

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

**PROPOSTA DE ÍNDICE DE TRATAMIENTO DE
ESGOTO SANITÁRIO PARA ESTAÇÕES COM
A TECNOLOGIA UASB NO MUNICÍPIO DE
FORTALEZA, CE**

* Helenamara Fonseca Sobrinho de Oliveira ¹
Ana Bárbara de Araújo Nunes ¹

**PROPOSAL FOR SANITARY SEWAGE TREATMENT
INDEX FOR STATIONS WITH UASB TECHNOLOGY IN
THE MUNICIPALITY OF FORTALEZA, CE**

Recibido el 16 de septiembre de 2022. Aceptado el 6 de marzo de 2023

Abstract

Wastewater Treatment Plants (WWTP) have the function of promoting the treatment of wastewater, thus being an option for mitigating water scarcity. Some of these WWTP, however, have problems in monitoring and evaluating their treatment processes, disposing of their effluents in disagreement with the environmental legislation of release, thus harming the health of the water bodies. The objective of this work consisted in the construction of a Sanitary Sewage Treatment Index (SSTI), as an innovative tool, which qualitatively analyzed parameters based on environmental legislation and assists in decision-making regarding the release of effluents from WWTP. For this, eleven WWTP were chosen, operating with the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), located in Fortaleza-Ce, to evaluate their data on treated effluents between 2016 and 2020. The index was built using principal component analysis and WWTP were classified, based on compliance with environmental legislation, into three classes: unsatisfactory, satisfactory, and excellent. From the analysis of the applied indices, four stations were classified as unsatisfactory, four as satisfactory and three with excellent compliance with the legislation evaluated. Therefore, the index objectively represented the effluents and helped the decision making regarding the release into the water bodies.

Keywords: mitigation, discharge, UASB, index.

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Avenida Mister Hull, S/N, Fortaleza, Ce. 60356-000. Brasil. Email: 31.helena.oliveira.22@gmail.com

Resumo

As Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) têm a função de promover o tratamento das águas residuárias, logo sendo uma opção para a mitigação da escassez hídrica. Algumas dessas estações, porém, possuem problemas no monitoramento e na avaliação dos seus processos de tratamento, descartando os seus efluentes em desacordo com as legislações ambientais de lançamento, logo prejudicando a saúde dos corpos hídricos. O objetivo deste trabalho consistiu na construção de um índice de tratamento de esgoto sanitário (ITES), como uma ferramenta inovadora, que analisou qualitativamente parâmetros com base nas legislações ambientais e auxiliaria na tomada de decisão quanto ao lançamento dos efluentes das ETEs. Para isto, foram escolhidas onze estações, que operam com a tecnologia reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), localizadas em Fortaleza-CE, visando avaliar os seus dados de efluentes tratados entre 2016 e 2020. O índice foi construído utilizando análise de componentes principais e as estações foram classificadas, com base no atendimento das legislações ambientais, em três classes: insatisfatório, satisfatório e excelente. A partir da análise dos índices aplicados, quatro estações foram classificadas como insatisfatórias, quatro como satisfatórias e três com atendimento excelente as legislações avaliadas. Portanto, o índice representou objetivamente os efluentes e auxiliou a tomada de decisão quanto ao lançamento em corpos hídricos.

Palavras-chave: mitigação, lançamento, UASB, índice.

Introdução

As estações de tratamento de efluentes (ETEs) têm a função de remover poluentes das águas residuárias e gerar água tratada ambientalmente segura. Logo, são instalações capazes de contribuir para a mitigação da escassez hídrica através dos processos envolvidos no tratamento (Mustapha *et al.*, 2017). Porém, devido à falta de monitoramento adequado e avaliação eficiente das etapas do tratamento, as ETEs têm lançado os seus efluentes em desacordo com as legislações ambientais e têm ocasionado episódios de poluição, que comprometem a qualidade dos corpos hídricos receptores (Gosset *et al.*, 2021).

Esses episódios de poluição podem ser evitados com o uso de ferramentas que orientem o correto lançamento dos efluentes, priorizando a saúde do corpo hídrico receptor. A construção de índices é um exemplo dessas ferramentas, pois o índice pode refletir a qualidade do efluente tratado, através da análise de parâmetros importantes no monitoramento das estações. Logo, sendo uma ferramenta de orientação para a tomada de decisão quanto ao lançamento do efluente tratado (Gémar *et al.*, 2018).

Há vários estudos que aliam os índices às ETEs, seja na avaliação e aprimoramento dos seus processos, como indicadores quantitativos de desempenho ambiental ou para a avaliação de processos específicos dos tratamentos (Liu *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2019). Çelekli e Şahin (2021) avaliaram a sustentabilidade da qualidade de efluentes de águas residuárias através da construção do índice de poluição de algas modificado. Já Mustapha *et al.* (2017)

desenvolveram o índice verde, como um indicador quantitativo geral do desempenho ambiental de ETEs, dentre outros.

Nesse contexto, este trabalho objetivou a construção do Índice de Tratamento de Esgoto Sanitário (ITES) específico para ETEs com foco na remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos totais e coliformes termotolerantes. O ITES se tratou de uma ferramenta de auxílio a tomada de decisão quanto ao lançamento dos efluentes, retratando a qualidade do efluente tratado de ETEs quanto ao atendimento das legislações ambientais de lançamento. Para isto foram selecionadas ETEs em operação na região metropolitana de Fortaleza-Ce, que operam com os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). A aplicação do índice não só auxiliaria a tomada de decisão quanto ao lançamento do efluente, como também se trataria de uma linguagem mais acessível sobre a sua qualidade.

Metodologia

Localização e descrição da área de estudo

A área de estudo está localizada na bacia hidrográfica do rio Cocó, um dos principais recursos hídricos da região metropolitana de Fortaleza, situada na porção centro-norte do estado do Ceará e parte do sistema Cocó/Coaçu (Leal, 2014). Em termos de esgotamento sanitário, a bacia é denominada grande bacia do Cocó, abrange 65 bairros do município de Fortaleza (Fortaleza, 2014).

Estações de tratamento de efluentes e parâmetros selecionados

A capital cearense opera com dois sistemas de esgotamento sanitário; o sistema integrado, que converge o efluente para a estação de pré-condicionamento de esgoto (EPC) e os sistemas isolados. Estes sistemas não estão interligados ao sistema integrado e uma das destinações de seus efluentes ocorre por reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo, do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) com o pós-tratamento (biofiltro aerado submerso - BF) ou sem (Fortaleza, 2014). Essa tecnologia possui limitada capacidade de remoção de poluentes, logo podendo ser necessária a aplicação de pós-tratamento aeróbio nas ETEs que as utilizam. No Brasil, os reatores UASB são a segunda tecnologia mais utilizada para o tratamento de efluentes (Cerqueira e Aisse, 2021).

Para este estudo, foram selecionadas onze estações de tratamento de efluentes (ETEs) integrantes dos sistemas isolados e que operam com o tratamento anaeróbio UASB, sendo o UASB seguido de cloração (7 estações) e UASB com o pós-tratamento biofiltro aerado submerso (BF) também seguido de cloração (4 estações) como pode ser visualizado na Tabela 1. O esquema geral das ETEs analisadas pode ser visualizado na Figura 1.

Tabela 1. Estações de tratamento de efluentes selecionadas

Tecnologia	Sigla	ETE
UASB com pós-tratamento seguido de cloração	UASB + BF + CLOR	Centro de Eventos Aldemir Martins Castelão Rosalina Lago Azul Sítio Santana Zeza Tijolo
UASB sem pós-tratamento seguido de cloração	UASB + CLOR	Novo Barroso Riacho Doce Itaperí Aracapé III

Fonte: Autoria própria, 2022.

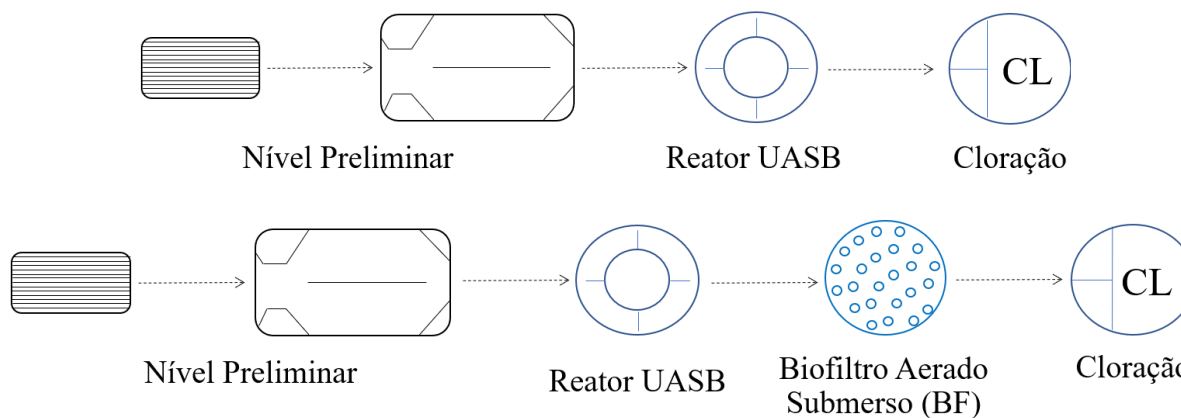


Figura 1. Esquema geral das ETEs com reator UASB seguido de Cloração (A) e com pós-tratamento (BF) seguido de Cloração (B). Fonte: Autoria própria, 2022.

Os dados de qualidade dos efluentes foram solicitados à Companhia de Água e Esgoto do estado do Ceará (CAGECE) através do portal Ceará Transparente. A CAGECE os disponibilizou através de relatórios, do período de 2016 a 2020, e definiu que todas as estações selecionadas se encontram sob a responsabilidade da Unidade de Negócio Metropolitana de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE). A partir da análise dos relatórios, os parâmetros foram selecionados com base na quantidade de informações em número suficiente para aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP). Dessa forma, foram selecionados: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST) e *Escherichia coli* (*E.coli*).

As concentrações de DQO foram convertidas em Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), devido as legislações para o lançamento dos efluentes, nacional CONAMA nº 430 (Brasil, 2011) e estadual COEMA nº 02 (Ceará, 2017), exigirem limites para este parâmetro. O valor de conversão para a relação DQO/DBO foi baseada em valores da literatura e valores obtidos a partir de algumas análises de DBO que foram disponibilizadas pela CAGECE durante o período estudado. De acordo com Von Sperling (2014), efluentes oriundos de tratamento biológico podem apresentar valores, para a relação DQO/DBO, entre 4.0 ou 5.0. Logo, a partir do conjunto de dados de DBO e DQO analisados, a relação obtida foi de aproximadamente 4.0, sendo este o valor utilizado para a conversão.

Construção do Índice de Tratamento de Esgoto Sanitário

Os dados dos relatórios foram convertidos em planilhas no Excel para aplicação da ACP. A ACP se trata de ferramenta estatística que visa descrever a estrutura de variância e covariância de um conjunto de variáveis ou dimensões, através de combinações lineares dos elementos desse conjunto (Karimi *et al.*, 2021). Há várias aplicações de ACP nas ETEs, que vão desde a detecção direta de falhas, reconstrução de dados, monitoramento do nível de desempenho de ETEs (Ebrahimi *et al.*, 2017; Newhart *et al.*, 2019).

Para a aplicação de ACP, procedeu-se com a realização dos testes de correlação das variáveis a fim de verificar se eram estatisticamente independentes. Pois, nesta condição, não seria possível gerar agrupamentos para a formação de nenhum construto, ou seja, a construção de fatores não faria sentido (Figueiredo Filho e Da Silva Júnior, 2010). Avaliou-se a matriz de correlação (coeficientes > 0.3), os testes de Kaiser-Meyer-Olkin – KMO (≥ 0.5) e de Bartlett – BTS ($p < 0.05$, estatisticamente significativa).

Em seguida, devido a sensibilidade da ACP e com o propósito de reduzir os erros, os dados foram normalizados. Todas as análises estatísticas foram executadas no software *Jamovi* 1.6 (Jamovi, 2021). As análises de comparações utilizaram os valores da média aritmética, em específico as semestrais, para cada variável durante o período de análise. O uso das médias semestrais, após vários testes, se mostrou mais viável para a construção do índice devido inconsistências presentes no conjunto de dados, que dificultaram o seu tratamento. Para cada parâmetro analisado, em geral, houve mais de 50% das análises esperadas, sendo este um dos requisitos para a escolha dos parâmetros. A quantidade de análises por semestre foi variável para cada estação estudada.

A aplicação da ACP ocorreu em algumas etapas, que foram desde a construção da matriz de número de variáveis por número de amostras, até o descarte de componentes principais (CPs) menos relevantes. Para a extração do número de componentes foi utilizado o modelo de análise de fator, que utilizou a variância da combinação linear das variáveis observadas para a realização da extração de fatores (Palácio, 2004). A rotação de fatores foi ortogonal, do tipo varimax, que buscou minimizar o número de variáveis com altas cargas em cada fator (Figueiredo Filho e Da Silva Júnior, 2010).

O cálculo do Índice de Tratamento do Esgoto Sanitário (ITES) teve como base o Índice de Qualidade de Água (IQA) da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022), cujo cálculo é baseado no produtório ponderado dos parâmetros (Equação 1). Rolim (2016) aplicou metodologia semelhante a esta pesquisa, ao construir o seu índice de estado trófico baseado no produtório ponderado de seus parâmetros e utilizando ACP.

$$ITES = \prod_i^n q_i^{w_i} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde

q_i : Qualidade da i -ésima variável (valor entre 0 e 100, obtido através da concentração ou medida dos parâmetros)

w_i : Peso da variável (valor entre 0 e 1)

Sendo o $\sum w_i = 1$

O peso de cada variável foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^L F_l A_l^i}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^L F_l A_l^i} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde

F : Fatores extraídos para o modelo

A_i : Comunalidade de cada variável no fator

L : Número de componentes

A qualidade das variáveis (q_i) foi definida como um número adimensional entre 0 e 100, quanto melhor a qualidade da variável, maior será o valor do índice e mais próximo de 100. Para isto, foram definidas três faixas baseadas no atendimento a legislação de lançamento para cada parâmetro estudado: insatisfatório (0 – 39.9), satisfatório (40 – 69.9) e excelente (70 – 100). A faixa do insatisfatório consistiu em não atendimento dos parâmetros estudados, a faixa do satisfatório houve o atendimento dos parâmetros e por fim, a faixa do excelente ocorreu o atendimento e as concentrações dos parâmetros foram significativamente inferiores aos limites estabelecidos pelas legislações ambientais.

As concentrações de cada faixa foram definidas para os parâmetros estudados, como visualizado na Tabela 2. Para a faixa do insatisfatório, os valores foram superiores aos limites exigidos nos padrões de lançamento e foram definidos com base em valores da literatura para esgoto bruto e trabalhos locais que avaliaram as estações estudadas nesta pesquisa (Dos Santos, 2008; Monteiro, 2009; Von Sperling, 2014). Para o parâmetro *E.coli*, a construção também ocorreu com base nas legislações de lançamento além dos estudos analisados, sendo definida a concentração de $1,5+04$ org/100mL a fim estabelecer o intervalo da classe 0 – 39,9 que permitisse a diferenciação do q_i dentro da classe. Os valores para essa faixa refletiram a qualidade do efluente em condições de não tratamento ou de tratamento inadequado. A faixa satisfatório foi construída com os valores exigidos pelas legislações de lançamento. Por fim, a faixa excelente consistiu em

concentrações inferiores em mais de 80% as concentrações estabelecidas pelas legislações (resoluções CONAMA nº 430 – Brasil, 2011 e COEMA nº 02 – Ceará, 2017). Os valores das concentrações superiores aos limitados para a faixa zero, automaticamente tiveram suas notas de qualidade iguais a zero. Enquanto os valores das concentrações inferiores aos da faixa 100, tiveram, automaticamente, suas notas de qualidade iguais a 100.

Tabela 2. Faixas para a qualidade das variáveis (q_i)

Faixa	DBO (mg/L)	SST(mg/L)	<i>E.coli</i> (org/100 mL)
0 – 39.9	364 – 121	300 – 101.1	1.50E+04 – 5.01E+03
40 – 69.9	120 – 72.1	100 – 60.1	5.00E+03 – 3.00E+03
70 – 100	72 – 24	120 – 72.1	3.00E+03 – 1.00E+03

Fonte: Autoria própria, 2022.

A qualidade das variáveis (q_i), para cada análise estudada, foi obtida através da interpolação das concentrações de cada faixa para cada parâmetro (Tabela 2). Após obtida a qualidade, esses dados foram introduzidos nas equações construídas, de acordo com a Equação 1. Finalmente, a classificação das estações ocorreu através de três classes; a classe Insatisfatório, com o não atendimento de pelo menos um dos parâmetros estudados, a classe Satisfatório, na qual todos os parâmetros atenderam e, por fim, a classe Excelente, na qual as concentrações se encontraram significativamente inferiores aos valores estabelecidos pela legislação ambiental.

A metodologia do ITES é inovadora, pois baseia-se na análise qualitativa, direta e objetiva, dos parâmetros estudados quanto apenas as legislações ambientais de lançamento (resoluções CONAMA nº 430 – Brasil, 2011 e COEMA nº 02 – Ceará, 2017). Apesar de similaridades metodológicas, não foram encontrados índices relacionados ao esgotamento sanitário baseados no mesmo objetivo. O levantamento de índices identificou metodologias que avaliaram a produtividade das ETEs, a partir da análise de condições operacionais e de parâmetros (Molinos-Senante *et al.*, 2016; Sabia *et al.*, 2020); que realizaram a análise exclusiva de parâmetros biológicos para a reutilização das águas residuárias na irrigação (Çelekli e Şahin, 2021) ou que avaliaram desempenho através da utilização de indicadores relacionados a qualidade, operação e manutenção dos serviços de esgotamento (Lopes *et al.*, 2016). Dessa forma, os resultados foram discutidos a partir de análise comparativa com trabalhos que avaliaram a qualidade de efluentes das estações estudadas, a fim de atestar a robustez do ITES.

Resultados e discussão

Análise de componentes principais e construção das equações do índice

A aplicação da ACP procedeu com a realização dos testes de correlação, nos quais todos indicaram associação entre as variáveis. Para os parâmetros utilizados, estudos como os de Silva *et al.*, (2021), que aplicaram análise de componentes principais (ACP) para a construção do índice de qualidade de água, também selecionaram a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e coliformes termotolerantes, dentre outras variáveis, como parâmetros importantes para a construção do seu índice. Além desses, Molinos-Senante (2016) construíram índice de produtividade de ETEs e selecionaram, como variáveis importantes para avaliar o desempenho das estações, sólidos suspensos e matéria orgânica, dentre outras.

A aplicação da ACP com os dados da tecnologia UASB com pós-tratamento BF seguido de cloração gerou resultados que explicaram 81.8% da variação do conjunto de dados para a primeira componente principal (CP1). A partir da análise dos seus resultados, os pesos de cada variável foram determinados e a equação, para esta tecnologia, foi construída (Equação 3).

$$ITES = q_{DBO}^{0.05} \cdot q_{SST}^{0.55} \cdot q_{E.Coli}^{0.40} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde

q: Qualidade da variável

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

SST – Sólidos Suspensos Totais

E.coli – *Escherichia coli*

Para a tecnologia UASB seguida de cloração, a ACP gerou resultados com explicação de 57,7% da variação do conjunto de dados, também para a CP1. O resultado das ponderações e respectiva construção da sua equação estão visualizados na Equação 4.

$$ITES = q_{DBO}^{0.05} \cdot q_{SST}^{0.93} \cdot q_{E.Coli}^{0.02} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde

q: Qualidade da variável

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

SST – Sólidos Suspensos Totais

E.coli – *Escherichia coli*

Pela aplicação da ACP, o modelo com uma componente principal foi adequado para representar as variáveis, com percentuais de explicação consideráveis. Apesar do pequeno número de variáveis estudadas, foi possível alcançar estes percentuais e identificar os parâmetros com maior contribuição. Isto também foi realizado por Droese *et al.* (2020), que em seu estudo com a ACP não houve redução do número variáveis, mas também identificação das com maiores contribuições.

Índice de Tratamiento de Esqoto Sanitário

Primeiramente, os ITESs foram calculados para as ETEs pertencentes a tecnologia UASB com BF. Após a aplicação dos respectivos cálculos, houve três ETEs destacadas positivamente. As ETEs Centro de Eventos ($ITES_{\text{médio}} = 100$), Castelão ($ITES_{\text{médio}} = 100$) e Aldemir Martins ($ITES_{\text{médio}} = 90$) lançaram seus efluentes com concentrações de DBO, SST e *E.coli* abaixo dos limites exigidos para o lançamento em corpos hídricos receptores, logo gerando ITESs que as classificaram como excelentes (70 – 100) quanto ao atendimento das legislações ambientais. Os dados das concentrações dos parâmetros e equivalentes ITESs podem ser visualizados para a estação Centro de Eventos na Figura 2, na qual a linha vermelha tracejada indica as concentrações limites estabelecidas pelas legislações. A partir da análise da Figura 1 é possível visualizar a conformidade dos seus parâmetros e conseqüente produção de ITESs na faixa excelente de atendimento.

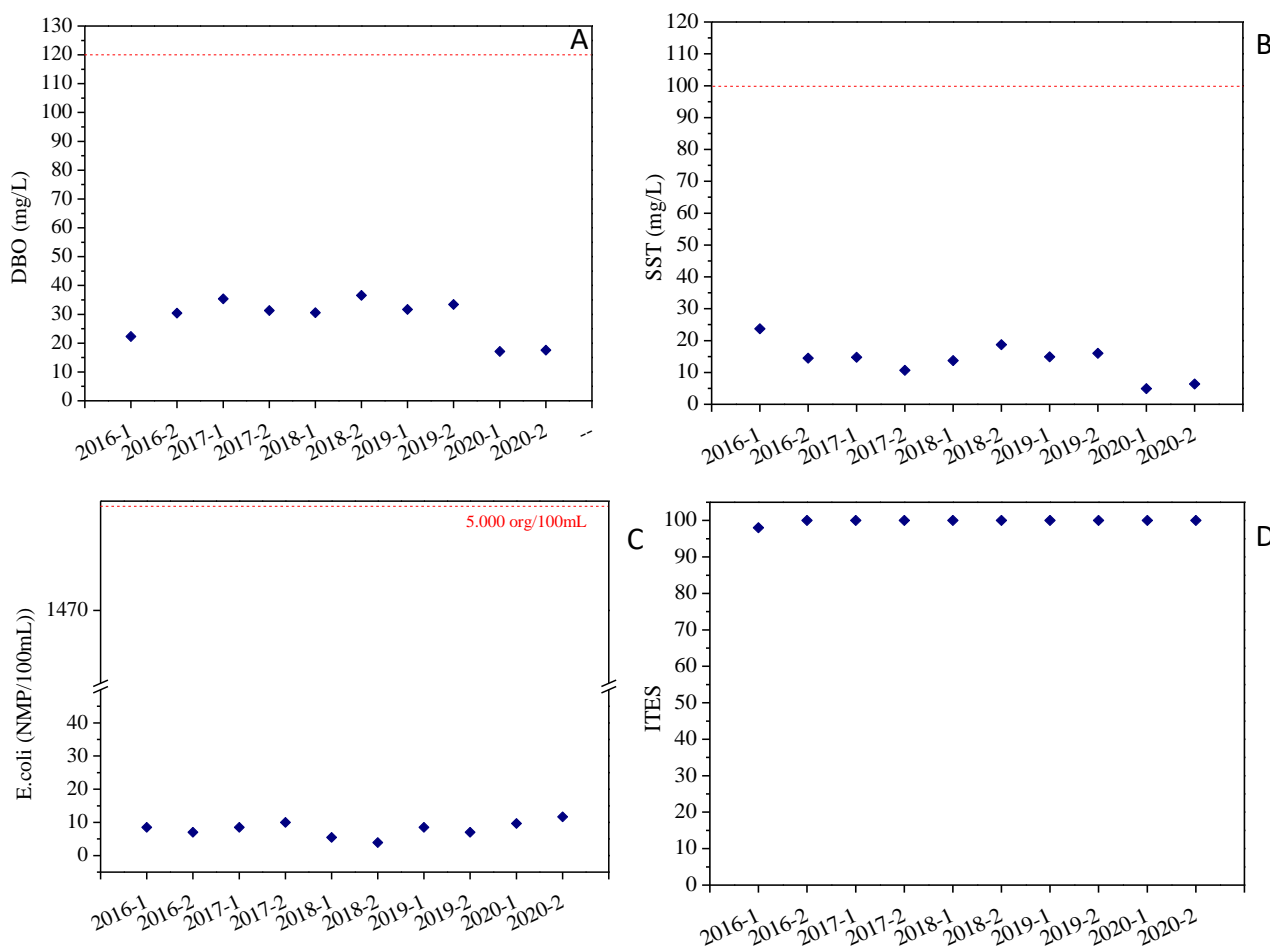


Figura 2. Concentrações médias dos parâmetros DBO (A), SST (B) e *E.coli* (C) e ITESs (D) para a ETE Centro de Eventos. Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental. Fonte: Autoria própria, 2022.

Resultados semelhantes foram encontrados por autores que avaliaram ETEs de Fortaleza. De acordo com Rollemberg (2017), que avaliou o potencial de reúso de efluentes de 64 ETEs da capital cearense, a ETE Castelão atendeu aos limites para o lançamento em todo o período de realização da sua pesquisa. Já para Magalhães (2017), as estações Castelão e Centro de Eventos estiveram conformes ambientalmente e operacionalmente durante o período analisado. Logo, corroborando os resultados encontrados nesta pesquisa.

A realidade para a ETE Rosalina foi diferente das estações supracitadas, como pode ser visualizado na Figura 3, visto que as concentrações de quase todos os seus parâmetros (SST e *E.coli*) estiveram em desacordo com os limites estabelecidos em legislações. Dessa forma, os seus índices se encontraram na classe do insatisfatório (0–39.9; $ITES_{\text{médio}} = 0.0$). Além disso, as concentrações de *E.coli* foram consideravelmente altas, logo seus índices alcançaram valores iguais a zero para a grande maioria das análises semestrais.

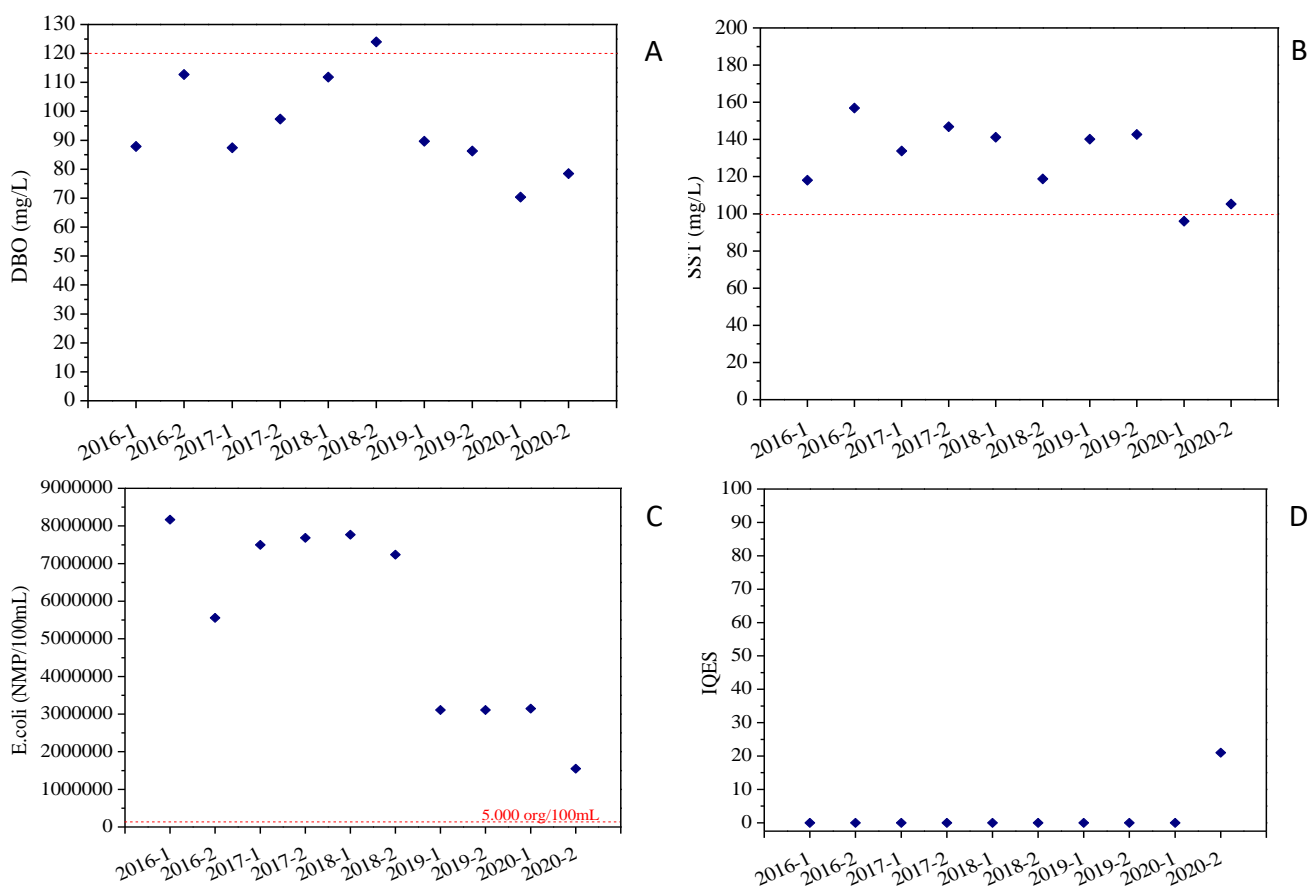


Figura 3. Concentrações médias dos parâmetros DBO (A), SST (B) e *E.coli* (C) e ITESs (D) para a ETE Rosalina. Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental. Fonte: Autoria própria, 2022.

Estudos realizados por Magalhães (2017) e Marques e Nunes (2018) relataram, para a ETE Rosalina, concentrações dos parâmetros superiores aos limites legalmente permitidos. Além disso, buscando esclarecimento sobre as condições operacionais dessa estação, foram solicitadas à Supervisora da Unidade de Negócio Metropolitana de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE) informações sobre o seu funcionamento. Através de informação verbal prestada, foi informado que o sistema de tratamento dessa estação se encontra prejudicado, devido a não realização de manutenção em tempo hábil, necessitando de reforma no sistema de tratamento (Comunicação Pessoal, 2022). De maneira geral, na Figura 4 visualiza-se, para a tecnologia UASB com BF, que as estações apresentaram ITESs excelentes, exceto para a ETE Rosalina com atendimento insatisfatório a legislação ambiental. Dessa forma, com exceção da ETE Rosalina, todas as demais estações apresentaram concentrações para os seus parâmetros adequadas ao lançamento nos corpos hídricos receptores.

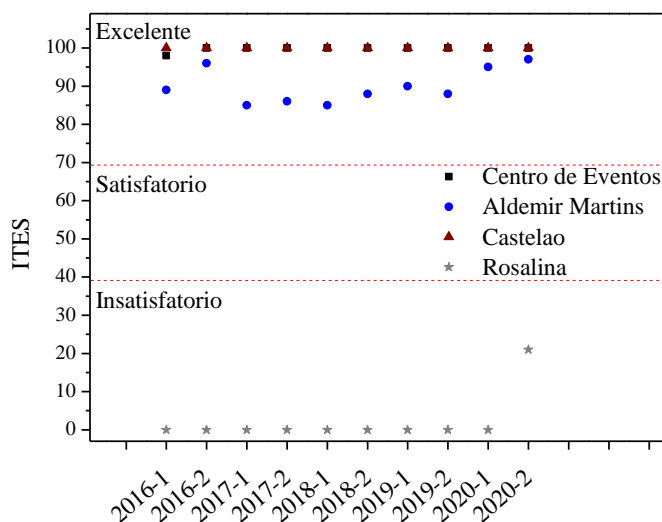


Figura 4. ITESs das estações com tecnologia UASB seguida de pós-tratamento (BF) e cloração. Linha vermelha tracejada representa o limite entre as faixas de classificação. Fonte: Autoria própria, 2022.

Para a tecnologia UASB seguida de cloração, os destaques positivos foram as estações Sítio Santana ($ITES_{\text{médio}} = 60.7$), Aracapé III ($ITES_{\text{médio}} = 55.3$) e Novo Barroso ($ITES_{\text{médio}} = 45.9$) que foram classificadas como satisfatórias (40 – 69.9), com todos os seus parâmetros atendendo as legislações de lançamento. Isto pode-se ser verificado na Figura 5 para a estação Sítio Santana.

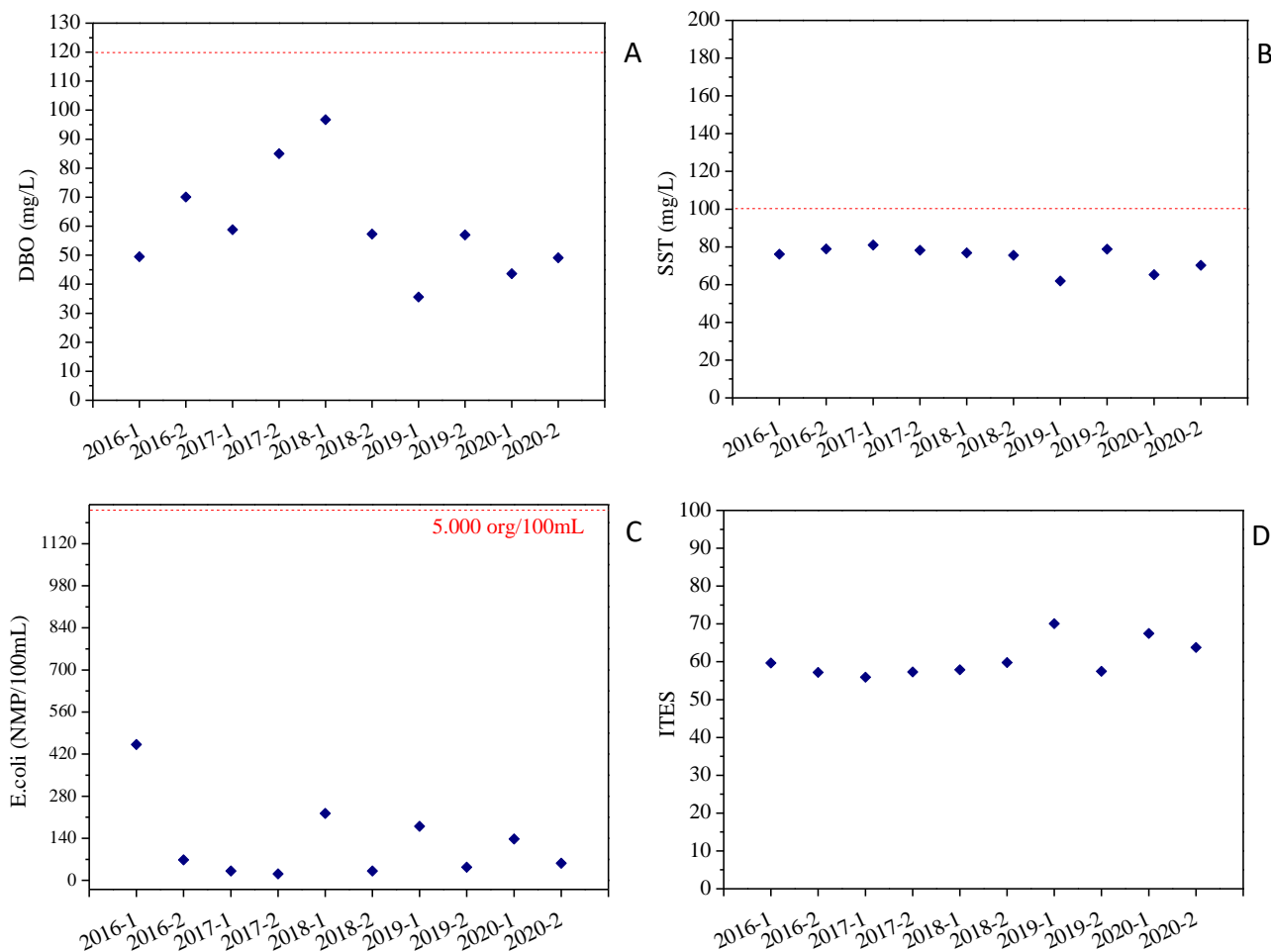


Figura 5. Concentrações médias dos parâmetros DBO (A), SST (B) e *E.coli* (C) e ITESs (D) para a ETE Sítio Santana. Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental. Fonte: Autoria própria, 2022.

Para a ETE Lago Azul, como pode ser visualizado na Figura 6, as concentrações de DBO e SST atenderam a legislação ambiental, porém as de *E.coli* estiveram em desacordo com os limites estabelecidos durante maior parte do período analisado. Dessa forma, com pelo menos um dos seus parâmetros em desacordo, os seus índices foram classificados como insatisfatórios ($ITES_{\text{médio}} = 20.7$). Para a ETE Itaperí ($ITES_{\text{médio}} = 16.3$), perfil semelhante foi verificado, porém com as concentrações de SST e DBO acima dos limites, logo os seus índices também foram classificados como insatisfatórios.

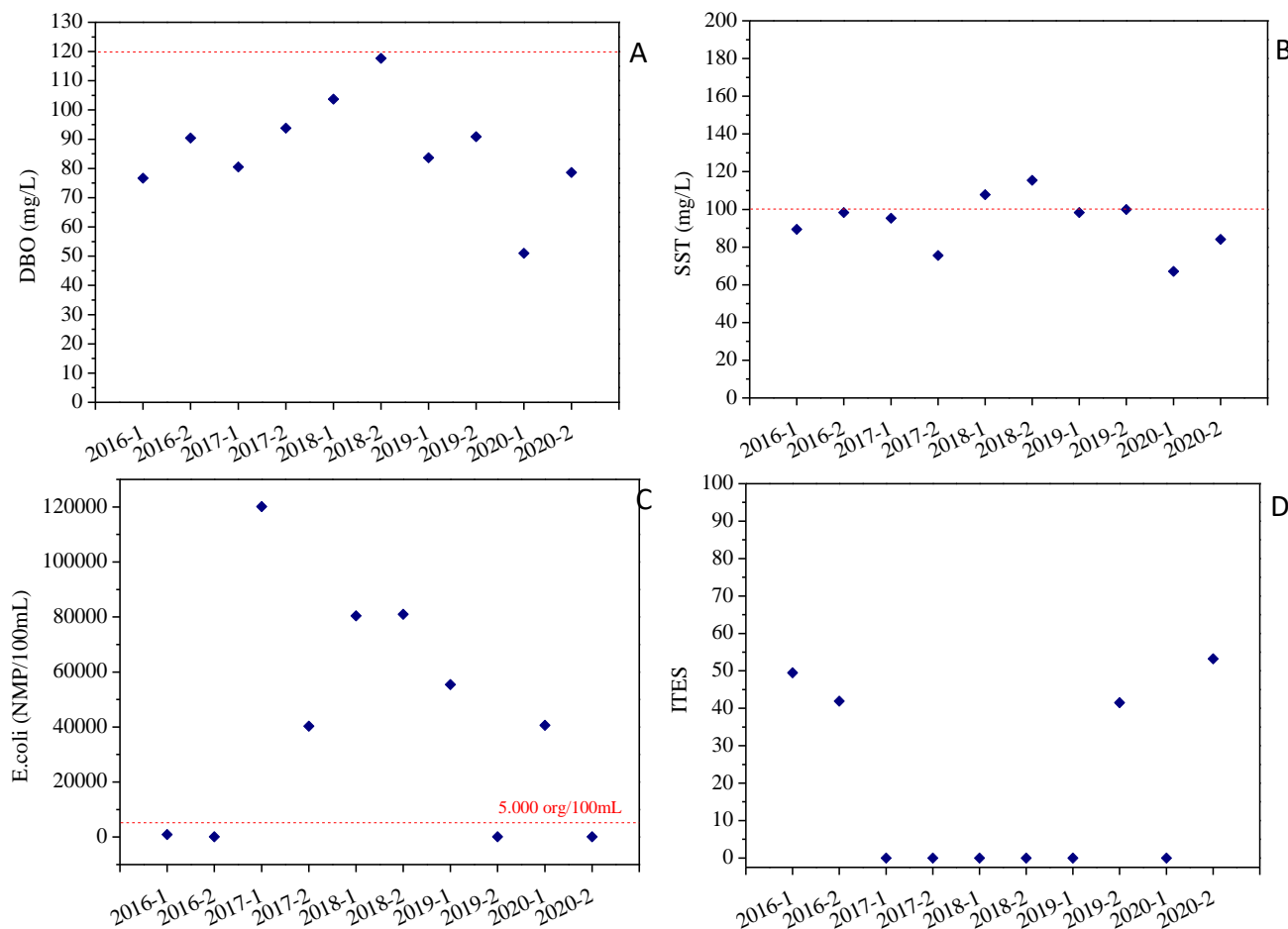


Figura 6. Concentrações médias dos parâmetros DBO (A), SST (B) e *E.coli* (C) e ITESs (D) para a ETE Lago Azul. Linha vermelha tracejada representa o limite da legislação ambiental. Fonte: Autoria própria, 2022.

No estudo de Magalhães (2017), as ETEs Lago Azul e Itaperí apresentaram desconformidades com a legislação ambiental nos históricos analisados, logo corroborando os resultados encontrados nesta pesquisa. A informação verbal prestada pela Supervisora da UNMTE as identificou como estações em fim de plano, ou seja, que recebem vazões superiores à que foram projetadas, justificando essas estações serem classificadas como insatisfatórias no atendimento dos seus parâmetros (Comunicação Pessoal, 2022).

Por fim, a estação Riacho Doce apresentou dois de seus parâmetros (SST e *E.coli*) em desacordo com os limites definidos, dessa forma seus índices também estiveram na classe insatisfatório, com $ITES_{\text{médio}}$ igual a 3.7. A supervisora da UNMTE esclareceu que essa ETE também se trata de estação em fim de plano (Comunicação Pessoal, 2022).

Portanto, na Figura 7, a análise geral das estações apresentou Sítio Santana, Aracapé III e Novo Barroso com os melhores índices quanto ao atendimento da legislação, com a maioria ou todas as análises abaixo dos limites para o lançamento. Essas estações possuem a qualidade dos seus parâmetros adequada para o lançamento nos corpos hídricos receptores. Enquanto, Lago Azul, Riacho Doce e Itaperí, apresentaram índices iguais a zero para a maioria de suas análises, sendo classificadas como insatisfatórias. Para a estação Zeza Tijolo, os ITESs ($ITES_{\text{médio}} = 42.7$) estiveram entre o satisfatório e o insatisfatório, com quatro de suas análises não atendendo aos limites estabelecidos.

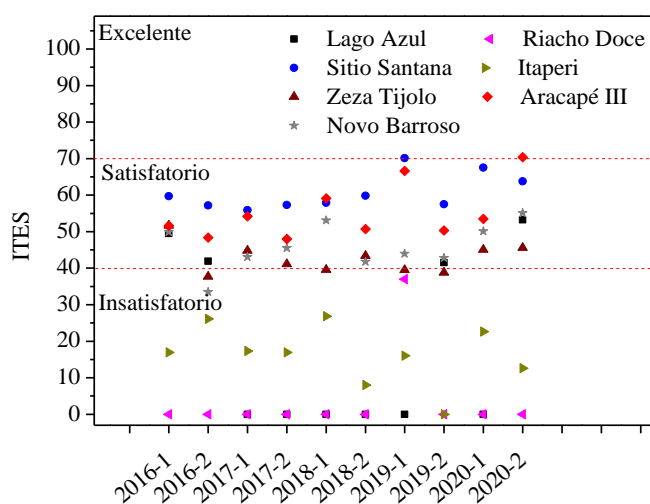


Figura 7. ITESs das estações com tecnologia UASB seguidas de cloração. Linha vermelha tracejada representa o limite entre as faixas de classificação. Fonte: Autoria própria, 2022.

Conclusões

A proposta de Índice de Tratamento de Esgoto Sanitário (ITES), para estações com a tecnologia UASB, atendeu ao objetivo desta pesquisa, visto que funcionou como uma ferramenta de análise objetiva e direta dos efluentes das estações avaliadas quanto ao atendimento dos seus parâmetros as legislações ambientais de lançamento (resoluções CONAMA nº 430 – Brasil, 2011 e COEMA nº 02 – Ceará, 2017). Ressalta-se que mesmo com poucas variáveis conseguiu-se representar a qualidade do efluente através do Índice construído.

Para a tecnologia UASB com biofiltro aerado submerso (BF) seguido de cloração, três estações apresentaram ITESs excelentes. Além dessas, quatro estações geraram índices satisfatórios quanto ao atendimento, pertencentes a tecnologia UASB seguida de cloração. Portanto, as

concentrações dos parâmetros para essas estações se encontram adequadas para o lançamento nos corpos hídricos receptores. Por fim, quatro estações apresentaram pelo menos um de seus parâmetros em desacordo com as legislações ambientais, logo gerando índices que as classificaram como insatisfatórias. Para estas estações, as informações verbais, prestadas pela supervisora Unidade de Negócio Metropolitana de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE), esclareceram que há problemas relacionados a falta de manutenção e operação adequada de seus sistemas.

Referencias bibliográficas

- Brasil (2011) *Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011 – Dispõe sobre as condições e padres de lançamento de efluentes*, CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União Maio/2011. Data de acesso: 15 de março de 2022. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627
- Ceará (2017) *Resolução nº 02 de 02 de fevereiro de 2017 – Dispõe sobre padres e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras*, COEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente. Diário Oficial do Estado, Fevereiro/2017. Data de acesso: 15 de março de 2022. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>
- Çelekli, A., Şahin, G. (2021) Bio-assessment of wastewater effluent conditions with algal pollution and multivariate approach. *Journal of Cleaner Production*, **310**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127386>
- Cerqueira, P.L.W., AISSE, M.M. (2021) Custos de processamento de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto com reatores anaeróbios de manta de lodo e pós-tratamento aeróbio: subsídios para Estudos de Concepção, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **26**(2), 251-262. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190244>.
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2022) *Apêndice D Índices de Qualidade das Águas* Data de acesso: 15 de março de 2022. Disponível em: [Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas – Águas Interiores \(cetesb.sp.gov.br\)](https://cetesb.sp.gov.br)
- Dos Santos, A.B. (2007) *Avaliação técnica de sistemas de tratamento de esgotos*, Banco do Nordeste, **1**, 206 pp.
- Drose, A., Valentini, M.H.K., Duarte, V.H., Santos, G.B., Nadaleti, W.C., Vieira, B. (2020) Utilização de Métodos Estatísticos Multivariados no Monitoramento de Qualidade da Água da Lagoa Mirim, *Meio Ambiente (Brasil)*, **2** (4), 58-67. Data de acesso: 15 de março de 2022. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/69>
- Ebrahimi, M., Gerber, E.L., Rockaway, T.D. (2017) Temporal performance assessment of wastewater treatment plants by using multivariate statistical analysis, *Journal of Environmental Management*, **193**(15), 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.027>.
- Figueiredo Filho, D.B., Da Silva Júnior, J.A. (2010) Visão além do alcance: Uma introdução à análise fatorial, *Opinião Pública*, **16**(1), 160-185. <https://doi.org/10.1590/S0104-62762010000100007>.
- Fortaleza (2014) Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza convênio de cooperação técnica entre Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE e Agência Reguladora de Fortaleza – ACFOR, Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente, Julho/2014, 173 pp. Data de acesso: 15 de março de 2022. Disponível em: <https://acervo.fortaleza.ce.gov.br/download-file/documentById?id=1435d89b-1fae-47d9-929c-9b9e5a1c6f73>
- Gémar, G., Gómez, T., Molinos-Senante, M., Caballero, R., Sala-Garrido, R. (2018) Assessing changes in eco-productivity of wastewater treatment plants: The role of costs, pollutant removal efficiency, and greenhouse gas emissions, *Environmental Impact Assessment Review*, **69**, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.11.007>.

- Gosset, A., Wiest, L., Fildier, A., Libert, C., Giroud, B., Hammada, M., Hervé, M., Sibeud, E., Vulliet, E., Polomé, P., Perrodin, Y. (2021) Ecotoxicological risk assessment of contaminants of emerging concern identified by “suspect screening” from urban wastewater treatment plant effluents at a territorial scale, *Science of The Total Environment*, **778**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146275>.
- Jamovi [Computer Software] (2021) The Jamovi Project, disponível em: <https://www.jamovi.org>.
- Karimi, A.M., Sadeghnejad, S., Rezghi, M. (2021) Well-to-well correlation and identifying lithological boundaries by principal component analysis of well-logs. *Computers and Geosciences*, **15**. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104942>.
- Leal, J.R.L.V. (2014) Mudança de curso do Rio Cocó no paleolítico superior, *Revista do Instituto do Ceará*, 183-217.
- Liu, H., Wang, H., Zhou, X., Fan, J., Liu, Y., Yang, Y. (2019) A comprehensive index for evaluating and enhancing effective wastewater treatment in two industrial parks in China, *Journal of Cleaner Production*, **230**, 854–861. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.134>.
- Lopes, W.S., Rodrigues, A.C.L., Feitosa, P.H.C., Oliveira, M.A.C.R., Barbosa, D.L. (2016) Determinação de um índice de desempenho do serviço de esgotamento sanitário. Estudo de caso: cidade de Campina Grande, Paraíba, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **21** (1), 01-10. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p1-10>.
- Luo, L., Dzakpasu, M., Yang, B., Zhang, W., Yang, Y., Wang, X. (2019) A novel index of total oxygen demand for the comprehensive evaluation of energy consumption for urban wastewater treatment, *Applied Energy*, **236**, 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.101>.
- Magalhães, A.M.C. (2017) *Proposta de metodologia multicriterial para priorização de intervenção em ETEs segundo análise da vulnerabilidade socioambiental – Estudo de caso em Fortaleza/CE*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 189 pp. Data de acesso: 15 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/29080/7/2017_dis_amcmagalh%c3%a3es.pdf.
- Marçal, D.A., Silva, C.E. (2017) Avaliação do impacto do efluente da estação de tratamento de esgoto ETE-Pirajá sobre o Rio Parnaíba, Teresina (PI), *Revista DAE*, **66** (212), 95-104. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017148242>.
- Marques, L.C., Nunes, A.B.A. (2018) Análise da eficiência do tratamento de efluentes em reatores UASB em Fortaleza/CE. *Revista DAE*, **66**(212), 95–104. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.025>.
- Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R., Hernández-Sancho, F. (2016) Development and application of the Hicks-Moorsteen productivity index for the total factor productivity assessment of wastewater treatment plants, *Journal of Cleaner Production*, **112**, 3116-3123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.114>.
- Monteiro, C.R.L. (2009) *Análise da eficiência e confiabilidade em 56 estações de tratamento de esgotos localizadas na região metropolitana de Fortaleza*, Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 79 pp. Data de acesso: 11 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16482/1/2009_dis_crlmonteiro.pdf.
- Mustapha, M.A., Manan, Z.A., Alwi, S.R.W. (2017) A new quantitative overall environmental performance indicator for a wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, **167**, 815–823. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.169>.
- Newhart, K.B., Holloway, R.W., Hering, A.S., Cath, T.Y. (2019) Data-driven performance analyses of wastewater treatment plants: A review. *Water Research*, **157**, 498–513. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.030>.
- Palácio, H.A. (2004) *Índice de qualidade das águas na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu, Ceará*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, 97 pp. Data de acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/18604/1/2004_dis_haqpalacio.pdf6.

- Prasse, C., Stalter, D., Schulte-Oehlmann, U., Oehlmann, J., Ternes, T.A. (2015) Spoilt for choice: A critical review on the chemical and biological assessment of current wastewater treatment technologies. *Water Research*, **87**, 237–270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.023>.
- Rolim, H.O. (2016) *Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da bacia do Banabuiú, estado do Ceará*, Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 129 pp. Data de acesso: 17 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/22558/1/2016_tese_horolim.pdf.
- Rolleberg, S.L.S. (2017) *Avaliação do potencial de reúso dos efluentes gerados nas ETEs operadas pela CAGECE em Fortaleza-CE*, Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, 95pp. Data de acesso: 17 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/26943/1/2017_dis_slrolleberg.pdf.
- Sabia, g., Petta, L., Avolio, F., Caporossi, E. (2020) Energy saving in wastewater treatment plants: A methodology based on common key performance indicators for the evaluation of plant energy performance, classification and benchmarking, *Energy Conversion and Management*, **220**. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113067>.
- Silva, M.I., Gonçalves, A.M.L., Lopes, W.A., Lima, M.T.V., Costa, C.T.F., Paris, M., Firmino, P.R.A., De Paula Filho, F.J. (2021) Assessment of groundwater quality in a Brazilian semiarid basin using an integration of GIS, water quality index and multivariate statistical techniques, *Journal of Hydrology*, **598**. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126346>.
- Valente, M.D.R., Queiroz, W.T., Pinheiro, J.G., Monteiro, L.A.S. (2011) Modelo De Predição Para O Volume Total De Quaruba (*Vochysia Inundata* Ducke) Via Análise De Fatores E Regressão. *Revista Arvore*, **35**(2), 307-317.
- Von Sperling, M. (2014) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto*, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, **4**, 472 pp.