022), mas a meta estabelecida pela (ANA) prevê que, até 2033, 90% da população tenha acesso ao tratamento de esgoto. Esse cenário tende a aumentar significativamente a produção de lodo, tornando sua gestão e destinação final desafios cada vez mais relevantes (Batista, 2016).

Como consequência da expansão dos sistemas de tratamento de esgoto, a produção de lodo no Brasil apresenta tendência de crescimento, com geração anual estimada entre 150 e 220 mil toneladas de lodo seco (Pedroza et al., 2010; Soares, 2004). Esse resíduo é gerado principalmente nos processos biológicos de tratamento, amplamente empregados devido à elevada carga de matéria orgânica presente nos esgotos domésticos. Nesses sistemas, microrganismos promovem a decomposição e estabilização da matéria orgânica, reduzindo a carga poluente dos efluentes tratados (Oliveira et al., 2021; Pedroza et al., 2010; Van Haandel; Alem Sobrinho, 2006).

As lagoas de estabilização, constituem um sistema de tratamento biológico utilizado no tratamento de efluentes domésticos, especialmente em regiões de clima tropical e em países em desenvolvimento, devido à sua simplicidade operacional e baixo custo (Silva et al., 2009; Silva et al., 2015). Esse sistema pode ser composto por lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação, organizadas em diferentes arranjos, conforme a disponibilidade de área e os mecanismos predominantes de remoção da matéria orgânica (Von Sperling, 2002; Silva et al., 2009; Silva et al., 2015). Além da remoção da matéria orgânica, esses sistemas promovem a geração e o acúmulo gradual de lodo em suas unidades de tratamento.

Nas lagoas de estabilização, o lodo é gerado principalmente a partir da biomassa do próprio efluente, que ao longo do tempo se adensa, sedimenta e se acumula no fundo das lagoas (Pedroza et al., 2010; Van Haandel; Marais, 1999). Esse acúmulo reduz o volume útil do sistema, compromete a eficiência hidráulica e

biológica e pode ocasionar odores, tornando necessária a avaliação periódica do lodo e sua remoção por técnicas como batimetria e dragagem (França, 2011; Von Sperling, 2002). Além de restabelecer a eficiência operacional do sistema, a remoção do lodo permite avaliar possibilidades de reaproveitamento desse material.

Segundo Von Sperling, (2002), quando o lodo acumulado atinge aproximadamente um terço da altura útil das lagoas, torna-se necessária sua remoção. Entretanto, além da quantificação e remoção dessa biomassa, é fundamental considerar sua destinação final. Em geral, o lodo removido apresenta elevado teor de umidade, sendo comum a utilização de polímeros para promover a aglomeração das partículas e facilitar a desidratação. Após a dragagem, o lodo pode ser acondicionado em contêineres geotêxteis, cujos materiais favorecem a drenagem e a redução do teor de umidade, permitindo o enquadramento conforme a ABNT NBR 10004:2004, norma que classifica os resíduos sólidos quanto ao seu potencial de risco ao meio ambiente. Uma vez classificado, o lodo pode ser destinado a aterros sanitários ou a processos de reaproveitamento, como a produção de biogás (França, 2011; Guimarães et al., 2018; Gonçalves, 1999).

Entre as alternativas de reaproveitamento do lodo, destaca-se o aproveitamento energético por meio da produção de biogás. A biomassa proveniente da matéria orgânica presente em efluentes domésticos e industriais apresenta elevado potencial energético, especialmente para a produção de biogás. Por ser rica em carbono e proteínas, possui elevada capacidade de geração de metano, principal componente do biogás é responsável por seu alto poder calorífico. Assim, o aproveitamento energético do lodo configura-se como uma alternativa sustentável para a geração de energia e redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado (Pedrosa, 2011; Mondala et al., 2009).

Apesar da ampla aplicação das lagoas de estabilização no tratamento de efluentes, ainda são limitados os estudos voltados à quantificação e caracterização físico-química do lodo gerado nesses sistemas e à avaliação do seu potencial de aproveitamento energético. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do aproveitamento energético do lodo removido de lagoas de estabilização e desaguado em contêineres geotêxteis, com base na quantidade gerada e em suas características físico-químicas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tratamento de esgoto e geração de lodo

O tratamento de esgoto constitui uma medida essencial para a proteção da saúde pública e dos recursos hídricos, pois reduz a carga de matéria orgânica, sólidos e outros constituintes antes do lançamento do efluente no ambiente. A ampliação da cobertura de saneamento, embora necessária, aumenta simultaneamente a geração de resíduos do processo, especialmente o lodo de esgoto, cuja gestão envolve desafios técnicos, ambientais e econômicos. Esse resíduo é formado principalmente pela biomassa produzida nos processos biológicos e pelos sólidos presentes no esgoto que são retidos, sedimentados ou incorporados aos flocos durante o tratamento (PEDROZA et al., 2010; VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006; OLIVEIRA et al., 2021).

A composição e o volume de lodo variam de acordo com as características do esgoto afluente, a configuração do sistema, a eficiência de remoção, o tempo de retenção e as condições operacionais. Por apresentar elevado teor de umidade e concentração variável de matéria orgânica e componentes minerais, o lodo precisa ser caracterizado antes da definição de alternativas de transporte, tratamento, aproveitamento ou disposição final. A ausência desse controle pode elevar custos, dificultar o manuseio e ampliar riscos associados à geração de odores, à lixiviação e à disposição inadequada (BATISTA, 2015; GONÇALVES, 1999; METCALF & EDDY, 2014).

A gestão contemporânea do lodo busca superar uma abordagem restrita à disposição final, considerando possibilidades de recuperação de recursos. Entre as alternativas estudadas estão o aproveitamento energético, a recuperação de nutrientes e diferentes formas de valorização da fração orgânica. A seleção da rota mais adequada depende do grau de estabilização, do teor de sólidos, da biodegradabilidade, da presença de substâncias inibidoras e das condições logísticas existentes na unidade de tratamento (PEDROZA et al., 2010; PEDROSA, 2011; BATISTA, 2016).

2.2 Lagoas de estabilização e formação do lodo

As lagoas de estabilização são sistemas biológicos amplamente empregados no tratamento de esgoto doméstico, sobretudo em regiões de clima favorável e em locais com disponibilidade de área. Sua aplicação está associada à simplicidade operacional, à reduzida demanda por equipamentos eletromecânicos e aos menores custos de implantação e manutenção quando comparados a sistemas mecanizados. Os arranjos podem incluir lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação, definidas conforme a carga aplicada, a profundidade, o tempo de detenção e os objetivos de tratamento (VON SPERLING, 2002; SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2015).

Nas lagoas facultativas, a remoção da matéria orgânica ocorre por mecanismos combinados de sedimentação, atividade bacteriana e processos associados à zona aeróbia e à zona anaeróbia. A biomassa e os sólidos sedimentáveis se acumulam gradualmente no fundo, formando uma camada de lodo que passa por adensamento e estabilização ao longo do tempo. Esse acúmulo é inerente ao funcionamento do sistema e, quando não acompanhado, reduz o volume útil, altera o regime hidráulico, favorece curtos-circuitos e pode prejudicar o desempenho global do tratamento (VON SPERLING, 2002; VAN HAANDEL; MARAIS, 1999; PEDROZA et al., 2010).

A avaliação periódica da camada de lodo é necessária para definir o momento de remoção e evitar comprometimento operacional. Levantamentos batimétricos permitem estimar a distribuição e o volume acumulado, fornecendo subsídios para o planejamento da dragagem. Von Sperling (2002) indica que a remoção se torna necessária quando o lodo ocupa parcela relevante da profundidade útil da lagoa. Além do restabelecimento da capacidade hidráulica, a retirada possibilita avaliar alternativas de aproveitamento para a biomassa removida, desde que suas características sejam conhecidas (FRANÇA et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2020; VON SPERLING, 2017).

2.3 Dragagem, condicionamento e desaguamento

A dragagem de lagoas de estabilização deve ser planejada de modo a limitar a ressuspensão excessiva de sólidos, reduzir interferências no tratamento e permitir o encaminhamento seguro do material removido. As propriedades do lodo, a

concentração de sólidos, o tipo de equipamento, a vazão de bombeamento e o período de execução influenciam a eficiência da operação e a composição do material coletado. Variações ao longo da dragagem podem resultar da heterogeneidade do fundo, da diluição pelo líquido sobrenadante e das diferenças de tempo de armazenamento entre as frações removidas (GONÇALVES, 1999; FRANÇA et al., 2011; SOARES, 2006).

Após a remoção, o elevado teor de água torna necessário o condicionamento e o desaguamento. A adição de polímeros favorece a agregação das partículas, aumenta a resistência dos flocos e melhora a separação sólido-líquido. A eficiência dessa etapa depende da compatibilidade entre o condicionante e o lodo, da dosagem aplicada, da mistura e do acompanhamento de parâmetros operacionais, como tamanho e resistência dos flocos, viscosidade e qualidade do percolado (GONÇALVES, 1999; METCALF & EDDY, 2014).

Os contêineres geotêxteis são utilizados para confinar o lodo condicionado e permitir a drenagem progressiva da fase líquida através do material filtrante. O desempenho está relacionado à resistência do geotêxtil, à pressão interna, à permeabilidade, ao teor de sólidos e às características das partículas. Durante o enchimento e o repouso, ocorrem drenagem gravitacional, adensamento e consolidação, processos que reduzem o volume e podem gerar gradientes internos de umidade e sólidos. Por isso, o dimensionamento e o controle operacional são importantes para evitar rupturas e assegurar a retenção do material (KOERNER, 2012; MORTARA, 2011; FRANÇA et al., 2011).

O desaguamento reduz a massa e o volume a serem transportados, contribuindo para diminuir custos logísticos e facilitar o armazenamento. Entretanto, a drenagem do líquido intersticial também pode alterar a distribuição de espécies solúveis e a concentração relativa da fração orgânica e mineral. Assim, amostras coletadas em diferentes posições ou períodos podem apresentar variações, exigindo estratégias de amostragem que considerem a heterogeneidade temporal e espacial do material (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014; METCALF & EDDY, 2014; VELKUSHANOVA et al., 2021).

2.4 Caracterização físico-química do lodo

A caracterização físico-química fornece informações essenciais sobre o estado do lodo e sua aptidão para diferentes rotas de manejo. Os sólidos totais representam o conjunto das frações dissolvida e particulada presentes na amostra, enquanto os sólidos voláteis correspondem à parcela perdida após calcinação e são empregados como indicador indireto da matéria orgânica. A relação entre sólidos voláteis e sólidos totais auxilia na interpretação do grau de estabilização e do conteúdo orgânico residual, sendo relevante para estimar a disponibilidade de substrato em processos biológicos (APHA, 2017; CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2014).

Valores mais elevados da relação SV/ST sugerem maior participação da fração orgânica, enquanto valores menores podem indicar maior estabilização ou maior proporção de constituintes minerais. Essa interpretação deve considerar a base de expressão dos resultados, o teor de umidade e o procedimento de preparo da amostra. Em lodos heterogêneos, a comparação entre concentrações em suspensão e resultados expressos em massa seca requer cautela, porque diluição, homogeneização e separação de fases modificam a leitura analítica (APHA, 2017; BATISTA, 2015; VELKUSHANOVA et al., 2021).

O pH é um parâmetro decisivo para a atividade microbiana e para a estabilidade de processos anaeróbios. Condições muito ácidas podem indicar acúmulo de ácidos graxos voláteis e comprometer a atividade metanogênica. Aquino e Chernicharo (2005) associam a acumulação desses ácidos a situações de desequilíbrio, nas quais a produção de intermediários supera sua conversão. Dessa forma, a avaliação do pH deve ser complementada, quando possível, por análises de alcalinidade e ácidos graxos voláteis, principalmente quando o lodo é destinado à digestão anaeróbia.

O oxigênio dissolvido permite avaliar a exposição do material ao ar durante dragagem, bombeamento, mistura e coleta. Embora o interior do lodo tenda a apresentar condições reduzidas, a turbulência e o contato com a atmosfera podem elevar temporariamente o OD e favorecer reações de oxidação. A condutividade elétrica, por sua vez, indica a presença global de íons dissolvidos e pode auxiliar na identificação de mudanças associadas à drenagem do percolado e à lixiviação de sais. Concentrações elevadas de determinadas espécies podem afetar o equilíbrio

osmótico dos microrganismos anaeróbios, justificando análises complementares quando se pretende realizar aproveitamento energético (APHA, 2017; METCALF & EDDY, 2014; CHERNICHARO, 2007).

A demanda química de oxigênio é empregada para estimar a quantidade de matéria oxidável e constitui uma base importante para cálculos teóricos de produção de metano. Contudo, lodos com elevada concentração de sólidos, turbidez intensa e matriz heterogênea podem ultrapassar a faixa de leitura de métodos colorimétricos convencionais. Nesses casos, diluições seriadas, homogeneização, separação controlada de fases e métodos de maior faixa analítica podem ser necessários. A presença de partículas finas e compostos recalcitrantes também pode interferir na digestão e na resposta do ensaio (JIRKA; CARTER, 1975; APHA, 2017).

2.5 Digestão anaeróbia e produção de biogás

A digestão anaeróbia permite converter parte da matéria orgânica biodegradável em biogás, cujo principal componente energético é o metano. O desempenho depende da disponibilidade de substrato, da atividade da biomassa, da temperatura, do pH, da alcalinidade e da ausência de concentrações inibitórias. Em lodos com fração orgânica residual, os sólidos voláteis e a DQO fornecem indicadores relevantes para avaliar o potencial de conversão, embora ensaios específicos de biodegradabilidade e atividade metanogênica sejam necessários para quantificação mais confiável (CHERNICHARO, 2007; AQUINO et al., 2007; METCALF & EDDY, 2014).

O equilíbrio entre a formação e o consumo de ácidos é determinante para a estabilidade do processo. A acidificação excessiva reduz o pH e pode inibir os microrganismos responsáveis pela formação de metano. A correção da alcalinidade, a adaptação do inóculo, a alimentação gradual e a codigestão com substratos de maior capacidade tampão são estratégias que podem ser avaliadas quando o material apresenta condições desfavoráveis. O monitoramento deve ser contínuo, pois a recuperação de um sistema acidificado pode exigir redução de carga e restabelecimento do equilíbrio entre as etapas biológicas (AQUINO; CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2007).

Além da composição química, a uniformidade do substrato influencia a operação do biodigestor. Lodos armazenados em contêineres podem apresentar

diferenças entre períodos de dragagem e posições internas em razão de sedimentação, drenagem e consolidação. A homogeneização antes da alimentação contribui para reduzir oscilações na carga orgânica e no teor de sólidos, favorecendo maior estabilidade operacional e interpretação mais representativa do potencial energético (METCALF & EDDY, 2014; TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

Estudos que correlacionam parâmetros físico-químicos e geração de gás reforçam a importância de integrar análises de sólidos, DQO, pH e condições operacionais. De Paula Patulski et al. (2025) abordam correlações entre produção de biogás, metano dissolvido e características do esgoto em reatores anaeróbios em escala plena, evidenciando que a avaliação energética deve considerar simultaneamente a qualidade do substrato e o comportamento do processo biológico.

2.6 Potencial de aproveitamento energético do lodo

A estimativa teórica do potencial energético pode ser realizada a partir da DQO convertida. A literatura adota aproximadamente 0,35 m³ de CH₄ para cada quilograma de DQO removida em condições normais, valor que permite uma primeira aproximação do volume de metano potencialmente produzido. Para conversão em energia, pode ser utilizado o poder calorífico inferior do metano de aproximadamente 9,97 kWh m⁻³, reconhecendo-se que a produção real é inferior ao limite estequiométrico em razão da fração não biodegradável, do crescimento celular e das perdas do sistema (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2014; IPCC, 2006; RYCKEBOSCH et al., 2011).

O biogás pode ser utilizado diretamente para geração térmica, convertido em eletricidade ou submetido a processos de purificação para produção de biometano. A escolha depende da escala, da regularidade de produção, da composição do gás e da existência de demanda energética. Técnicas de remoção de dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, umidade e outros contaminantes são necessárias quando se busca elevar a qualidade do gás, especialmente para usos mais exigentes (RYCKEBOSCH et al., 2011; BATISTA, 2016).

O aproveitamento energético do lodo também pode reduzir o volume de resíduos destinados à disposição final e gerar benefício ambiental ao controlar emissões de metano que ocorreriam de forma difusa. Entretanto, a viabilidade

depende de estudos técnicos que incluam quantificação de massa seca, teor de sólidos voláteis, DQO, biodegradabilidade, produção específica de metano, necessidade de pré-tratamento e balanço energético. A existência de matéria orgânica residual indica oportunidade de recuperação, mas não substitui ensaios experimentais de digestão (PEDROSA, 2011; AQUINO et al., 2007; METCALF & EDDY, 2014).

Para lodos removidos de lagoas e desaguados em contêineres geotêxteis, o controle das etapas de dragagem, condicionamento e armazenamento é parte integrante da avaliação energética. O tempo de permanência, a drenagem e a heterogeneidade podem modificar a concentração e a disponibilidade da fração orgânica. Assim, a caracterização representativa e a homogeneização do material são requisitos para estimativas consistentes e para o dimensionamento de uma eventual unidade de digestão anaeróbia (GONÇALVES, 1999; KOERNER, 2012; CHERNICHARO, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização de estação de tratamento de águas residuárias

Os experimentos foram conduzidos em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) denominada ETE SAPO, localizada no município de Rio Verde, estado de Goiás, tendo as seguintes coordenadas geográficas é 17°49'47,87" S e 50°54'27,82" O. A unidade possui um sistema de tratamento composto por lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da estação de tratamento de águas residuais SAPO

Pond classification	Pond surface dimensions (m)	Surface area (m²)	Volume (m³)
Anaerobic 1	115,3 x 95,3 x 5	4533	22246
Anaerobic 2	115,3 x 95,3 x 5	4533	22246
Facultative 1	316,5 x 308,5 x 1,7	24370	45636
Facultative 2	316,5 x 308,5 x 1,7	24370	45636
Maturation 1	130,1 x 71 x 1,5	14479	14775
Maturation 2	130,1 x 71 x 1,5	14479	14775

Fonte: Autores (2026), com base em dados do projeto da estação de tratamento de águas residuais, elaborado pela SENHA Engenharia em 2013, conforme documentação técnica interna.

Para a concepção da ETE, foram analisados os critérios relacionados à área a ser atendida pelo sistema, conforme apresentado na Tabela 2, a qual reúne os principais parâmetros e diretrizes adotados no projeto do sistema de tratamento.

Tabela 2 – Parâmetros de dimensionamento adotados no projeto ETE SAPO

Project year	Treatment capacity (m³/day)	Number of sewer connections (units)	Number of inhabitants per household	Per capita organic load (kg BOD/inhab-day)
2016	22.118,40	6135	2,79*	0,054**

Fonte: Autores (2026), com base em dados do projeto da estação de tratamento de águas residuais, conforme documentação técnica interna, *Censo 2022; **Valor estimado segundo Metcalf & Eddy (2003).

3.2 Quantificação do lodo gerado

O lodo analisado foi previamente removido das lagoas facultativas para a realização do estudo de caso. Previamente à contratação dos serviços de remoção por dragagem, foram realizadas batimetrias em ambas as lagoas, em março de 2024. Os resultados indicaram volumes de 7.312,49 m³ e 6.548,52 m³ de lodo nas Lagoas Facultativas 1 e 2, respectivamente, totalizando 13.861,01 m³. Em decorrência de negociações contratuais, e estudos internos as dragagens foram executadas em janeiro de 2025. O lodo removido foi acondicionado em 35 contêineres geotêxteis, cujas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características de projeto contêineres geotêxteis					
Geomembrane material composition	Geotextile tensile strength (kN/m)	Cross-section perimeter (m)	Maximum height achieved (m)	Width (m)	Approximate volume of geotextile tubes (m ³)
High-tenacity polypropylene (PP)	105	20	2,40	8,90	1000

Fonte: Autores (2026), com base em dados do fabricante HUESKER, conforme documentação técnica interna.

Para a montagem dos contêineres geotêxteis, foi realizado um estudo prévio por meio do programa de modelagem GeoCops, considerando as características do lodo, de modo a assegurar a adequação da manta geotêxtil às condições operacionais, especialmente quanto ao teor de sólidos e à pressão exercida no interior dos contêineres, evitando rupturas e a exposição do material ao solo.

Na etapa de desaguamento, utilizou-se uma draga não tripulada equipada com bomba submersível modelo AMX646 100-340MM-T15. Após a dragagem, o lodo foi direcionado a dois tanques de PEAD, com volume individual de 2,5 m³. No primeiro tanque, realizou-se a injeção de polímero por meio de bomba dosadora, enquanto no segundo ocorreu a mistura e a recirculação do polímero. O polímero foi armazenado em dois tanques de 5 m³, instalados em bacia de contenção, ambos em PEAD. A aplicação de polímero catiônico teve como finalidade promover o adensamento e a estabilização do lodo, possibilitando a obtenção de teor de sólidos igual ou superior a 25%.

Como parte do protocolo operacional, a floculação do material e suas características, como: resistência e tamanho dos flocos, percolado e viscosidade do floco formado, foram continuamente monitoradas por meio de análises laboratoriais diárias. Para a determinação do encerramento das operações nos contêineres

geotêxteis, o teor de sólidos foi mensurado utilizando o Determinador de Umidade Marte ID200. Cada contêiner geotêxteíl deveria atingir o teor mínimo de sólidos estabelecido, condição necessária para o cálculo, por meio do software GeoCops, do volume encapsulado em cada unidade e, conseqüentemente, do volume total dragado, que foi de 24.985 m³, já com adição de polímero, sendo o valor operacional, referente às duas lagoas facultativas

3.3 Desenho amostral e coleta de lodo

Considerando que os contêineres geotêxteis foram preenchidos em períodos operacionais distintos, adotou-se uma abordagem amostral que incorporasse a variabilidade temporal inerente ao processo de dragagem e acondicionamento do lodo. A dragagem da primeira lagoa facultativa foi iniciada em 28 de janeiro de 2025, estendendo-se até meados de fevereiro de 2025, sendo sucedida pela remoção do lodo da segunda lagoa, finalizada em 30 de abril de 2025. Dessa forma, os bags apresentam diferentes tempos de enchimento e armazenamento, podendo refletir variações físico-químicas associadas ao estágio de estabilização, ao grau de adensamento e às condições operacionais de cada fase.

Segundo Von Sperling, (2002) e Metcalf & Eddy, (2014), às características do lodo podem sofrer alterações significativas em função do tempo de armazenamento, da drenagem gravitacional e da consolidação interna do material, afetando parâmetros como teor de sólidos, umidade e composição orgânica. Gonçalves (1999), mostrou que a heterogeneidade espacial e temporal deve ser considerada na definição do plano amostral, a fim de garantir representatividade estatística e confiabilidade interpretativa dos resultados.

Com base nesse pressuposto, foram selecionados três contêineres geotêxteis representativos de diferentes fases do processo operacional: (i) um correspondente ao início da dragagem da lagoa facultativa 1; (ii) um representativo do período intermediário da operação, podendo conter material proveniente de ambas as lagoas facultativas; e (iii) um correspondente à etapa final da dragagem da lagoa facultativa 2. Essa estratégia permitiu contemplar possíveis variações associadas à progressão temporal do processo de remoção. A Figura 1 ilustra a distribuição dos contêineres geotêxteis e os três selecionados para a amostragem.

Figura 1 – Distribuição dos recipientes de geotêxtil



Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2025)

Em cada contêiner selecionado, realizou-se amostragem espacial estratificada ao longo do perfil vertical do material armazenado, com coletas nas porções topo, meio e fundo. A adoção da amostragem estratificada fundamenta-se no princípio de que materiais particulados submetidos a processos de drenagem e sedimentação tendem a apresentar gradientes verticais de concentração de sólidos e umidade, decorrentes da ação da gravidade e da percolação de líquidos (APHA, 2017). As três subamostras obtidas em cada contêiner geotêxtil foram homogeneizadas, constituindo uma amostra composta representativa de cada período operacional (início, meio e fim), procedimento recomendado para redução da variabilidade intra unidade e aumento da representatividade global da amostra (Metcalf & Eddy, 2014).

Para cada amostra, as determinações analíticas foram realizadas em triplicata, visando assegurar precisão, repetibilidade e confiabilidade estatística dos resultados experimentais (APHA, 2017). Ao final, foram obtidos nove resultados analíticos (três períodos $\times$ três replicatas), possibilitando avaliação comparativa da influência do tempo de armazenamento nas características do lodo.

Essa estratégia metodológica integra variabilidade temporal e heterogeneidade vertical do material, ampliando a robustez do delineamento experimental e fortalecendo a validade inferencial dos resultados obtidos.

3.4 Análises físico-químicas

As amostras de lodo foram analisadas quanto aos parâmetros de sólidos totais (ST – método 2540), sólidos suspensos voláteis (SSV – método 2540), pH (método 4500-H⁺), Oxigênio Dissolvido (método 4500-O G) e demanda química de oxigênio (DQO), por serem indicadores relevantes da estabilidade da biomassa, do conteúdo de matéria orgânica e do potencial de aproveitamento energético do

material. As análises de DQO foram realizadas por meio de colorímetro, utilizando reator Hach modelo 8000, conforme metodologias padronizadas descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

As análises de demanda química de oxigênio (DQO), pH e oxigênio dissolvido foram realizadas imediatamente após a coleta das amostras nos contêineres geotêxteis, sendo analisado um contêiner por dia. As determinações de sólidos totais (ST) e sólidos suspensos voláteis (SSV) foram encaminhadas a um laboratório especializado, equipado com mufla e dessecador. Para essas análises, foi realizada a coleta de amostras provenientes de um contêiner por dia, com posterior transporte ao laboratório, totalizando três dias para a realização de todas as análises. Todas as determinações foram realizadas em triplicata analítica

3.5 Estimativa teórica do potencial de produção de biogás

O potencial teórico de produção de biogás baseia-se na estequiometria da digestão anaeróbia, na qual 1 kg de DQO removida corresponde aproximadamente a 0,35 m³ de CH₄ em condições normais de temperatura e pressão (Metcalf & Eddy, 2014; Chernicharo, 2007). A energia potencial associada foi calculada adotando-se o poder calorífico inferior do metano igual a 9,97 kWh/m³ (IPCC, 2006; Ryckebosch et al., 2011).

3.6 Estimativa do potencial de produção de biogás

Os dados foram inicialmente avaliados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro–Wilk e à homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. Atendidos os pressupostos estatísticos, aplicou-se análise de variância (ANOVA) de um fator para comparação entre as médias dos períodos operacionais avaliados (início, intermediário e final). Quando observadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. As análises estatísticas foram realizadas considerando nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização físico-química do lodo removido das lagoas facultativas e acondicionado em contêineres geotêxteis evidenciou variações entre os diferentes períodos operacionais de dragagem avaliados (início, intermediário e final). Tais diferenças indicam que o tempo de enchimento, o armazenamento e os processos internos de drenagem influenciaram diretamente a composição e o grau de estabilização do material.

4.1 Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)

Os valores de sólidos totais (ST) variaram entre 1.580 e 3.100 mg L⁻¹, enquanto os sólidos voláteis (SV) oscilaram entre 580 e 2.070 mg L⁻¹. Ressalta-se que esses valores correspondem à suspensão preparada para análise laboratorial, não ao teor de sólidos secos do lodo integral acondicionado nos contêineres geotêxteis. As maiores concentrações foram observadas nas amostras correspondentes ao início da dragagem.

Esse comportamento indica que o material proveniente da fase inicial da dragagem apresentou maior concentração de partículas sedimentáveis e maior tempo de drenagem, favorecendo o adensamento. Já as menores concentrações observadas no período final podem estar associadas à maior diluição do material dragado e ao maior tempo de armazenamento (Soares, 2006; Souza 2018).

Os sólidos voláteis (SV), também denominados sólidos totais voláteis (STV), correspondem à fração orgânica volatilizada em mufla a 550 °C, sendo amplamente utilizados como indicador indireto da matéria orgânica biodegradável presente no lodo (APHA, 2017; Batista, 2015).

Do ponto de vista operacional, esse parâmetro apresenta elevada relevância porque representa a parcela do substrato potencialmente convertida em biogás, ao contrário da fração inorgânica, que não contribui diretamente para a geração de metano e apenas ocupa volume útil no reator (Chernicharo, 2007; Metcalf & Eddy, 2014).

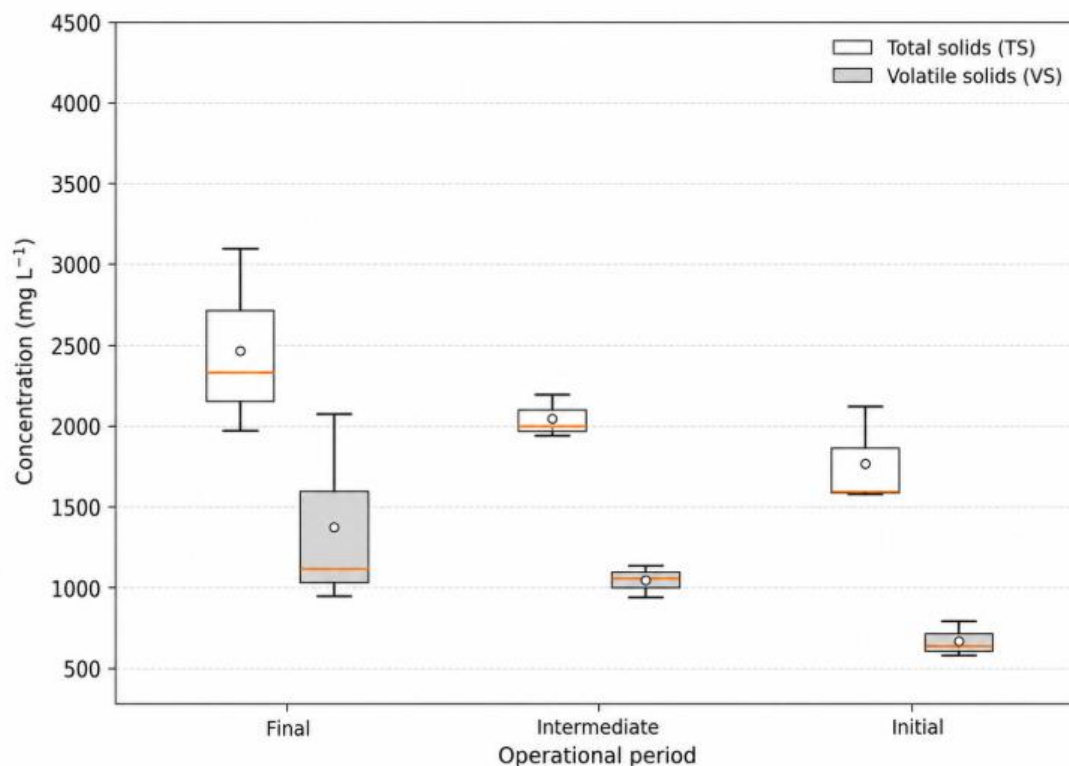
Além disso, os potenciais específicos de produção de metano e biogás são normalmente expressos em função da massa de SV adicionada, tornando esse

parâmetro essencial para estimativas energéticas e para o dimensionamento de biodigestores (Chernicharo, 2007; Aquino et al., 2007).

De acordo com Paixão Filho (2012), lodos provenientes de lagoas facultativas apresentam teor de sólidos voláteis da ordem de 5,9% (m/m) em base seca. Considerando que os resultados obtidos neste estudo foram determinados em amostras em suspensão e expressos em mg L^{-1} , foi realizada uma extrapolação para o volume total de lodo dragado ($24,985 \text{ m}^3$). Com base na menor relação observada entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST), estimou-se um teor aproximado de 10,7% de SV, indicando uma fração orgânica superior à reportada por Paixão Filho (2012). Entretanto, essa comparação deve ser interpretada com cautela, uma vez que os parâmetros comparados são obtidos por metodologias distintas e expressos em bases diferentes. Adicionalmente, observa-se uma limitada disponibilidade de estudos que estabeleçam correlações diretas entre concentrações de sólidos voláteis em suspensão (mg L^{-1}) e teores de sólidos voláteis em base seca (% m/m) para lodos de lagoas facultativas. Dessa forma, os resultados sugerem compatibilidade com a faixa reportada na literatura, sendo necessária a caracterização do lodo seco para uma avaliação comparativa mais robusta e conclusiva.

Dessa forma, os valores de SV indicam presença significativa de matéria orgânica residual e reforçam o potencial do lodo para aproveitamento energético por digestão anaeróbia, desde que sejam adotadas etapas de homogeneização e correção das condições operacionais antes da alimentação de biodigestores.

Figura 2 – Distribuição de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)



Fonte: Autores (2026)

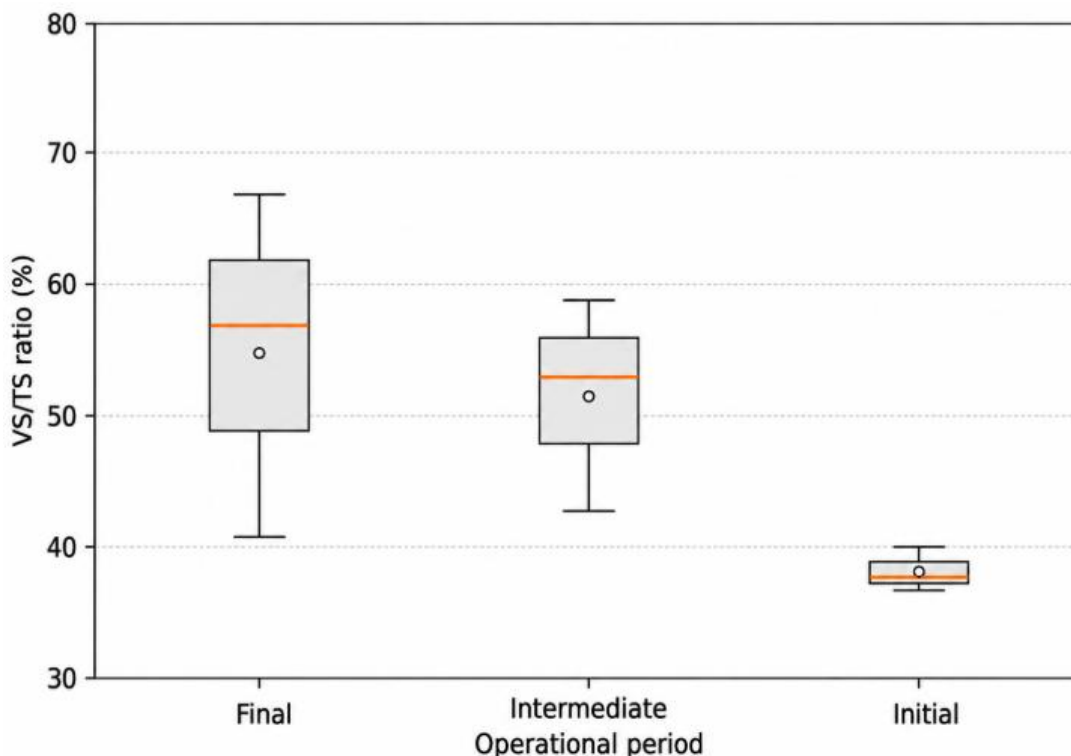
4.2 Razão SV/ST e estabilização da matéria orgânica

A relação SV/ST apresentou valores entre 36,71 e 66,77%, com variações entre os períodos inicial, intermediário e final da dragagem. Esse comportamento evidencia diferença no grau de estabilização da matéria orgânica ao longo do processo operacional. O período inicial apresentou maior concentração de matéria orgânica residual, enquanto os períodos intermediário e final indicaram material com maior influência da drenagem, do armazenamento e da estabilização parcial, comportamento compatível com processos de sedimentação, drenagem gravitacional e consolidação interna do lodo (Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2017; Koerner, 2012).

Valores mais baixos de SV/ST indicam maior grau de estabilização do lodo, condição desejável para transporte, armazenamento e destinação final, pois reduz a tendência de geração de odores e de degradação adicional. Por outro lado, valores elevados sugerem maior potencial energético residual, especialmente para processos de digestão anaeróbia, uma vez que a fração volátil representa a parcela

orgânica mais associada à produção de metano (Chernicharo, 2007; Aquino et al., 2007).

Figura 3 – Variação da razão sólidos voláteis/sólidos totais



Fonte: Autores (2026)

4.3 Oxigênio dissolvido (OD) e pH

Os valores de oxigênio dissolvido (OD) variaram entre 3,62 e 7,42 mg L⁻¹. O OD foi monitorado por indicar o grau de exposição do lodo ao oxigênio durante a dragagem, bombeamento e amostragem, sendo relevante para interpretar alterações redox que podem afetar a preservação da matéria orgânica e, consequentemente, o potencial energético do material. As menores concentrações foram observadas no início da dragagem, enquanto os maiores valores ocorreram nas etapas intermediária e final. Esse comportamento pode estar associado ao aumento da aeração promovido pelo bombeamento, revolvimento do lodo e maior contato da fase líquida com a atmosfera (APHA, 2017; Soares, 2006).

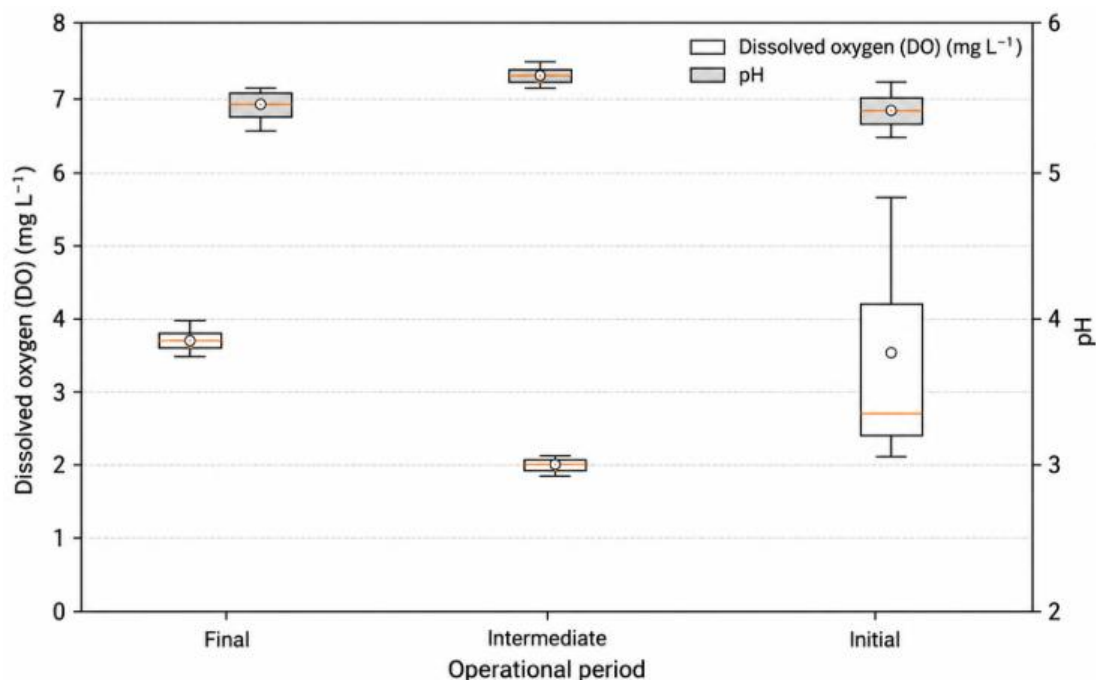
Os valores de pH variaram entre 2,94 e 5,57, evidenciando condição predominantemente ácida em todas as amostras avaliadas e inferior à faixa normalmente favorável à digestão anaeróbia, próxima da neutralidade. De acordo com Chernicharo (2007) e Metcalf & Eddy (2014), valores muito ácidos podem

reduzir a atividade metanogênica e exigir correção de alcalinidade antes do uso do substrato em biodigestores. Assim, embora a presença de SV indique potencial energético, o pH observado representa uma limitação operacional importante para a conversão eficiente da matéria orgânica em metano.

A acidificação pode estar associada ao acúmulo de ácidos orgânicos oriundos da degradação anaeróbia da matéria orgânica, à oxidação de compostos reduzidos, como sulfetos e espécies ferrosas, durante o revolvimento do sedimento, e à possível influência do condicionamento químico utilizado no desaguamento. Conforme descrito por Aquino e Chernicharo (2005), o acúmulo de ácidos graxos voláteis é uma das principais causas de redução do pH em sistemas anaeróbios sob desequilíbrio. Dessa forma, a variação conjunta de OD e pH indica que a dragagem promoveu alterações físico-químicas no lodo, especialmente pela exposição do material ao oxigênio, intensificação de reações de oxidação e aumento temporário das trocas gasosas com a atmosfera.

Comparativamente, o pH observado neste estudo foi mais baixo que o esperado para lodos estabilizados destinados à digestão anaeróbia, o que reforça a necessidade de ensaios complementares de alcalinidade, ácidos graxos voláteis e biodigestão. Para aproveitamento energético, recomenda-se avaliar previamente a neutralização ou mistura desse lodo com substratos de maior alcalinidade, a fim de reduzir riscos de inibição da etapa metanogênica.

Figura 4 – Oxigênio dissolvido (OD) e pH ao longo das camadas de lodo



Fonte: Autores (2026)

4.4 Condutividade elétrica

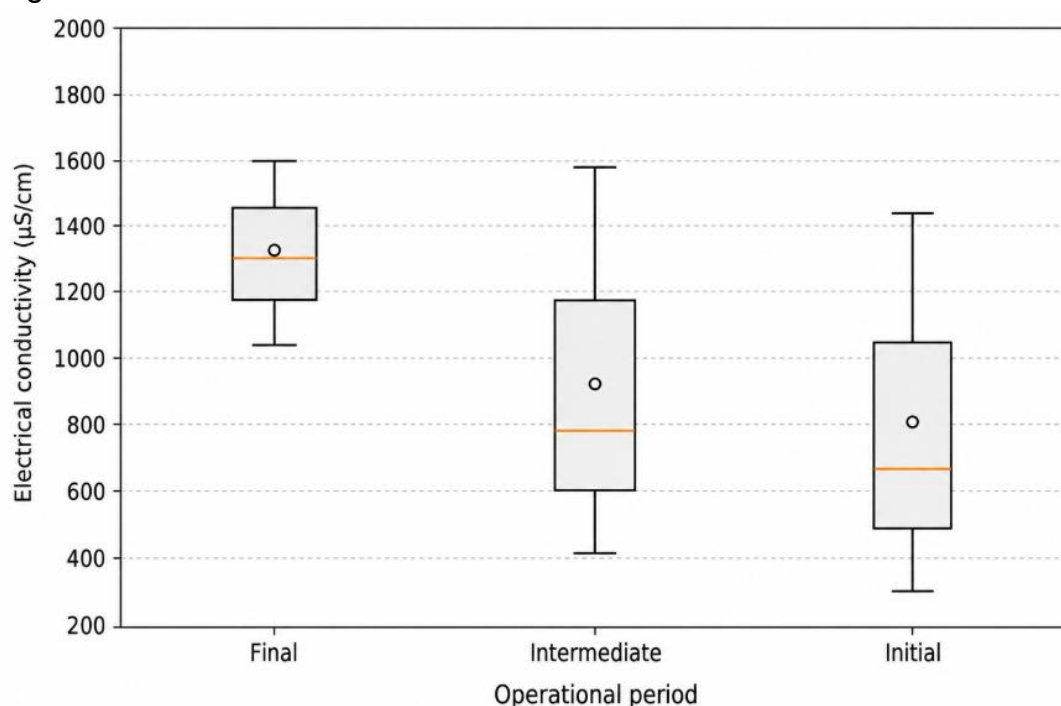
A condutividade elétrica apresentou valores entre 302 e 1.589 $\mu\text{S cm}^{-1}$, sendo o maior valor observado no material coletado na fase inicial da dragagem. Nas etapas intermediária e final, verificou-se redução gradual desse parâmetro.

O valor mais elevado na fração inicial indica maior concentração de espécies iônicas dissolvidas, tais como sais minerais, bicarbonatos, cloretos, sulfatos e formas solúveis de nitrogênio e fósforo. De acordo com APHA (2017), a condutividade elétrica está diretamente relacionada à concentração total de íons dissolvidos presentes no meio aquoso, sendo utilizada como indicador indireto da carga salina e do grau de mineralização.

A redução observada nas fases posteriores pode estar associada à drenagem do percolado ao longo do processo de desaguamento, promovendo remoção parcial de compostos solúveis, bem como à lixiviação interna causada pela passagem da água através da massa de lodo. Segundo Tchobanoglous et al. (2014), processos de adensamento e desaguamento alteram a distribuição de sólidos dissolvidos e particulados em função da separação líquido-sólido e da liberação de água intersticial.

Em relação ao aproveitamento energético, a condutividade contribui para avaliar a presença de sais dissolvidos que, em concentrações elevadas, podem interferir no equilíbrio osmótico dos microrganismos anaeróbios. No presente estudo, a redução da condutividade nas fases posteriores sugere remoção parcial da fração solúvel durante o desaguamento, condição que pode ser favorável ao manejo do lodo, embora a avaliação de íons específicos ainda seja necessária para verificar possíveis efeitos inibitórios em biodigestores (Metcalf & Eddy, 2014; Chernicharo, 2007).

Figura 5 – Condutividade elétrica através das camadas de lodo



Fonte: Autores (2026)

4.5 Demanda química de oxigênio (DQO)

Devido à elevada concentração de sólidos da matriz, foram realizados procedimentos prévios de diluição e separação das fases líquida e sólida, visando adequar as amostras à faixa operacional do equipamento e reduzir possíveis interferências analíticas.

O método utilizado apresentava faixa de leitura entre 200 e 1.500 mg L⁻¹ de DQO. Entretanto, mesmo após o preparo e diluição das amostras, não foi possível obter leitura válida, impossibilitando a quantificação experimental do parâmetro.

A ausência de leitura pode estar associada às características típicas de lodos provenientes de lagoas facultativas, como elevada carga orgânica, alta concentração de sólidos suspensos, turbidez intensa e heterogeneidade da matriz. Além disso, a presença de partículas finas em suspensão e compostos orgânicos recalcitrantes pode comprometer a eficiência da digestão química e interferir na resposta analítica do método (APHA, 2017; Jirka; Carter, 1975).

Segundo APHA (2017), amostras com elevado teor de sólidos e matéria orgânica frequentemente requerem adaptações metodológicas adicionais, como diluições seriadas, centrifugação, homogeneização intensiva e utilização de kits de alta faixa analítica.

Estudos de caracterização de lodos reportam concentrações de DQO superiores à faixa de kits colorimétricos convencionais, especialmente em matrizes com elevado teor de sólidos, alta fração orgânica e baixa estabilização biológica (Velkushanova et al., 2021; Metcalf & Eddy, 2014).

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram sólidos totais entre 1.580 e 3.100 mg L⁻¹, sólidos voláteis entre 580 e 2.070 mg L⁻¹ e relação SV/ST de até 66,77%, indicando elevada carga orgânica residual no material analisado. Esses resultados sugerem que a DQO das amostras ultrapassou a faixa operacional do método empregado, justificando a ausência de leitura válida.

A elevada fração de sólidos voláteis também indica potencial biodegradável significativo, evidenciando a possibilidade de aproveitamento do lodo em processos de digestão anaeróbia e produção de biogás (Chernicharo, 2007; Aquino et al., 2007).

Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de metodologias específicas para matrizes altamente concentradas, incluindo kits colorimétricos de alta faixa analítica, diluições seriadas adicionais, extração líquida padronizada do lodo e análises complementares, como carbono orgânico total (COT).

A impossibilidade de obtenção de leitura dentro da faixa operacional do equipamento reforça a complexidade analítica de lodos provenientes de lagoas de estabilização após desaguamento e evidencia a necessidade de metodologias específicas para matrizes com elevada concentração de sólidos e matéria orgânica.

Embora não tenha sido possível determinar experimentalmente a DQO das amostras, os resultados de ST, SV e relação SV/ST indicam quantidade significativa

de matéria orgânica residual. Assim, os dados disponíveis sustentam o potencial de aproveitamento energético do lodo, mas a quantificação precisa da produção de biogás depende de ensaios complementares, especialmente DQO em faixa analítica adequada e testes de potencial bioquímico de metano.

4.6 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro–Wilk e homogeneidade de variâncias de Levene, visando verificar o atendimento aos pressupostos necessários para aplicação da análise de variância (ANOVA) de um fator.

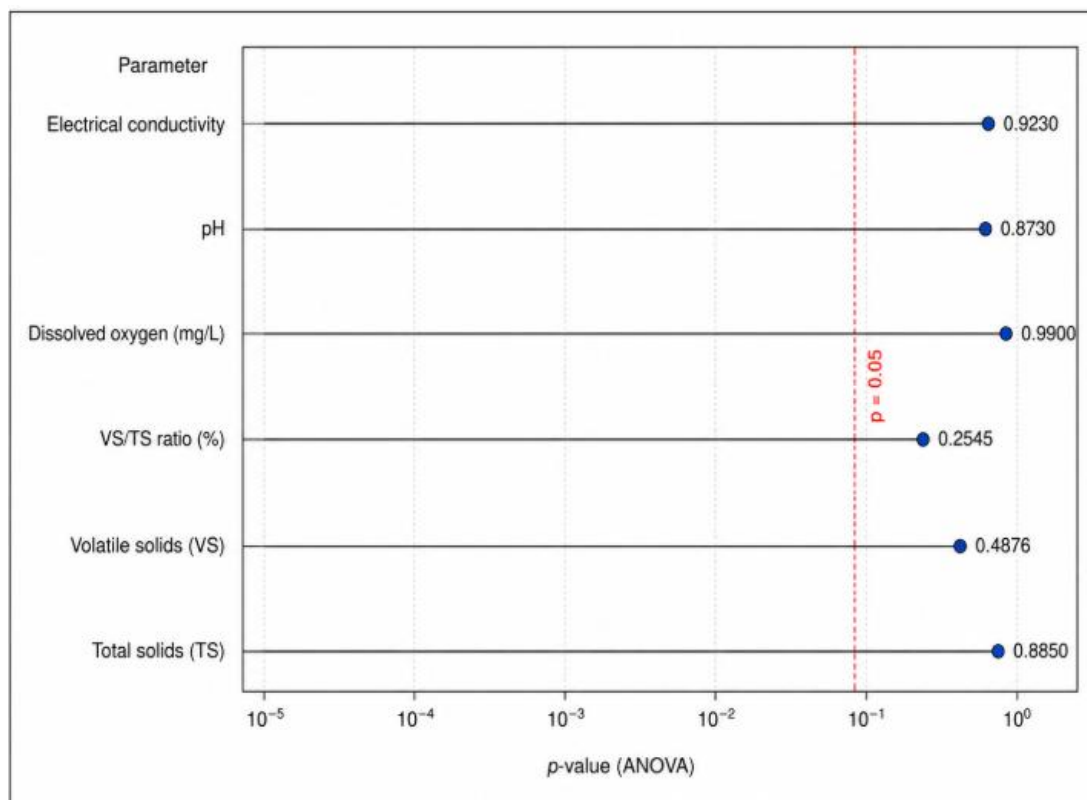
Os resultados indicaram distribuição aproximadamente normal para a maior parte das variáveis analisadas e homogeneidade de variâncias entre os grupos amostrais. A partir disso, aplicou-se ANOVA considerando os diferentes períodos operacionais amostrados nos contêineres geotêxteis (início, intermediário e final).

Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) entre os períodos para os parâmetros analisados, indicando que, nas condições deste estudo, não houve evidência estatística suficiente para confirmar a existência estratificação físico-química do material armazenado nos contêineres geotêxteis.

Em sistemas ambientais, é comum a ocorrência de elevada variabilidade intrínseca dos dados, o que pode dificultar a detecção estatística de diferenças entre grupos amostrais (Snedecor e Cochran, 1989). No caso dos lodos de lagoas de estabilização, fatores como heterogeneidade da biomassa, histórico operacional e condições de armazenamento podem contribuir para o aumento da dispersão experimental (Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2017).

Apesar da ausência de diferença estatisticamente significativa, os resultados descritivos indicaram tendência de variação vertical nos sólidos voláteis e na relação SV/ST, sugerindo alterações na distribuição da fração orgânica ao longo do perfil do lodo. Esse comportamento pode estar associado à sedimentação, compactação da massa sólida e degradação parcial da matéria orgânica durante o desaguamento nos contêineres geotêxteis (Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2017; Koerner, 2012).

Figura 6 – Valores de p obtidos por ANOVA para os parâmetros analisados



Fonte: Autores (2026)

4.7 Implicações para a recuperação de energia

Os resultados obtidos indicam que o lodo acondicionado nos contêineres geotêxteis apresentou concentração de sólidos compatível com o processo de desaguamento, refletindo a redução da fração líquida e maior estabilidade física do material armazenado. Os teores de sólidos totais observados são compatíveis com um material submetido a desaguamento, condição que contribui para redução do volume e facilita etapas de armazenamento, transporte e destinação final (Mortara, 2011).

Além da redução volumétrica, o desaguamento influencia diretamente os custos operacionais associados ao manejo do resíduo, uma vez que menores teores de umidade tendem a reduzir massa transportada, geração de percolado e riscos de vazamento durante movimentação e disposição (Batista Lucilene Ferreira, 2015; Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2017). Segundo Koerner (2012), sistemas geotêxteis de desaguamento favorecem a retenção da fração sólida e a drenagem

gradual da água intersticial, promovendo maior estabilidade física do material acondicionado.

A heterogeneidade observada entre os contêineres indica tendência de implicações operacionais relevantes, especialmente quanto à necessidade de homogeneização do material antes do transporte ou reaproveitamento energético. Os períodos com maiores relações SV/ST indicaram maior concentração de matéria orgânica biodegradável, enquanto os menores valores indicaram material parcialmente estabilizado.

Segundo Chernicharo (2007), substratos com elevada fração orgânica possuem maior potencial de conversão biológica em metano durante a digestão anaeróbia. Esse comportamento pode influenciar tanto a eficiência do aproveitamento energético quanto a padronização das características do lodo destinado a biodigestores ou outras rotas de tratamento (Metcalf & Eddy, 2014).

Dessa forma, o controle operacional das etapas de dragagem, desaguoamento e armazenamento torna-se fundamental para otimizar o gerenciamento do lodo, reduzir custos logísticos e aumentar a viabilidade técnica de reaproveitamento do material.

5 CONCLUSÕES

Operacionalmente, o processo de dragagem, desaguamento e armazenamento do lodo em contêineres geotêxteis promoveu alterações físico-químicas relevantes na biomassa proveniente das lagoas facultativas. Os resultados demonstraram variações nos teores de sólidos totais, sólidos voláteis, relação SV/ST, pH, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, sugerindo influência direta das condições operacionais, do tempo de armazenamento e da heterogeneidade vertical do material.

Os maiores teores de sólidos voláteis e relações SV/ST observados no período inicial indicaram maior disponibilidade de matéria orgânica biodegradável, sugerindo potencial para produção de biogás por digestão anaeróbia. Em contrapartida, os menores valores observados nos períodos posteriores indicaram maior estabilização da matéria orgânica em função da degradação parcial do material ao longo do armazenamento e do processo de desaguamento.

A análise estatística não identificou diferenças significativas entre as camadas avaliadas para os parâmetros analisados. Entretanto, os resultados descritivos sugerem tendências de segregação da fração orgânica e alterações na distribuição vertical dos sólidos, comportamento associado aos processos de sedimentação, compactação e drenagem interna do lodo nos contêineres geotêxteis.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o lodo removido de lagoas facultativas apresenta potencial para aproveitamento energético, especialmente devido à elevada presença de matéria orgânica residual. Contudo, estudos complementares envolvendo a determinação da DQO e ensaios de biodigestão são recomendados para quantificar de forma mais precisa sua capacidade de produção de biogás.

A caracterização físico-química do material e o controle operacional das etapas de dragagem e desaguamento tornam-se fundamentais para definição de estratégias de manejo, otimização do aproveitamento energético e redução de impactos ambientais associados à disposição final do lodo. Assim, considerando o volume expressivo de lodo gerado nas lagoas facultativas avaliadas e as características físico-químicas observadas, o reaproveitamento energético surge

como alternativa promissora para agregação de valor ao resíduo e redução dos impactos ambientais associados à sua disposição final.

6 REFERÊNCIAS

AQUINO, Sérgio F. de; CHERNICHARO, Carlos A. L. Accumulation of volatile fatty acids (VFAs) in anaerobic reactors under stress: causes and control strategies. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.

AQUINO, Sérgio F. et al. Methodologies for determining specific methanogenic activity (SMA) in anaerobic sludge. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, p. 192-201, 2007.

APHA; AWWA; WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. New York: APHA, 2017.

BATISTA, Franco Zotelle. Energy recovery from biogas generated from sanitation waste. 2016. Monograph (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Federal Institute of Education, Science and Technology of Espírito Santo, São Mateus, 2016.

BATISTA, Lucilene Ferreira. Sludge generated in wastewater treatment plants in the Federal District: a study of its suitability for conditioning, use, and final disposal. Brasília: University of Brasília, 2015.

BRASIL. National Water and Basic Sanitation Agency (ANA). Where we want to get: universalization. ANA Portal, 2025. Available at: <https://www.ana.gov.br/saneamento/onde-queremos-chegar>. Accessed on: Dec. 29, 2025.

BRASIL. Ministry of Cities. Access to information: sanitary sewage. SNIS Portal, 2022. Available at: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>. Accessed on: Dec. 29, 2025.

BRASIL. Secretariat of Social Communication. Demographics: Brazil's population reaches 213.4 million inhabitants, according to IBGE. GOV Portal, 2025. Available at: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/08/populacao-do-brasil-alcanca-marca-de-213-4-milhoes-de-habitantes-divulga-ibge>. Accessed on: Dec. 29, 2025.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Anaerobic reactors: principles of biological wastewater treatment*. Belo Horizonte: Polytécnica, 2007.

DE PAULA PATULSKI, Ana Caroline et al. Correlations between biogas and dissolved methane generated and physicochemical parameters of sewage in

modified full-scale UASB-type reactors. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 25, p. e73721, 2025.

FRANÇA, Josué Tadeu Leite et al. Removal of sludge from stabilization ponds and its conditioning in bags. Fortaleza: Federal University of Ceará, 2011. Available at: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/44743>. Accessed on: Jan. 10, 2026.

GONÇALVES, R. (coord.). Management of sludge from non-mechanized stabilization ponds. Rio de Janeiro: ABES, 1999. (PROSAB – Basic Sanitation Research Program).

GOOGLE EARTH PRO. Satellite image of SAPO WWTP, Rio Verde – GO (17°49'47.87" S; 50°54'27.82" W). 2025. Available at: <https://earth.google.com/>. Accessed on: May 14, 2026.

GUIMARÃES, Renata Araújo et al. Removal of sludge from stabilization ponds using an amphibious machine. In: Essential demands for the advancement of sanitary and environmental engineering 2. Rio de Janeiro: Atena Editora, 2020. p. 266-275.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2: Energy. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

JIRKA, A. M.; CARTER, M. J. Micro semiautomated analysis of surface and waste waters for chemical oxygen demand. *Analytical Chemistry*, v. 47, n. 8, p. 1397-1402, 1975.

KOERNER, R. M. Designing with Geosynthetics. 6th ed. Bloomington: Xlibris, 2012.

METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

METCALF & EDDY; AECOM. Wastewater engineering: treatment and resource recovery. Porto Alegre: AMGH, 2014.

MONDALA, A.; LIANG, K.; TOGHIANI, H.; HERNANDEZ, R.; FRENCH, T. Biodiesel production by in situ transesterification of municipal primary and secondary sludges. *Bioresource Technology*, v. 100, p. 1203-1210, 2009.

MORTARA, Fernando Cintra. Use of drainage beds in anaerobic sludge dewatering. 2011. Doctoral Thesis – University of São Paulo, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, Débora Carvalho da Silva; AZEVEDO, Paulo Gabriel Ferreira de; CAVALCANTI, Luiz Antônio Pimentel. Biological processes for wastewater

treatment: an integrative review. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 8, n. 18, p. 397-415, 2021.

PEDROSA, Marcelo Mendes. Bio-oil and biogas from thermochemical degradation of domestic sewage sludge in a rotary cylinder. 2011. Doctoral Thesis in Chemical Engineering – Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. Production and treatment of sewage sludge: a review. *Revista Liberato*, v. 11, n. 16, p. 147-158, 2010.

RYCKEBOSCH, Eline; DROUILLON, Margriet; VERVAEREN, Han. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011.

SILVA, L. K. T. et al. Preliminary evaluation of the efficiency of stabilization ponds in the state of Rio Grande do Norte. In: CONNEPI Proceedings. Belém, 2009.

SILVA, Maria Rosângela da et al. Stabilization ponds: a review study. In: Brazilian Congress on Environmental Management and Sustainability – CONGESTAS, 2015, João Pessoa. Proceedings [...]. João Pessoa: CONGESTAS, 2015. v. 3.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. Statistical Methods. 8th ed. Ames: Iowa State University Press, 1989.

SOARES, Carlos Roberto Lips. Evaluation of the water injection dredging process in estuaries. 2006. Master's Dissertation in Ocean Engineering – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

SOARES, M. R. Distribution coefficient (K_d) of heavy metals in soils of São Paulo State. 2004. Doctoral Thesis in Soil Science and Plant Nutrition – University of São Paulo, São Paulo, 2004.

TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

VAN HAANDEL, A. C.; ALEM SOBRINHO, P. Production, composition, and constitution of sewage. In: Biosolids – Alternatives for the use of sanitation residues. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 1-417.

VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. V. R. Behavior of the activated sludge system. Campina Grande: Epgraf, 1999.

VELKUSHANOVA, K. et al. Laboratory procedures and methods for characterisation of faecal sludge. Eawag/Sandec, 2021.

VON SPERLING, Marcos. Stabilization ponds. 2nd ed. Belo Horizonte: Department of Sanitary and Environmental Engineering – UFMG, 2002. 196 p. (Principles of biological wastewater treatment, v. 3).

VON SPERLING, M. Stabilization ponds. 3rd ed. Belo Horizonte: Department of Sanitary and Environmental Engineering – UFMG, 2017.