



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS
HÍDRICOS)

JOÃO MATEUS BARROSO CORDEIRO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS
APLICADAS AO ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE

FORTALEZA
2024

JOÃO MATEUS BARROSO CORDEIRO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS
APLICADAS AO ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C819a Cordeiro, João Mateus Barroso.

Análise comparativa entre métodos de ponderação de variáveis aplicadas ao Índice de Qualidade de Efluente / João Mateus Barroso Cordeiro. – 2025.
65 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva .

1. Qualidade de efluentes. 2. Ponderação de Variáveis. 3. Tomada de decisão. I. Título.

CDD 627

JOÃO MATEUS BARROSO CORDEIRO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS
APLICADAS AO ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 28/11/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos Alves Barros Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Osmar Luiz Moreira Pereira Fonseca de Menezes (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

A Deus.

Aos meus pais, professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade e pelo apoio acadêmico proporcionado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva, pela excelência na orientação e na ministração das aulas.

Aos professores participantes da banca examinadora, Dr. José Júnior e Dr. Osmar Menezes, pela atenção, pelas sugestões e pelas colaborações enriquecedoras.

Aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental que contribuíram direta ou indiretamente no processo de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Centro de Tecnologia, pela infraestrutura e apoio institucional.

Aos colegas das disciplinas do mestrado e de outros departamentos, em particular, a Hirma de Lucena, pelo apoio, pelas críticas e pelas reflexões recebidas.

Aos meus familiares, em especial minha mãe, Francisca Luiza e avó, Maria de Lourdes.

“Beba das águas da sua cisterna, das águas que brotam do seu próprio poço. Por que deixar que as suas fontes transbordem pelas ruas e os seus ribeiros pelas praças?”

(Provérbios 5: 15-19. NVI).

RESUMO

O aumento da degradação e da escassez dos recursos hídricos é uma problemática de abrangência global. Nesse cenário, a avaliação da qualidade dos efluentes tem despertado cada vez mais o interesse por parte dos pesquisadores, gestores ou legisladores ambientais. Diante disso, o estudo teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre quatro métodos de ponderação de variáveis para o Índice de Qualidade de Efluente (IQEF). O primeiro método é da Entropia, o segundo o do Coeficiente de Variação, em duas configurações (Normal e Quartil). Os dois outros métodos compreendem o da Análise Hierárquica de Processos (AHP) e a sua variante Gaussiana (AHPG). Foram adotadas oito variáveis representativas de um efluente. Para a matéria orgânica adotou-se a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Como parâmetro para sólidos, utilizou-se os Sólidos Suspensos Totais (SST). Já como indicador químico de nutrientes, além do Fósforo (P) foram: o Nitrogênio Amoniacal (NAM), Nitrogênio Total Kjeldahl (TKN) – incluindo Amônia e o Nitrogênio Orgânico-, Nitrogênio Total (N) e por fim, os Coliformes Termotolerantes (CTT), como descritor biológico. A aplicação dos métodos resultou na atribuição de pesos, permitindo, assim, ordená-los. Logo, foi possível identificar os qualificadores de maior importância na composição do IQEF. Os resultados mostraram também a proximidade entre os métodos, com CTT recebendo os maiores pesos em todas as abordagens, seguido por DQO, SST e DBO, que também demonstraram uma relevância significativa. As variáveis relacionadas a nutrientes, como Nitrogênio e Fósforo, apresentaram pesos menores, com exceção da AHP-G, o qual atribuiu maior peso ao Fósforo. Na análise com cinco variáveis, o método AHP atribuiu as seguintes ponderações; 0,223 para DQO; 0,223 para SST, 0,118 para NAM; 0,066 para P e 0,370 para CTT. Já a versão Gaussiana da AHP apresentou uma reordenamento nos pesos, sendo de 0,251 para DQO; de 0,214 para SST; 0,131 para NAM; 0,135 para P e de 0,269 para CTT. Os métodos da Entropia, AHP e Coeficiente de Variação demonstraram ser coerentes e equivalentes.

Palavras-chave: Qualidade de efluentes; Ponderação de Variáveis; Tomada de decisão

ABSTRACT

The increase in the degradation and scarcity of water resources is a global issue. In this context, the assessment of effluent quality has increasingly attracted the interest of researchers, environmental managers, and policymakers. Thus, this study aimed to perform a comparative analysis of four variable weighting methods for the Effluent Quality Index (EQI). The first method is Entropy, the second is the Coefficient of Variation, applied in two configurations (Normal and Quartile). The other two methods include the Analytical Hierarchy Process (AHP) and its Gaussian variant (GAHP). Eight representative effluent variables were adopted. For organic matter, Biochemical Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD) were used. As a solids parameter, Total Suspended Solids (TSS) were utilized. As chemical indicators of nutrients, in addition to Phosphorus (P), the following were included: Ammoniacal Nitrogen (AMN), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) – encompassing Ammonia and Organic Nitrogen – Total Nitrogen (N), and finally, Thermotolerant Coliforms (TTC), as a biological descriptor. The application of the methods resulted in the assignment of weights, allowing for the ranking of variables. Consequently, it was possible to identify the most significant qualifiers in the composition of the EQI. The results also revealed the proximity between the methods, with TTC receiving the highest weights across all approaches, followed by COD, TSS, and BOD, which also demonstrated significant relevance. Nutrient-related variables, such as Nitrogen and Phosphorus, received lower weights, except in the GAHP method, which assigned greater weight to Phosphorus. In the analysis using five variables, the AHP method assigned the following weights: 0.223 for COD, 0.223 for TSS, 0.118 for $\text{NH}_3\text{-N}$, 0.066 for P, and 0.370 for TTC. The Gaussian version of AHP showed a reordering of weights, with 0.251 for COD, 0.214 for TSS, 0.131 for $\text{NH}_3\text{-N}$, 0.135 for P, and 0.269 for TTC. The Entropy, AHP, and Coefficient of Variation methods proved to be consistent and equivalent.

Keywords: Effluent quality; Variable weighting; Decision-making

RESUMEN

El aumento de la degradación y la escasez de los recursos hídricos es una problemática de alcance global. En este contexto, la evaluación de la calidad de los efluentes ha despertado un creciente interés por parte de los investigadores, gestores y legisladores ambientales. Por lo tanto, el estudio tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo entre cuatro métodos de ponderación de variables para el Índice de Calidad de Efluentes (ICE). El primer método es el de la Entropía, el segundo es el del Coeficiente de Variación, aplicado en dos configuraciones (Normal y Cuartil). Los otros dos métodos incluyen el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) y su variante Gaussiana (AHP-G). Se adoptaron ocho variables representativas de un efluente. Para la materia orgánica, se utilizaron la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Como parámetro de sólidos, se emplearon los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Como indicadores químicos de nutrientes, además del Fósforo (P), se incluyeron: el Nitrógeno Amoniacal (NAM), el Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN), que incluye Amoníaco y Nitrógeno Orgánico, el Nitrógeno Total (N) y, por último, los Coliformes Termotolerantes (CTT), como descriptor biológico. La aplicación de los métodos resultó en la asignación de pesos, permitiendo así ordenarlos. De esta manera, fue posible identificar los calificadores más importantes en la composición del ICE. Los resultados también mostraron la proximidad entre los métodos, siendo los CTT los que recibieron los mayores pesos en todas las aproximaciones, seguidos por la DQO, los SST y la DBO, que también demostraron una relevancia significativa. Las variables relacionadas con los nutrientes, como el Nitrógeno y el Fósforo, presentaron pesos menores, con excepción del método AHP-G, que asignó mayor peso al Fósforo. En el análisis con cinco variables, el método AHP asignó las siguientes ponderaciones: 0,223 para DQO; 0,223 para SST; 0,118 para NAM; 0,066 para P y 0,370 para CTT. Por su parte, la versión Gaussiana del AHP mostró una redistribución de los pesos, siendo 0,251 para DQO; 0,214 para SST; 0,131 para NAM; 0,135 para P y 0,269 para CTT. Los métodos de Entropía, AHP y Coeficiente de Variación demostraron ser consistentes y equivalentes.

Palabras clave: Calidad de efluentes; Ponderación de variables; Tomada de decisiones.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquematização do cálculo de pesos por AHP (a) e AHPG (b)	28
Figura 2 – Comparação dos pesos entre AHP e AHPG, para cinco parâmetros	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Função de representação da correlação entre AHP e AHPG	32
Gráfico 2 – Percentual médio dos valores compilados para o estudo que ficaram acima dos limites estabelecidos no conjunto de normas brasileiras para despejo de efluentes	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Graus de importância na Escala de Saaty	23
Tabela 2 – Índice Randômico e guia de $Imáx$ e de IC para limite de $RC \leq 0,10$	25
Tabela 3 – Base de dados e fontes bibliográficas	26
Tabela 4 – Resumo estatístico dos dados de efluente sanitário tratado do estudo	30
Tabela 5 – Matriz de Pearson entre os parâmetros utilizados no estudo ($\alpha = 0,05$)	30
Tabela 6 – Comparativo dos pesos pelos métodos AHP e AHPG	31
Tabela 7 – Proposta de escala de IQEF	33
Tabela 8 – Exemplo de aplicação de IQEF, com ponderação proposta no estudo	34
Tabela 9 – Classificação do índice de qualidade do efluente (IQEF)	40
Tabela 10 – Equações dos escores dos subíndices para cálculo do IQEF	40
Tabela 11 – Classificação do nível de qualidade do efluente (NQEF)	41
Tabela 12 – Descritivo estatístico do conjunto de dados de efluente do capítulo	41
Tabela 13 – Pesos (w) dos parâmetros através dos métodos de entropia e coeficiente de variação	42
Tabela 14 – Exemplo de aplicação de IQEF, com ponderação com ENT, CVN e CVQ.....	43
Tabela 15 – Resumo de ponderação com cada método, valor médio do peso de cada variável e respetivo desvio padrão	45
Tabela 16 – Matriz de Pearson de correlação entre os pesos computados pelos métodos do estudo	45
Tabela 17 – Comparativo dos pesos para os parâmetros DQO, SST, NAM, P e CTT	46
Tabela 18 – Comparativo de métodos para DQO, SST, NAM, P e CTT.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AHP	Análise Hierárquica de Processo
AHPG	Análise Hierárquica de Processo Gaussiano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CV	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Agência de Proteção Ambiental
IC	Índice de Consistência
IQA	Índice de Qualidade da Água
IQEF	Índice de Qualidade de Efluente
MCA	Análise Multicritério
NAM	Nitrogênio Amoniacal
OMS	Organização Mundial da Saúde

LISTA DE SÍMBOLOS

w	Peso
%	Porcentagem
r	Coefficiente de correlação de Pearson
ei	Entropia da informação
γ	Distorção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	Considerações Gerais	14
1.2	Motivação	15
1.3	Hipótese da Dissertação	15
1.4	Objetivos	16
1.4.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>16</i>
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
1.5	Estrutura da Dissertação	16
2	APLICAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSO NA PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE	18
2.1	Introdução	18
2.1.1	<i>Importância do tratamento de esgotos e do monitoramento de efluentes</i>	<i>18</i>
2.1.2	<i>Índice de qualidade de efluente</i>	<i>19</i>
2.1.3	<i>Ponderação de variáveis constituintes de índices agregados</i>	<i>21</i>
2.1.4	<i>Análise Hierárquica de Processo (AHP)</i>	<i>22</i>
2.2	Metodologia	25
2.2.1	<i>Tipo de estudo e dados utilizados</i>	<i>25</i>
2.2.2	<i>Abordagem</i>	<i>27</i>
2.3	Resultados e Discussão	29
2.3.1	<i>Aplicação Demonstrativa</i>	<i>33</i>
2.4	Conclusão	34
3	PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE VIA ENTROPIA DE SHANNON E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	36
3.1	Introdução	36
3.2	Metodologia	38
3.2.1	<i>Caracterização do estudo e fontes dos dados</i>	<i>38</i>
3.2.2	<i>Enfoque e procedimentos</i>	<i>39</i>
3.2.3	<i>Entropia de Shannon</i>	<i>39</i>
3.2.4	<i>Coeficiente de variação</i>	<i>39</i>
3.2.5	<i>Descrição da aplicação</i>	<i>40</i>

3.3	Resultados e Discussão	41
3.3.1	<i>Aplicação da ponderação em IQEF</i>	43
3.4	Conclusão	44
4	UMA COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Considerações gerais

A utilização de diferentes métodos de ponderação de variáveis em índices agregados pode resultar em distinções na interpretação final. Sob métrica mais precisa, isso consequentemente influencia a tomada de decisões. O estudo de diferentes métodos na ponderação, assim, é importante porque permite avaliar o alcance e a validade de índices para representar o *status* de um sistema de forma mais objetiva e precisa (Silva *et al.*, 2024, Carriço, 2014; Siena, 2008).

A escolha do método de ponderação mais apropriado deve levar em consideração critérios objetivos e bem definidos, uma vez que a finalidade é de se garantir uma maior precisão e consequentemente gerando resultados mais confiáveis. No caso da água, Wolfe *et al.* (2018) discutem que a adoção de técnicas mais precisas e objetivas podem levar a uma proteção ampla da saúde humana, a despoluição hídrica e a revitalização de ecossistemas naturais aquáticos (Immich, Medeiros e Decezaro, 2024; Ribeiro, Robaina, 2020; FUNASA, 2019). Além disso, como destacado por Chen *et al.* (2017), os índices de qualidade assumem uma função de categorizador dos efluentes em condições de avaliação de processos de tratamento de água e efluentes, ou seja, os índices permitem ordenar o estado das águas residuárias (Cadorin *et al.*, 2024; Schmidt e Barbosa, 2016; Alberto *et al.*, 2013).

Nesse contexto, a análise comparativa entre métodos de ponderação de variáveis constituintes de índices, pode contribuir para subsidiar ações para a avaliação da qualidade de água e para a uma gestão mais eficiente, racional e sustentável dos recursos hídricos, em paridade aos anseios sociais legítimos de preservação ambiental em um cenário global de intensos alertas de degradação dos recursos naturais (Mota, 2014). Ademias, vale salientar que o estudo dessa temática está também em consonância com as ações das Nações Unidas (ONU) com enfoque nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao objetivo número seis, o qual versa sobre a Água Potável e o Saneamento, servindo, portanto, como um meio de endossamento dessa meta específica (ONU, 2024).

Apesar da importância da avaliação da qualidade dos efluentes para a gestão ambiental, não há muitas bibliografias especializadas com abordagem de IQEFs. Também, são escassas as discussões sobre a ponderação de variáveis desses índices (Rios *et al.*, 2015). Além disso, é comum a utilização de métodos subjetivos na ponderação de variáveis, como a escolha intuitiva de pesos ou a utilização de juízos de especialistas (Silva *et al.*, 2024, Carvalho e Curi,

2013; Dong *et al.* 2018). Esses métodos podem gerar resultados enviesados e não transparentes, comprometendo a credibilidade de um IQEF. Nesse sentido, é importante promover a discussão sobre a ponderação de variáveis na construção de índices de qualidade para efluentes, com o emprego de métodos ditos objetivos. A utilização desses métodos pode contribuir para aprimorar a avaliação da qualidade dos efluentes e, conseqüentemente, a gestão ambiental (Silva *et al.*, 2024; FUNASA, 2019).

Como destacado por Nagpal *et al.* (2024), o avanço tecnológico para o tratamento de esgotos proporcionará uma redução nos passivos ambientais. Logo, o acompanhamento da mitigação desses passivos poderá ser auxiliado com a utilização de índices qualificadores. Dessa forma, o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, as inovações tecnológicas e a os passivos no meio ambiente poderão ser também impactados na escolha do método de ponderação, o que reforça a análise comparativa de diversas metodologias.

1.2 Motivação

A necessidade da preservação dos recursos hídricos associada com a desejável expansão da rede de esgotamento sanitário são aspectos que pressionam a demanda por melhoria da qualidade dos efluentes (Mota, 2016). Silva *et al.* (2020), ressaltam sobre a imprescindibilidade do monitoramento constante da situação poluidora das águas residuárias a fim de não comprometer a biodiversidade lótica ou até mesmo, inviabilizar o abastecimento de água potável, uma vez que os padrões de lançamento são impostos por meio de legislação.

Como é necessária a aferição dos qualificadores e não raro os dados podem estar incompletos, surge como necessária a verticalização de literatura técnico-científica nacional relacionada ao tratamento dessas informações, mais especificamente no que se refere ao grau de degradação das águas residuárias (Aditi *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o IQEF é o objeto de estudo a qual permite quantificar não só a situação de momento, mas também de avaliar a eficiência dos tratamentos de esgoto, fornecendo meios para garantir que os padrões de qualidade ambiental sejam respeitados. Segundo Costa *et al.* (2019), o uso de índices permite uma avaliação quantitativa dos processos de tratamento, promovendo uma visão mais sistemática sobre a adequação dos efluentes tratados antes de serem lançados nos corpos receptores. No entanto, a precisão dos resultados obtidos por meio do IQEF depende de forma direta da ponderação adequada das variáveis envolvidas.

1.3 Hipótese da Dissertação

O emprego de métodos objetivos e de variáveis contínuas descritoras da qualidade do efluente permitem ponderar e estruturar um IQEF para o país. Também, a ponderação pelos métodos da Entropia de Shannon, da Análise Hierárquica de Processo (AHP) e do Coeficiente de Variação são abordagens simples e eficazes, com equivalências muito próximas.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral da pesquisa é aplicar e avaliar quatro métodos objetivos na ponderação de variáveis para composição de um Índice de Qualidade de Efluente (IQEF).

1.4.2 *Objetivos específicos*

- Comparar os resultados dos valores dos métodos de ponderação de variáveis;
- identificar as variáveis críticas que mais impactam o Índice de Qualidade de Efluente em cada método de ponderação;
- discutir os valores determinados para proposição de um escopo mínimo de IQEF;
- demonstrar a aplicação dos resultados em IQEF proposto.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em modelo *multipaper*. Inicia-se o texto com um Capítulo de Introdução Geral, com apresentação do problema a ser tratado, sua importância, hipótese principal, objetivos e descrição da composição de texto.

Após a etapa de introdução são apresentados dois capítulos – números 2 e 3 – que são artigos acadêmicos submetidos para publicação em periódicos. Os artigos são do tipo *short communication* e com estrutura tradicional (Introdução, Metodologia, Resultados e Discussão e Conclusão).

A última seção do texto é a de Considerações Finais, que traz uma síntese comparativa e faz um fechamento do estudo. Nesse tópico, os principais resultados dos capítulos anteriores são confrontados e resumidos à luz dos objetivos definidos inicialmente. O último tópico é o de Referências.

2. APLICAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSO NA PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE

2.1 INTRODUÇÃO

2.1.1 Importância do tratamento de esgotos e do monitoramento de efluentes

O saneamento ambiental, em especial o tratamento de esgotos é cogente ao desenvolvimento humano. Este atua tanto na melhoria da saúde pública, quanto na preservação ambiental e no crescimento socioeconômicos. O tratamento de efluentes, quando corretamente projetado, contribui na prevenção de doenças transmitidas pela água tanto de forma natural, quanto pela contaminação por esgoto bruto, ao se evitar que este seja lançado diretamente no corpo hídrico. A água infectada é propícia para proliferação de doenças, como, ascaridíase, febre tifoide, esquistossomose, dentre outras (Bej *et al.*, 2023; Wutich, Brewis e Tsai, 2020; Von Sperling, 2014; Bartram e Cairncross, 2010).

Os sistemas convencionais de despoluição dos efluentes atuam precipuamente na remoção da matéria orgânica e na desinfecção. Estas propriedades são possíveis pelo tratamento biológico e processos de inativação patogênica, respectivamente. Os resultados benéficos desses mecanismos são consoantes com os anseios da sociedade por um ambiente natural mais sustentável, saudável e com equilíbrio. (Silva, Oliveira e Lopes, 2020; FUNASA, 2019; Silva, 2020).

Em escopo geral, um saneamento apropriado e, mais objetivamente, o tratamento de efluentes de forma eficaz, se constitui de ações somadas de uma cobertura adequada da rede de coleta e da alta performance de remoção dos agentes poluidores e patógenos do efluente. Esses fatores agregados contribuem para promoção da preservação ecológica, principalmente na proteção dos sistemas aquáticos, matas ciliares e todos os ecossistemas relacionados (Machado; Maciel; Thiollent, 2021; Perondi *et al.*, 2020).

Von Sperling (2014) aponta para a consequência de um despejo indiscriminado de esgotos nos corpos d'água, o qual pode resultar em degradação persistente da qualidade hídrica, além da poluição visual e o odor desagradável. Isso poderá culminar também em danos severos aos ambientes aquáticos, ameaçando, portanto, a sua biodiversidade. Logo, o tratamento de esgotos desempenha papel primordial na manutenção da qualidade dos recursos hídricos e na sustentabilidade dos ecossistemas ali presentes (Sanei, Gómez-Gallegos e Márquez, 2024; FUNASA, 2019; Kesari *et al.*, 2021).

É importante destacar que o saneamento também está relacionado ao desenvolvimento econômico (Moreno, Heinz e Hein, 2021). Strande, Ronteltap e Brdjanovic (2014) apontam que o acesso a serviços de saneamento básico melhora a qualidade de vida das comunidades, reduzindo inclusive o absenteísmo escolar. Há também correlações entre o aumento produtividade laboral e a expansão da rede coletora de esgoto. Outro aspecto é a questão da gestão, quando bem executado, dos esgotos gerar benefícios econômicos, tais como a recuperação de recursos, em particular, a energia e nutrientes (Bianchetti *et al.*, 2023; Leoneti, Prado e Oliveira, 2011).

Em contraste, a falta de investimentos público-privados em saneamento associados a políticas públicas ainda aquém diante das magnitudes dos desafios inerentes à engenharia sanitária é outro problema a ser solucionado. Nesse sentido, dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicam que, em um panorama global, aproximadamente de 4,2 bilhões de pessoas ainda enfrentam problemas ao pleno acesso ao saneamento. Podendo ser este na forma de tratamento de água e efluentes ou na infraestrutura de drenagem pluvial e tratamento de resíduos sólidos, ou ainda uma combinação deles (WHO, 2019, Mota, 2016).

Esse número alarmante evidencia a enorme problemática a qual ameaça não apenas a saúde pública, como também a sustentabilidade ambiental. Importa, assim, um tratamento de esgotos que possibilite melhor promoção da saúde humana, preservação do meio ambiente e desenvolvimento econômico (Oliveira, Soares e Holanda, 2020; FUNASA, 2019).

2.1.2 Índice de qualidade de efluente

Os índices de qualidade de água são utilizados na gestão do saneamento para avaliar o *status* de potabilidade para fins de aferição aos níveis permitidos estipulados por órgãos regulatórios (Dandekar *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2017). No caso do Brasil, a regulação geral compete, além do Legislativo Federal, ao CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, entidade ligada ao Executivo Federal. As secretarias e legislativos estaduais e municipais também podem regulamentar ações para o ambiente, contanto que não extrapolem as determinações de nível federal (FUNASA, 2019; Brasil, 1988).

Dessa maneira, a legislação ao normatizar limites e tolerâncias, demanda por meios que abordem os dados de feições pertinentes a cada corpo hídrico. Diante disso, os índices são modelos que permitem agregar informações, como turbidez, odor, sólidos em suspensão, dureza, entre outros (Mota, 2016; Von Sperling, 2014). Essa variedade de parâmetros de qualidade da água, portanto, são resumidas em um único valor, o que facilita a avaliação e a

comunicação dos resultados (Webber *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2024).

Os qualificadores hídricos incluem uma série de parâmetros, como concentrações de poluentes, características físicas e químicas, além de critérios de qualidade (Costa *et al.*, 2020). Estes apontam tendências em relação à conformidade com padrões regulatórios. São, logo, prezados na gestão dos recursos hídricos, na saúde pública e no meio ambiente. Assim, facilitam a constatação de problemas e a priorização de ações corretivas em tempo hábil (Pessoa *et al.*, 2020; Silva; Goveia, 2019).

A construção de índices de qualidade de água está em constante evolução. Essa tendência não é diferente na área da pesquisa a qual a temática tem ganhado cada vez mais relevância por parte da comunidade acadêmica. Com isso, diferentes abordagens têm sido desenvolvidas para avaliar a qualidade de água. Abordagens estas cada vez mais abrangentes e complexas. O estado de São Paulo, por exemplo, por meio da CETESB, padronizou nove variáveis as quais julga serem abrangentes o suficiente para garantir a qualidade do recurso hídrico na região. Modelos foram desenvolvidos para atenderem ao ponderamento das constantes envolvidas. (Ribeiro *et al.*, 2022; CETESB, 2013). Em geral, levam-se em consideração variáveis pré-determinadas as quais preservam consonância com a literatura técnica. Sob tal olhar e com o mesmo propósito, é também demandado os índices de qualidade de efluentes (IQEf). Estes são um tipo específico de índice de qualidade de água (Pessoa *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2022; Silva, Goveia, 2019).

Os IQEfs têm função definida na avaliação do desempenho de remoção dos poluentes por sistemas de tratamento de efluentes. Tais índices são baseados na análise de parâmetros-chave, conforme situação análoga com a água e o IQA. Tais parâmetros devem englobar concentração de matéria orgânica, nutrientes e patógenos, para estarem de acordo com os caracterizadores de efluentes apontados como essenciais pela doutrina técnica, o que aproxima ainda mais a definição de um IQEf para um IQA (Baird e Cann, 2012; Von Sperling, 2014; CETESB, 2013; Ribeiro *et al.*, 2022).

Nesse contexto, os IQEfs, devem ser suficientemente desenvolvidos para nortear situações em que os efluentes despejados pelos sistemas de tratamento de esgotos atendam a padrões ambientais e regulatórios (Pessoa *et al.*, 2020; Reis *et al.*, 2022). Um índice que tipifica um efluente permite que operadores de sistemas de tratamento monitorem a qualidade dos despejos. Isso resulta na redução significativamente da poluição da água, principalmente se esta ocorrer de forma difusa (difícil identificação da origem poluidora), pois permite a constatação de parâmetros inaceitáveis dentro do tempo necessário para a sua correção. (Carneiro, Ostroski e Mercuri, 2020; Castro *et al.*, 2023; Forio e Goethals, 2020).

Há uma grande diversidade de alternativas tecnológicas para sistemas de tratamento sanitário. Cada uma delas, projetadas para atenuar certos parâmetros considerados como críticos. Fazendo com que os efluentes finais sejam seguros para descarte no meio ambiente (Pontes *et al.*, 2020). Em paralelo, Von Sperling (2014) aponta que o desempenho desses sistemas pode variar significativamente com base em fatores como a tecnologia utilizada, a capacidade total de operação, as condições para a manutenção e a qualidade dos efluentes despejados. O autor enfatiza também a importância de equipamentos bem projetados e operados para atingir os padrões de qualidade propostos.

A avaliação do desempenho dos sistemas de tratamento de esgotos envolve a medição de parâmetros-chave que representem o conteúdo e a carga de poluentes (Sabliyi *et al.*, 2019). Segundo Metcalf e Eddy (2015), essa avaliação é fundamental para garantir que os sistemas estejam funcionando de acordo com as normas ambientais e regulatórias.

É relevante enfatizar a necessidade de metodologias claras na concepção e construção desses índices. A escolha dos parâmetros a serem incluídos e do método de ponderação desses são procedimentos necessários que visam garantir a representatividade do modelo e a sensibilidade que este apresentará ao ser aplicado em situações críticas (Alves, Teresa e Nabout, 2014; Klamt *et al.*, 2021).

Como destacado por Zhao, Kuo e Chen (2021), a escolha de um método de ponderação adequado permite maior precisão dos resultados. Isso faz com a confiança da metodologia seja aceita por parte dos órgãos regulatórios e pela sociedade civil em geral. A ponderação das variáveis pode ser feita de maneira subjetiva ou objetiva, sendo esta última a mais preferível (tomando como padrão) pelos executores de políticas públicas ambientais, já que múltiplas abordagens, se adotadas, em especial as subjetivas, possam afetar os resultados finais e comprometer a confiabilidade do método (Ahmed *et al.*, 2024).

2.1.3 Ponderação de variáveis constituintes de índices agregados

Com já enfatizado, a ponderação de variáveis é uma das etapas para a construção de índices de qualidade. Hatefi (2023) destaca a diversidade tipológica dos processos de ponderação, com base em aspectos diversos (propósito, sensibilidade, estado de referência, etc).

O processo envolve a atribuição de pesos ou importâncias relativas a diferentes parâmetros, permitindo a construção de índices de qualidade de forma mais representativa. A escolha do método de ponderação leva em conta fatores como a forma com que o problema é modelado e os dados disponíveis (Kachroud *et al.*, 2019). Também, a confiabilidade dos

resultados deve refletir o necessário conhecimento de seu processo como um todo, além de se reconhecer a aplicabilidade do método nas mais variadas situações (Amarante *et al.*, 2021; Velásquez-Pita *et al.*, 2023).

Sob conceito geral, os métodos podem ser ditos objetivos, a partir de dados medidos no conjunto de estudo, e subjetivos, em que a avaliação que depende da percepção, opinião ou relato de especialistas (Uddin *et al.*, 2022; Hatefi, 2023). No entanto, como observado por Silva *et al.* (2018), essa abordagem pode ser enviesada e não transparente, comprometendo a credibilidade dos resultados. Portanto, a ponderação subjetiva deve ser usada com cautela.

A abordagem objetiva para a ponderação de variáveis é particularmente importante para evitar distorções nos resultados (Ayan, Abacioglu e Basilio, 2023). Como mencionado por Uddin *et al.* (2022), os métodos subjetivos, como a atribuição de pesos com base na opinião de especialistas, podem levar a resultados inexatos e questionáveis. A adoção de métodos objetivos assegura, em princípio, uma maior transparência e credibilidade dos índices (Kachroud *et al.*, 2019).

Zardari *et al.* (2015) e Uzun, Ozsahin e Duwa (2021) apontam haver sempre algum grau, mesmo de forma residual, de imprecisão e subjetividade em métodos baseados em critérios técnicos. Nessa perspectiva, a definição de variáveis e a determinação de pesos devem considerar informações técnico-científicas qualificadas. Uma outra abordagem é a utilização de modelos computacionais baseados em *bigdatas* e mineração de dados. Esses métodos podem analisar grandes conjuntos de dados e identificar estatisticamente as variáveis mais relevantes (Gürler; Ozcalıcı; Pamucar, 2024).

2.1.4 Análise Hierárquica de Processo (AHP)

Desenvolvida por Thomas Saaty na década de 1970, a Análise Hierárquica de Processo (AHP) é uma abordagem estruturada compatível com a complexidade inerente à avaliação de diversos fatores, em que muitos critérios e atributos estão envolvidos na análise de um estudo (Saaty, 1991; Felice *et al.*, 2016). A AHP tem aplicabilidade na ponderação de variáveis, com a finalidade de ordenamento e priorização dos qualificadores. O método organiza critérios e subcritérios em uma estrutura hierárquica. Isso auxilia na compreensão das variáveis e nas relações entre elas. Os pesos que são atribuídos a cada descritor são proporcionais a importância de cada um deles sobre a análise geral (Saaty, 1991; Vedel e Geraldi, 2020). Isso é feito em conjunto de comparações pareadas. Portanto, tem uma possibilidade de aplicação em vários campos do conhecimento, abrangendo áreas como a

engenharia, a gestão do meio ambiente, a economia e a agronomia (Zahed *et al.*, 2024).

Na aplicação do método, faz-se uma redução de um problema mais complexo para um sistema mais fracionado. Isso resulta em elementos mais simples e de aplicabilidade mais factível (Darko *et al.*, 2019). Esta estrutura viabiliza a criação e ordenação dos níveis de critérios, subcritérios e alternativas. A estrutura hierárquica oferece clareza e transparência nas decisões e consequentemente coerência nos resultados. Isso ajuda a mitigar vieses e contribui para a objetividade na tomada de decisões (Saaty, 1991; Felice *et al.*, 2016).

A aplicação da AHP em estudos ambientais tem crescido notadamente pelas características do método, que permite uma análise de sensibilidade mais acurada e focada em múltiplas informações. Por exemplo, na avaliação de possíveis locais para instalação de Unidade de Conservação é necessário se observar aspectos, entre outros, tais como a biodiversidade, reservatórios naturais e construídos, a presença de monumentos naturais, a constatação de ocorrência espécies ameaças de extinção e a conectividade ecológica, podem ser estruturados hierarquicamente (Zahed *et al.*, 2024; Mota, 2016). Dessa forma, é fornecida informações pertinentes para a determinação se a Unidade de Conservação é para uso sustentável ou proteção integral (Schmidt *et al.*, 2015).

A primeira etapa da AHP constrói-se uma matriz de comparações pareadas entre critérios. A comparação utiliza uma escala pré-definida pelo(s) decisor(es), que varia de 1 a 9 (Tabela 1). O valor 1 indica que os critérios têm a mesma importância, e 9 indica uma diferença extrema de relevância entre eles (Felice *et al.*, 2016).

Tabela 1 – Graus de importância na Escala de Saaty.

Grau de importância	Definição	Interpretação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre outro
5	Mais importante	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em relação a outro
7	Muito mais importante	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática
9	Importância extrema	Um critério é favorecido em relação a outro com o mais alto grau de certeza
Valores intermediários	2, 4, 6 e 8	Quando se procuram condições de compromisso entre duas definições

Fonte: Saaty (1991).

Após a conclusão da matriz de comparações pareadas, procede-se a normalização pela soma. A normalização compreende em se planificar os dados para uma mesma escala.

Evita-se, assim, possíveis distorções na análise. Esse processo é necessário uma vez que se deseja garantir que os pesos atribuídos aos critérios sejam consistentes e comparáveis entre si (Stofkova *et al.*, 2022).

Com a matriz normalizada, o próximo passo consiste no cálculo do vetor prioridade (*i.e.* pesos dos critérios). Conforme Felice *et al.* (2016), esses pesos refletem a magnitude da importância relativa de cada um dos qualificadores. O cálculo das prioridades é essencial para identificar quais desses critérios têm mais influência no processo de decisão e, portanto, devem receber mais atenção.

Na sequência, é feita a verificação da consistência dos julgamentos que foram elencados. Essa etapa verifica o quanto as comparações realizadas anteriormente foram críveis. Para isso, calcula-se o Índice de Consistência (IC), conforme equação a seguir:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Em que: n é o número de variáveis a serem comparadas entre si e $\lambda_{\max}$ é o valor médio dos elementos constituintes do vetor produto (vetor peso $\times$ matriz de comparação inicial).

Após a determinação do IC, é possível calcular a Razão de Consistência (RC), pela seguinte equação:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Na equação acima, o Índice Randômico (IR) é pré-estabelecido e dado em função do número de variáveis em comparação (Tabela 2). O cômputo de RC auxilia na estimativa de tolerância de inconsistência que deve ser $\leq 0,10$. Assim, caso $RC > 0,10$ ocorreram inconsistências significativas nas comparações. Nesse caso, retorna-se à matriz de comparação pareada para ajustar os julgamentos e realizar uma nova análise. A Tabela 2 contém também os valores de IR e limites de $\lambda_{\max}$ e IC para que $RC \leq 0,10$.

Tabela 2 – Índice Randômico e guia de $Imáx$ e de IC para limite de RC $\leq 0,10$.

n	IR	$\lambda máx$	IC
3	0,580	3,116	0,058
4	0,892	4,268	0,089
5	1,116	5,447	0,112
6	1,236	6,620	0,124
7	1,332	7,803	0,134
8	1,395	8,977	0,140
9	1,454	10,164	0,146
10	1,488	11,340	0,149
11	1,512	12,512	0,151
12	1,536	13,690	0,154
13	1,557	14,869	0,156
14	1,571	16,043	0,157
15	1,586	17,221	0,159

Fonte: adaptação pelo autor a partir de Saaty (1991).

A quinta etapa envolve a construção da matriz de decisão. Nesta matriz, as alternativas de decisão são comparadas em relação aos critérios estabelecidos previamente. Cada alternativa recebe uma pontuação baseada em sua performance para cada critério. Nesse enfoque é possível avaliar as diferentes opções disponíveis. Dessa forma, é possível computar os escores em uma escala comum, permitindo que as alternativas sejam comparadas de forma objetiva, de maneira que cada valor final reflita a importância relativa da alternativa em relação aos critérios (Felice *et al.*, 2016; Stofkova *et al.*, 2022).

A AHP tem muitas aplicações, principalmente na de ponderação de critérios, para melhorar o desempenho de outras abordagens de tomada de decisão. Estudos como os de Tavana, Soltanifar e Santos-Arteaga (2023) e Uchehara *et al.* (2022) contêm a extensão do potencial de aplicação do método AHP.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Tipo de estudo e dados utilizados

O estudo tem caráter teórico-aplicativo. A investigação foi realizada com base em publicações científicas e estudos técnicos que documentaram o desempenho de diferentes tecnologias de tratamento. Os dados foram referentes a 27 sistemas de tratamento de esgoto, predominantemente doméstico, cada um com características resultantes de configurações tecnológicas distintas. A lista completa das fontes utilizadas é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Base de dados e fontes bibliográficas.

Número	Tecnologia	Fonte
1	UASB	Hamerski (2012)
2	FBAS	Belloni (2011)
3	UASB + FBAS	Ribeiro e Silva (2018)
4	UASB + <i>Wetlands</i>	Lima e Tavares (2012)
5	RSB	Cybis <i>et al.</i> (2004)
6	MBSBR	Bueno <i>et al.</i> (2019)
7	RSB + Biofilme Leito Móvel	Bueno <i>et al.</i> (2019)
8	UASB + Sistema Anóxico-Aeróbio	Saghir <i>et al.</i> (2022)
9	UASB + TF	Philomina <i>et al.</i> (2022)
10	UASB + BF + TSED	Philomina <i>et al.</i> (2022)
11	<i>Wetland</i>	Kimwaga <i>et al.</i> (2004)
12	TQ + AC	Madeira <i>et al.</i> (2022)
13	RBC	Hoss <i>et al.</i> (2022)
14	LA + LF + LM	Cabrera <i>et al.</i> (2022)
15	RBC	Hiras <i>et al.</i> (2003)
16	UASB + LP	Khatri <i>et al.</i> (2022)
17	UASB + RALG	Carvalho <i>et al.</i> (2022)
18	LF	Oliveira e von Sperling (2007)
19	UASB + POST	Oliveira e von Sperling (2007)
20	LA + LF	Oliveira e von Sperling (2007)
21	Lodo Ativado	Michalake <i>et al.</i> (2016)
22	Lodo Ativado (Aeração Prolongada)	Soares <i>et al.</i> (2019)
23	RHAN	Santos <i>et al.</i> (2021)
24	MBBR	Butzen <i>et al.</i> (2020)
25	TS + FAA + <i>Wetlands</i>	Souza (2015)
26	TS + <i>Wetlands</i>	Soares <i>et al.</i> (2019)
27	UASB + 3LF	Soares <i>et al.</i> (2019)

Legenda: FBAS: Filtro Biológico Aerado Submerso

LA + LF + LM: Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação

MBBR: Bioreator por Membrana

MBSBR: Reator Sequencial em Batelada (Leito Móvel com Biofilme)

RALG: Reator Aeróbio por Lodo Granular

RBC: Rotor Biológico de Contato

RHAN: Reator Híbrido Anaeróbio-Aeróbio

RSB: Reator Sequencial em Batelada

TQ + AC: Tratamento Químico (Precipitação com CaO) + Carbonatação Atmosférica

TS + FAA: Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio Ascendente

UASB + BF + TSED: UASB + Biofiltro + Tanque de Sedimentação

Os valores investigados representaram um conjunto diversificado o qual retratou diferentes situações globais. Em relação aos parâmetros abordados, estes abrangeram os cinco indicados por Von Sperling (2014) como sendo os de maior importância para a caracterização de um efluente. Ou seja, foram adotados os indicadores de matéria orgânica, as variáveis de contaminação fecal, os descritores de sólidos, o nitrogênio e o indicador de fósforo.

Por questão de maior representatividade, mas sem extrapolar os cinco parâmetros anteriormente explicitados, foram analisados inicialmente oito variáveis. Com isso, para a matéria orgânica utilizou-se a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Já como parâmetro para sólidos, adotou-se os STT, Sólidos Suspensos Totais. Usou-se os Coliformes Termotolerantes (CTT), como descritor de contaminação microbiológica no efluente. Por outro lado, como indicador químico de nutrientes foram elencados quatro, sendo primeiro o Fósforo (P), o segundo Nitrogênio Total (N), o outro é o Nitrogênio Amoniacal (NAM) e por fim, o Nitrogênio Total Kjeldahl (TKN), o qual inclui o nitrogênio amoniacal e o Nitrogênio Orgânico

Ao considerar as variáveis acima, importa destacar que DBO e DQO não representam o mesmo conteúdo de matéria orgânica (Mota, 2016). Também, os parâmetros NAM e TKN são parcelas do conteúdo total de nitrogênio. Uma simplificação a ser considerada é a admissão de DBO ou DQO, bem como NAM ou N, como parâmetros subíndices. Há ainda aceitação da concentração de *Escherichia coli* na permutação com CTT (Von Sperling, 2014).

Nos estudos originais nem todos os parâmetros em apreço foram investigados. Para complemento de informação fez-se uma imputação de valores baseada em concentrações esperadas em efluentes domésticos ou na remoção alcançada pela tecnologia de tratamento, de acordo com referências como Von Sperling (2007) e Metcalf e Eddy (2015).

2.2.2 Abordagem

O estudo compara os resultados de ponderação de variáveis com base em Análise Hierárquica de Processo (AHP) e sua variação denominada Gaussiana (AHPG). A ponderação é empregada no desenvolvimento de um IQEF. O índice é uma medida crítica de avaliação da qualidade dos efluentes tratados (Russo e Russo, 2024).

Proposta por Santos, Costa e Gomes (2021), na AHP Gaussiana (AHPG) a ponderação dos critérios é determinada com os próprios dados da matriz de decisão original. Assim, na abordagem da AHPG a influência de vieses é excluída, de forma a representar somente a performance de cada alternativa em relação às demais, dentro de cada critério (Pereira *et al.*, 2023; Costa e Gomes 2021). Na metodologia da Análise Hierárquica de combina a estrutura hierárquica do AHP tradicional com abordagens estatísticas, como a média e o desvio padrão. Isso faz com que haja uma melhorara na precisão em tomada de decisões complexas (Lima *et al.*, 2021; Vale *et al.*, 2022; Russo e Russo, 2024). O algoritmo geral é, portanto, mais simples.

Estrutura-se a matriz de decisão inicial com os dados quantitativos dos critérios em cada alternativa. A matriz é então normalizada, garantindo que todos os valores estejam numa escala comparável. Esse procedimento é essencial para evitar distorções nas comparações entre alternativas (Santos *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022). Da matriz normalizada, obtém-se para cada conjunto de critério normalizado uma média (m) e seu respectivo desvio padrão (σ) (Equações 3 e 4).

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 / (n - 1)} \quad (4)$$

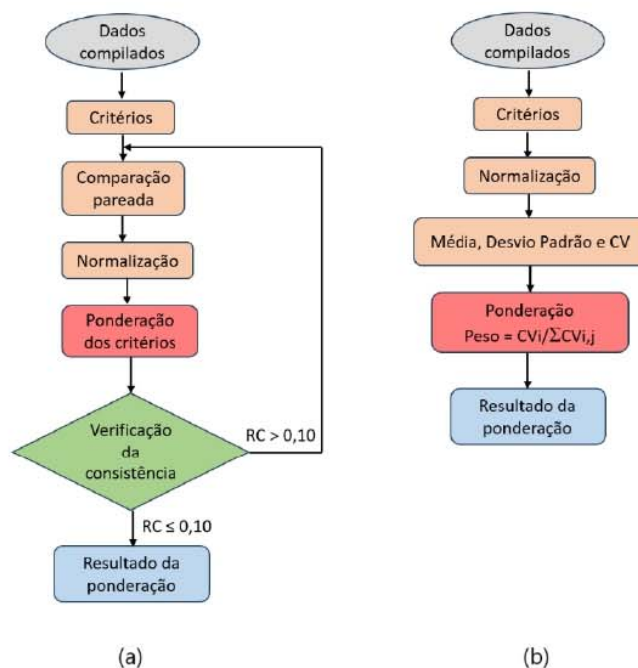
$$fG = \sigma / \mu \quad (5)$$

O coeficiente de variação (CV) resultante é denominado no método como fator gaussiano (fG). A diferença na denominação vem dos parâmetros de dados ajustados à distribuição normal. O somatório dos valores de fG individuais é o denominador de normalização dos novos fatores que representam os pesos (w_G), conforme mostrado na Equação 6.

$$wG = fGi / \sum_{i=1}^n fGi, j \quad (6)$$

Na Figura 1 é mostrado o fluxo de cômputo dos pesos empregando tanto a AHP tradicional, quanto a modificação Gaussiana. Após o cômputo dos pesos conforme os métodos em apreço, o enfoque do estudo é finalizado com uma aplicação demonstrativa.

Figura 1 - Esquematisação do cômputo de pesos por AHP (a) e AHPG (b).



Fonte: Autor (2024).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de dados compilados dos estudos que foram listados na Tabela 3 está sumarizado abaixo (Tabela 4). O resumo descritivo enfatiza o espectro diverso dos perfis tecnológicos empregados no tratamento de esgotos sanitários, bem como da qualidade de efluente. Para os valores compilados as distorções (γ) observadas em todos os parâmetros foram positivas, sendo o maior resultado igual a 4,126 e o menor igual a 1,491. Esse descritor apresentou ao final a seguinte ordem: $\gamma_{DQO} < \gamma_{SST} < \gamma_{DBO} < \gamma_P < \gamma_{CTT} < \gamma_{NAM} < \gamma_N < \gamma_{TKN}$.

O valor médio de DBO foi de cerca de 85% do limite estabelecido na resolução CONAMA 430/11 ($DBO \leq 120$ mg/L), que trata do despejo de efluentes. Para o caso do NAM o valor médio foi de 90% da fronteira definida no mesmo estatuto ($NAM \leq 20$ mg N/L). Entretanto, ao considerar medidas centrais mais robustas (*i.e.* mediana e média geométrica), os percentuais seriam de 44 e 53% para DBO, no caso de mediana e média geométrica, respectivamente. Para o NAM os percentuais seriam de 64 e 62% do limite referido na CONAMA 430/11.

Tabela 4 – Resumo estatístico dos dados de efluente sanitário tratado do estudo.

Descritor estatístico	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	NAM (mg N/L)	N (mg N/L)	TKN (mg N/L)	P (mg P/L)	CTT (NMP/100mL)
Média	103	312	133	18,1	27,4	25,7	5,2	4,14E+06
Mediana	53	112	80	12,8	23,0	19,3	4,0	2,61E+05
MG	64	147	74	12,4	19,1	18,5	3,6	2,52E+05
CV	1,208	1,842	1,567	0,961	0,829	0,819	0,992	1,975
Mínimo	12	25	18	2,3	2,0	4,6	0,9	3,06E+02
Máximo	587	2968	1074	85,8	109,3	94,2	25,6	3,40E+07
Q _{25%}	36	73	40	8,0	11,9	9,1	1,9	4,34E+04
Q _{75%}	116	280	135	24,2	38,5	37,4	6,5	3,50E+06

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 5 contém os resultados da Matriz de Correlação de Pearson (com nível com $\alpha = 0,05$ e $r_{\min} = 0,381$). Os valores r são referentes tanto aos dados originais quanto transformados em base logarítmica. Dentre os parâmetros, o CTT apresentou menor correlação, sendo isso resultante das diferenças de escala de variação.

Tabela 5 – Matriz de Pearson entre os parâmetros utilizados no estudo ($\alpha = 0,05$).

<i>Valores Originais</i>								
Parâmetro	DBO	DQO	SST	NAM	N	TKN	P	CTT
DBO	1							
DQO	0,659	1						
SST	0,655	0,983	1					
NAM	0,659	0,893	0,872	1				
N	0,664	0,852	0,854	0,868	1			
TKN	0,619	0,804	0,764	0,916	0,844	1		
P	0,637	0,882	0,898	0,794	0,764	0,671	1	
CTT	0,468	0,237	0,246	0,376	0,373	0,438	0,285	1
<i>Valores Transformados ($\log_{10}$)</i>								
Parâmetro	DBO	DQO	SST	NAM	N	TKN	P	CTT
DBO	1							
DQO	0,916	1						
SST	0,891	0,954	1					
NAM	0,635	0,758	0,611	1				
N	0,622	0,684	0,646	0,634	1			
TKN	0,533	0,689	0,551	0,877	0,743	1		
P	0,743	0,788	0,793	0,531	0,428	0,443	1	
CTT	0,540	0,520	0,582	0,300	0,419	0,362	0,590	1

Fonte: Autor (2024).

Os resultados da ponderação com os dois métodos, AHP e AHPG, estão na Tabela 6. Na aplicação da AHP padrão, DBO e DQO são critérios permutáveis entre si, pois foram admitidos com mesmo peso comparativo, para representar o conteúdo agregado de matéria orgânica. Para o nitrogênio, os pesos de NAM, TKN e N foram próximos (em torno de 5,4%)

e, em princípio podem ser assim considerados.

Tabela 6 – Comparativo dos pesos pelos métodos AHP e AHPG

Parâmetro	AHP ₁	AHP ₂	AHP ₃	AHP ₄	AHP _{G1}	AHP _{G2}	AHP _{G3}	AHP _{G4}
DBO	0,203	0,285	0,223	0,194	0,119	-	0,180	-
DQO	0,203	-	-	-	0,181	0,251	-	0,256
SST	0,116	0,156	0,223	0,330	0,154	0,214	0,234	0,217
NAM	0,058	0,092	0,118	0,090	0,094	0,131	0,143	-
N	0,050	-	-	-	0,081	-	-	0,115
TKN	0,054	-	-	-	0,080	-	-	-
P	0,042	0,059	0,066	0,048	0,097	0,135	0,148	0,138
CTT	0,274	0,408	0,370	0,338	0,194	0,269	0,295	0,274

Fonte: Autor (2024).

Ainda com a aplicação da AHP tradicional, para o conjunto inicial de 8 (oito) parâmetros, o peso maior foi representado por CTT, enquanto o menor foi para P. Também, foram testados outros arranjos, com número menor de parâmetros (cinco ao todo). A distribuição de pesos seguiu o mesmo espectro.

Ao refletir sobre o melhor conjunto de parâmetros de um IQEF, em princípio é mais recomendável empregar DQO e NAM como substituíveis da DBO, bem como do TKN e do N, respectivamente. Os parâmetros DQO e NAM dispõem de procedimentos analíticos mais factíveis (*i.e.* simples) comparado aos seus equivalentes (Silva e Oliveira, 2001; APHA, 2022).

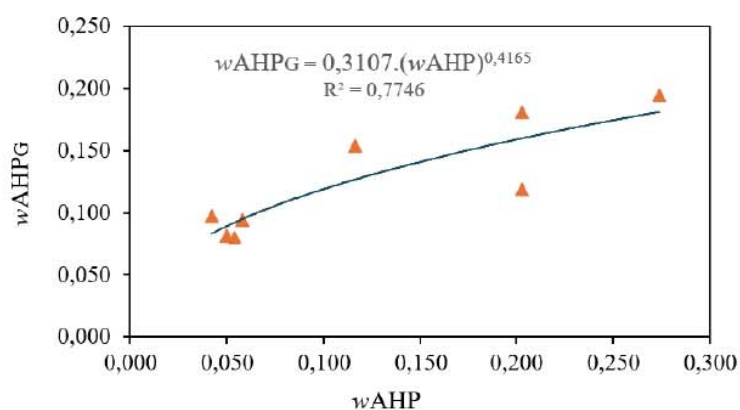
A razão IC/RC foi otimizada para valores menores que 5%. Os melhores resultados foram de 2,7% para AHP₁ (conjunto total de 8 parâmetros) e 2,6; 1,4 e 9% para os arranjos AHP₂, AHP₃ e AHP₄, respectivamente. Tal enfoque exigiu uma escala de comparação de importância máxima de até 5 vezes entre parâmetros.

No caso da AHPG a razão IC/RC não deve ser considerada, pois apenas os valores objetivos e efetivamente medidos, respondem pela análise. Sob tal caso, a ponderação pode ser mais sensível. Assim, a equivalência de peso entre parâmetros pode ser menor, ou até mesmo de forma mais distinta. Isso pode ser verificado tanto na ordem de pesos, mas ainda assim há uma correlação significativa (Gráfico 1). A despeito disso, importa destacar que os conjuntos de AHP tradicionais apresentaram sensibilidade maior quanto à seleção de parâmetros, de forma que os CVs foram maiores, comparados aos obtidos com a AHPG (Tabela 6).

Uma análise geral pode sugerir que o método AHPG é mais representativo quando há dados disponíveis. Em tal caso, os pesos de variáveis representam as incertezas observadas. No caso da AHP padrão, a interpretação pode ser mais intuitiva e representar menos significativamente os *status*. O fato é que a escolha entre os dois métodos depende do objetivo

da análise. Assim, a AHPG pode ser mais adequada em situações que requerem maior precisão frente à disposição e variabilidade de dados, enquanto a AHP padrão pode ser mais apropriada em prospecções iniciais ou como escopo geral.

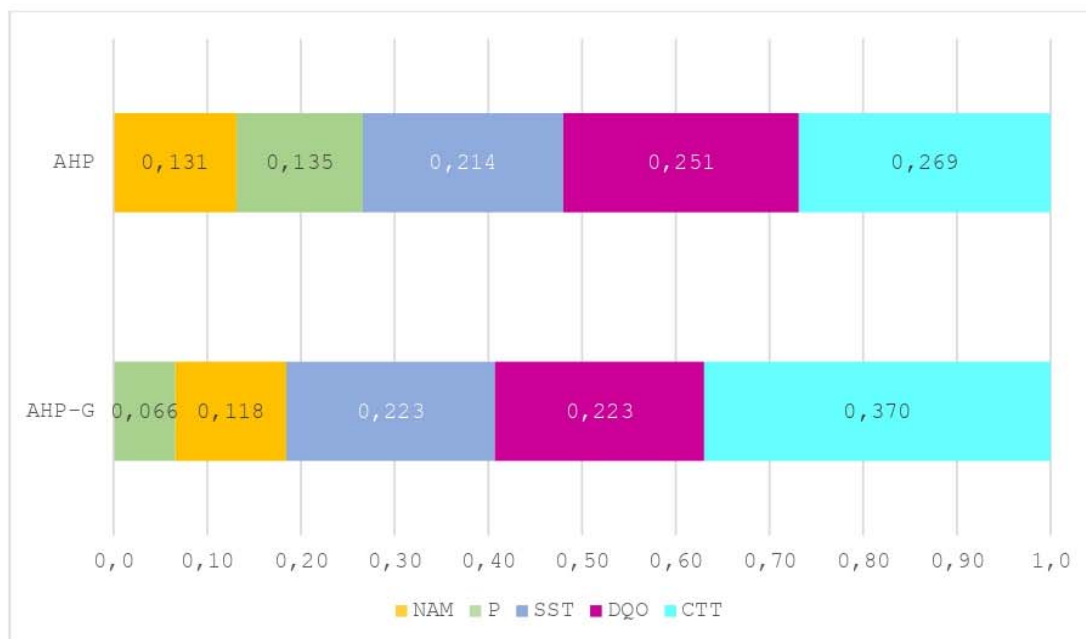
Gráfico 1 - Função de representação da correlação entre AHP e AHPG.



Fonte: Autor (2024).

Ainda com a tabela 6, foi possível comparar os resultados dos dois modelos (Figura 2) e se constatar que embora tenha havido permutação da ordem do P e do NAM, as demais variáveis se mantiveram na ordem original, tendo o CTT ganhado maior relevância na AHP-G.

Figura 2 – Comparação dos pesos entre AHP e AHPG, para cinco parâmetros.



Fonte: Autor (2024).

2.3.1 Aplicação demonstrativa

Para demonstração de aplicação dos pesos com ambos os métodos, propôs-se o uso de uma escala de IQEF tipo Bascarán (1979), conforme apresentado na Tabela 7. Trata-se de uma escala normalizada (0 a 100) com incrementos crescentes nas subclasses e acréscimos de 10 unidades. As subclasses dizem respeito a intervalos de valores de concentrações de poluentes. Esse tipo de escala tem uso em estudos com os de Pesce e Wunderlin (2000) e Moraes *et al.* (2023). Uddin, Nash e Olbert (2021) em seu texto revisional destacam isso no uso desse tipo de escala. A aplicação demonstrativa empregou o modelo aditivo (Equação 7).

$$IQEF_{aditivo} = \sum_{i=1}^n w_{ij} q_{ij} \quad (7)$$

Em que: w é o peso do parâmetro e q é o escore (nota) de acordo com a escala de IQEF.

Tabela 7 – Proposta de escala de IQEF.

<i>Escore</i>	<i>DBO</i>	<i>DQO</i>	<i>SST</i>	<i>NAM</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>CTT</i>
100	< 40	< 100	< 30	< 5,0	< 7,5	< 1,0	< 250
90	40 - 50	100 - 120	30 - 50	5,0 - 6,5	7,5 - 10,0	1,0 - 1,5	250 - 500
80	51 - 60	121 - 140	51 - 60	6,6 - 8,0	10,1 - 12,0	1,6 - 2,0	501 - 1000
70	61 - 70	141 - 160	61 - 80	8,1 - 9,5	12,1 - 14,0	2,1 - 2,5	1001 - 1500
60	71 - 80	161 - 180	81 - 100	9,6 - 11,0	14,1 - 16,0	2,6 - 3,0	1501 - 2500
50	81 - 90	181 - 200	101 - 130	11,1 - 12,5	16,1 - 17,0	3,1 - 3,5	2501 - 3500
40	91 - 100	201 - 220	131 - 160	12,6 - 14,0	17,1 - 18,0	3,6 - 4,0	3501 - 4500
30	101 - 110	221 - 240	161 - 190	14,1 - 15,5	18,1 - 19,0	4,1 - 4,5	4501 - 5500
20	111 - 120	241 - 260	191 - 220	15,6 - 17,0	19,1 - 20,0	4,6 - 5,0	5501 - 7500
10	121 - 150	261 - 300	221 - 240	17,1 - 18,5	20,1 - 22,5	5,1 - 5,5	7501 - 10000
0	> 150	> 300	> 240	> 18,5	> 22,5	> 5,5	> 10000

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 8 contém exemplo aplicativo que utilizou ambos os formatos de ponderação (AHP e AHPG) obtidos no presente estudo. Para a configuração de AHP2 o escore corresponde foi de 54, valor esse aproximando da AHP Gaussiana 2, o qual compartilham a mesma faixa. Por sua vez a AHP3 e a AHPG3 obtiverem escores idênticos de 34, o que pode evidenciar uma possibilidade de equivalência de modelos para a faixa de dados testado.

Outrossim, a variação da quarta configuração também apontou semelhança do escore de 99,97% entre a AHP e AHPG4, reforçando a hipótese de equivalência dos métodos

empregados.

Mesmo diante da variação dos dados quanto a sua natureza, os modelos gaussianos e tradicional para AHP parecem estar coerentes entre si. Isso poderá representar um ganho gerencial caso se opte por um dos modelos ou ainda ao se comparar estes dois métodos. Para isso, contudo, seria apropriado outras avaliações e simulações, em especial de caráter estatístico-computacional, para a consolidação dessa hipótese.

Tabela 8 – Exemplo de aplicação de IQEF com ponderação proposta no estudo.

Parâmetro	Concentração na Amostra	Peso	Escore	Arranjo	Escore Ponderado
DBO	65 mg/L	0,285	80	AHP ₂	20,0
SST	58 mg/L	0,156	80		12,5
NAM	8,0 mg N/L	0,092	80		7,4
P	4,0 mg P/L	0,059	40		2,4
CTT	5000 NMP/100mL	0,408	30		12,2
IQEF	-	-	-		54
DBO	100 mg/L	0,223	40	AHP ₃	8,9
SST	92 mg/L	0,223	60		13,4
NAM	18,0 mg N/L	0,118	10		1,2
P	4,0 mg P/L	0,066	40		2,6
CTT	7500 NMP/100mL	0,370	20		7,4
IQEF	-	-	-		34
DBO	55 mg/L	0,194	80	AHP ₄	15,5
SST	50 mg/L	0,330	90		29,7
NAM	2,5 mg N/L	0,090	100		9,0
P	2,5 mg P/L	0,048	70		3,4
CTT	1000 NMP/100mL	0,338	80		27,0
IQEF	-	-	-		85
DQO	120 mg/L	0,251	90	AHP _{G2}	22,6
SST	58 mg/L	0,214	80		17,1
NAM	8,0 mg N/L	0,131	80		10,5
P	4,0 mg P/L	0,135	40		5,4
CTT	5000 NMP/100mL	0,269	30		8,1
IQEF	-	-	-		64
DBO	100 mg/L	0,180	40	AHP _{G3}	7,2
SST	92 mg/L	0,234	60		14,0
NAM	18,0 mg N/L	0,143	10		1,4
P	4,0 mg P/L	0,148	40		5,9
CTT	7500 NMP/100mL	0,295	20		5,9
IQEF	-	-	-		34
DQO	95 mg/L	0,256	100	AHP _{G4}	25,6
SST	50 mg/L	0,217	90		19,5
N	8,0 mg N/L	0,115	90		10,4
P	2,5 mg P/L	0,138	70		9,7
CTT	1000 NMP/100mL	0,274	80		21,9
IQEF	-	-	-		87

Fonte: Autor (2024).

2.4 CONCLUSÃO

O método de Análise Hierárquica de Processo (AHP) permite uma importante abordagem na ponderação de variáveis constituintes de Índices de Qualidade Ambiental (IQAMB). No presente estudo o método foi empregado na ponderação de parâmetros para estruturação de Índice de Qualidade de Efluente (IQEF).

Inicialmente foram empregados 8 parâmetros, sendo mais prático e recomendável a utilização de um conjunto composto por DQO, SST, NAM, P e CTT. A análise de sensibilidade desse último grupo com escala de comparação de máxima de até 5 vezes entre parâmetros resultou em razão IC/RC $\leq 5\%$.

O formato de AHP padrão e a variação Gaussiana (AHPG) apresentaram resultados próximos. Em ambos os casos o parâmetro CTT apresentou maior peso. Na abordagem padrão o P apresentou peso menor, seguido do NAM. Com a AHPG ocorreu uma inversão, de maneira que o nitrogênio amoniacal apresentou menor relevância, seguido do parâmetro fósforo total. Em nível intermediário as variáveis DQO e SST alternaram posições com a análise de sensibilidade.

Foi proposta uma escala de IQEF tipo Bascarán para que fossem demonstrados exemplos aplicados. Na comparação, tanto o método padrão da AHP com a AHPG ratificaram a proposta do estudo. Na análise padrão os pesos recomendados para DQO, SST, NAM, P e CTT foram: 0,223; 0,223; 0,118; 0,066 e 0,370. Essa seria a composição obtida com a menor razão IC/RC (1,4%). Ao empregar a AHPG, de maneira equivalente, os pesos recomendados foram: 0,251; 0,214; 0,131; 0,135 e 0,269.

3. PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE VIA ENTROPIA DE SHANNON E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Os Índices de Qualidade da Água (IQAs) são ferramentas importantes para a gestão dos recursos hídricos. Possibilitam a integração de diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos em um valor numérico, normalizado e categorizado. Um IQA representa o estado de um corpo aquático de acordo com critérios pré-estabelecidos. Tem uso difundido em práticas de monitoramento ambiental e em políticas públicas para a conservação da água (Benkov, Tsakovski e Venelinov, 2024, Carvalho *et al.* 2022, CETESB, 2013).

Com igualdade, a qualidade dos efluentes lançados em corpos hídricos é também uma preocupação central em políticas ambientais globais. É especialmente relevante em locais com tensões como indústrias, grandes centros urbanos e regiões sob escassez hídrica. Uma avaliação minudente e precisa da qualidade dos efluentes despejados no ambiente é imperativa para a proteção dos ecossistemas aquáticos e garantia sustentável destes (Kumar e Prasad, 2024). Sob tal contexto, o uso de um Índice de Qualidade de Efluente (IQEF) é também um valioso recurso de monitoramento e que reflete a performance dos equipamentos de tratamento (Chen *et al.*, 2022; Syeed *et al.* 2023; Benkov, Tsakovski e Venelinov, 2024).

Fortes, Barrocas e Kligerman (2023) destacam a importância de uma seleção adequada de variáveis e a devida ponderação dessas, para que um índice de qualidade de água seja bem estruturado. Portanto, um índice deve ser pensado de forma a representar os objetivos pretendidos (Von Sperling, 2007; Zardari *et al.* 2015; Carvalho *et al.* 2022). O IQEF é, desse modo, um tipo de IQA que também é representado em modelo agregado (por adição ou produto). A seleção de variáveis de um IQEF deve incluir os parâmetros usualmente utilizados no monitoramento de efluentes sanitários, como matéria orgânica, nutrientes e indicadores microbianos (Von Sperling, 2014).

Complementarmente, a concepção de um IQEF exige a ponderação de seus parâmetros constituintes. Essa ponderação deve atribuir a importância relativa de cada parâmetro, de acordo com o seu impacto no ecossistema aquático e quanto ao uso da água. Por exemplo, variáveis como oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total e turbidez são comuns. Entretanto, a relevância de cada uma pode variar de acordo com a região geográfica, as atividades antrópicas na bacia hidrográfica e o tipo de corpo hídrico (Qina, Xia e Feng, 2021; Oliveira *et al.*, 2022).

Zardari *et al.* (2015) e Chidiac *et al.* (2023) apontam que os métodos de ponderação são variados e influenciam diretamente na precisão e aplicabilidade. A ponderação fixa é uma abordagem tradicional, em que pesos predefinidos são aplicados com base em estudos prévios e consensos científicos. Mais recentemente, a disponibilidade de recursos computacionais mais com alta performance de processamento tem possibilitado a composição de sistemas complexos e potencialmente dinâmicos na ponderação, como destacado por Fortes, Barrocas e Kligerman (2023) e Chen *et al.* (2025).

Dentre os métodos objetivos de ponderação (*i.e.* aqueles que refletem o conjunto de dados disponíveis) destacam-se o da Entropia de Shannon e o do Coeficiente de Variação, como mencionado por Mukhametzyanov (2021). A rotina simples e direta de cômputo de pesos torna a abordagem atraente, como visto em Zhe, Xigang e Feng (2021), Gorgij e Moayeri (2023) e Rahimabadi, Azarnivand e Malekian (2023).

O método de Entropia de Shannon (1948) mede a relevância das variáveis pela diversidade de informação que elas contêm. A ponderação baseada no Desvio Padrão de um conjunto amostral é bem representada pela ideia de Coeficiente de Variação (CV), pois reduz as discrepâncias de escala. Assim, com o CV é avaliada a variabilidade relativa dos dados analisados. O presente estudo aborda esses métodos para atribuir pesos às variáveis que compõem um IQEF.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Caracterização do estudo e fontes dos dados

O estudo teve caráter teórico-aplicativo e utilizou-se de fontes secundárias como base de dados. Foram considerados 27 estudos, listados na Tabela 3, os quais contemplaram diferentes perfis tecnológicos empregados no tratamento de esgotos.

As fontes selecionadas abrangeram artigos científicos, livros especializados, dissertações, teses, além de relatórios técnicos. As tecnologias foram diversificadas com a finalidade de se investigar o comportamento agregado de diferentes sistemas de tratamento de águas residuárias. Assim, foram considerados Reatores Anaeróbios, Sistemas Australiano (Oliveira e Von Sperling, 2007), Lodo Ativado (Michalake, Silva e Silva, 2016), UASB simples (Hamerski, 2012), Sistema Alagados Construídos (Kimwaga *et al.*, 2004), entre outros.

Para fins práticos de análise, o sistema combinado de tecnologias configura-se como uma forma de tratamento distinta. Essa abordagem é usualmente adotada por especialistas, não sendo isenta de discussões ou ponderações técnicas. Os sistemas combinados tratados no conjunto de dados podem obter subclassificações conforme a tecnologia precípua de cada sistema. Assim, os valores que se correlaciona como o reator UASB seguida de complementos foram seguintes trabalhos: Saghir *et al.* (2022), Philomina *et al.* (2022), Lima e Tavares (2012), Ribeiro e Silva (2018), Khatri *et al.* (2022), Carvalho *et al.* (2022), Oliveira e Von Sperling (2007) e Soares *et al.* (2015). Semelhantemente, ocorre o mesmo com Soares *et al.* (2015), Souza *et al.* (2015), tendo o Tanque Séptico como elemento principal a ser adicionado por completos.

Por outro lado, as demais tecnologias estão associadas usos restritos, modelos experimentais ou aplicação especial. Se enquadram nessa categoria os trabalhos de Belloni (2011), Bueno *et al.* (2019), Butzen *et al.* (2020), Cabrera *et al.* (2022), Cybis, Santos e Gehling (2004), Hiras, Manariotis e Grigoropoulos (2004), Hoss *et al.* (2022), Madeira *et al.* (2023), , Oliveira e Von Sperling (2007), Arthur *et al.* (2022), Santos *et al.* (2021) e por último, Oliviera, Bastos e Souza (2019).

A partir das bibliografias acima e analogamente ao que foi realizado na parte 2 desta obra, foram considerados como parâmetros descritores da qualidade de um efluente sanitário, a DBO, a DQO, o P, o NAM, o CTT, o TKN, o N e o SST. Posteriormente, sob análise mais crítica e redutora foram selecionados alguns arranjos de parâmetros para fortalecer a discussão.

3.2.2 Enfoque e procedimentos

Para os dados compilados e tabulados foram computados os pesos dos parâmetros dos efluentes através da Entropia de Shannon e do Coeficiente de Variação. Em seguida, com o emprego dos parâmetros selecionados para consolidação do IQEF, repetiram-se os cálculos e fez-se uma aplicação demonstrativa, equivalente ao desenvolvido por Araújo (2023). A descrição dos cálculos seguiu o conjunto de expressões explanadas abaixo.

3.2.3 Entropia de Shannon

Estruturou-se inicialmente uma matriz (X) com (n) sistemas e (m) variáveis (*i.e.* parâmetros de qualidade de efluente). Em seguida efetuou-se a normalização dos dados ($p_{i,j}$) da matriz empregando a razão da soma (Equação 8).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ x_{n1} & x_{m2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$p_{i,j} = x_{i,j} / \sum_{i=1}^n x_{i,j} \quad (9)$$

A entropia da informação (e_i) foi calculada conforme a Equação 10 e o peso por entropia das variáveis (w_i) dado conforme a Equação 11.

$$e_i = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{i,j}) \quad (10)$$

$$w_i = \frac{(1-e_i)}{\sum_{i=1}^m (1-e_i)} \quad (11)$$

3.2.4 Coeficiente de variação

A ponderação por CV foi baseada na distribuição Normal (CVN) e pelo coeficiente de variação entre quartis (CVQ). Os cálculos seguiram as formulações descritas em Bindu *et*

al. (2020) e Arachchige, Prendergast e Staudte (2022).

$$CV_N = \sigma/\mu \quad (12)$$

$$CV_Q = (Q_3 - Q_1)/(Q_3 + Q_1) \quad (13)$$

Em que: σ é o desvio padrão da distribuição Normal; μ é a média aritmética; Q_3 e Q_1 são os quartis de 75 e 25%, respectivamente.

3.2.5 Descrição da aplicação

Aplicação dos pesos calculados seguiu duas escalas de avaliação propostas por Araújo (2023). A primeira é um IQEF que é mostrado na Tabela 9. Os escores foram computados de acordo com as formulações contidas na Tabela 10. Araújo (2023) propôs ainda uma abordagem com um índice mais simples, dividido em cinco níveis, como mostrado na Tabela 11. Nesse último, apesar de dividido em níveis com valores inteiros, a interpretação do valor agregado é dada com um algarismo significativo, seguindo conforme: 1,0 é péssimo; de 1,1 a 2,29 é não satisfatório; 3,0 a 3,9 é regular; de 4,0 a 4,9 é bom e 5,0 é excelente. Empregou-se aqui a agregação por adição.

Tabela 9 – Classificação do índice de qualidade do efluente (IQEF).

IQEF	Classificação	Cor
91 - 100	Excelente	Azul
71 - 90	Bom	Verde
50-70	Regular	Amarelo
25-49	Não Satisfatório	Laranja
1 - 24	Péssimo	Vermelho

Fonte: Araújo (2023).

Tabela 10 – Equações dos escores dos subíndices para cálculo do IQEF.

Parâmetro	Unidades	Equação de Subíndice
DQO	(mg/L)	- 0,5824.DQO + 146,6
SST	(mg/L)	-0,707.SST + 128,39
NAM	(mg N/L)	- 6,6.NAM + 133
P	(mg P/L)	-33.P + 133
CTT	(NMP/100 mL)	-0,002.CTT + 102,02

Fonte: Araújo (2023).

Tabela 11 – Classificação do nível de qualidade do efluente (NQEF).					
Parâmetro	Péssimo	Não Satisfatório	Regular	Bom	Excelente
	1	2	3	4	5
DQO	> 250	201 - 250	151 – 200	80 - 150	< 80
SST	> 180	151 - 180	81 – 150	40 - 80	< 40
NAM	> 20,0	15,1 - 20,0	10,1 - 15,0	5,0 - 10,0	< 5,0
P	> 4,0	3,6 - 4,0	2,1– 3,5	1,0 – 2,0	< 1,0
CTT	> 5,0E+4	1,1E+4 - 5,0E+4	5,1E+3 - 1,0E+4	1,0E+3 - 5,0E+3	< 1,0E+3

Fonte: Araújo (2023).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

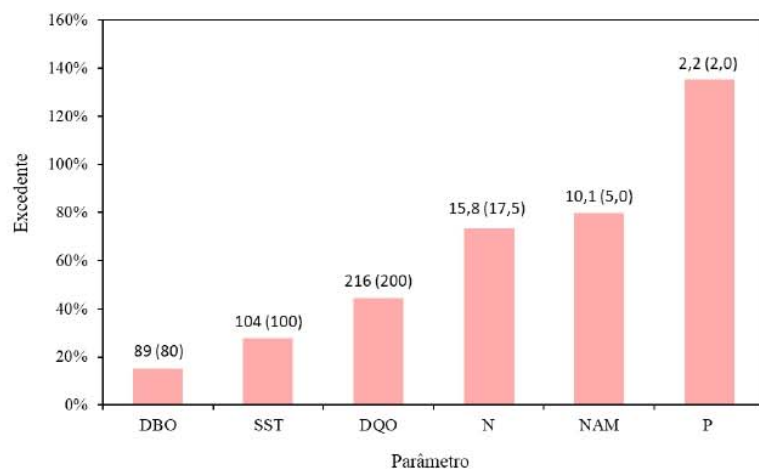
A Tabela 12 contém um resumo do conjunto de valores compilados para a ponderação. Os números relativos à assimetria positiva ($^+\gamma$) destacaram a variabilidade que pode ocorrer em sistemas de tratamento de esgotos. Ao considerar razões de massa os valores determinados foram: 21,6:7,4:1 (DBO:N:P) 21,6:4,9:1 (DBO:NAM:P). Para substituir a DBO pela DQO, basta multiplicar por 2,58 (razão média DQO/DBO observada no conjunto de dados).

Comparados aos valores centrais do aparato normativo brasileiro, conforme Moraes e Santos (2019), o Gráfico 2 ilustra a lacuna entre a norma e o resultado alcançado. No gráfico, os valores apresentados sem e entre parênteses são a média e mediana, compiladas a partir do trabalho supracitado. O valor percentual nas ordenadas é o excedente a norma. O parâmetro CTT não foi mostrado em razão da escala de variação. A diferença pode ser expressa em unidades logarítmicas, 2,115 e 1,417 para média e mediana.

Tabela 12 – Descritivo estatístico do conjunto de dados de efluente do capítulo.								
Descritor	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	NAM (mg N/L)	N (mg N/L)	TKN (mg N/L)	P (mg P/L)	CTT (NMP/100mL)
Média	102	312	133	18,1	27,4	25,7	5,2	4,14E+06
Desvio Padrão	124	574	208	17,4	22,7	21,1	5,1	8,17E+06
Mínimo	12	25	18	2,3	2,0	4,6	0,9	3,06E+02
Máximo	587	2968	1074	85,8	109,3	94,2	25,6	3,40E+07
Assimetria	2,776	4,126	3,896	2,431	1,901	1,492	2,658	2,520

Fonte: Autor (2024).

Gráfico 2 – Percentual médio dos valores compilados para o estudo que ficaram acima dos limites estabelecidos no conjunto de normas brasileiras para despejo de efluentes.



Fonte: Autor (2024).

Os resultados da ponderação que foram computados de acordo com o propósito do estudo estão contidos na Tabela 13. Para o conjunto maior de variáveis (oito ao todo), os parâmetros CTT e DQO apresentaram maior peso com os métodos de Entropia (ENT) e Coeficiente de Variação da Normal (CVN). Os parâmetros TKN e N apresentaram menor peso. Com a aplicação do Coeficiente de Variação entre os Quartis (CVQ), os maiores pesos foram para CTT e TKN, enquanto os menores foram para NAM e N. Isso sugere que a distribuição estatística de cada parâmetro afeta os resultados da ponderação. Ressalta-se ainda que os quartis são menos afetados por valores extremos. O método de Entropia Shannon apresentou maior variação entre os pesos computados, seguido o do Coeficiente de Variação da Normal e o do Coeficiente de Variação entre os Quartis.

Tabela 13 – Pesos (w) dos parâmetros através dos métodos de entropia e coeficiente de variação.

Método	DBO	DQO	SST	NAM	N	TKN	P	CTT
ENT	0,137	0,158	0,130	0,073	0,064	0,060	0,087	0,291
ENT1	-	0,213	0,176	0,099	-	-	0,118	0,394
CVN	0,119	0,181	0,154	0,094	0,081	0,08	0,097	0,194
CVN1	-	0,251	0,214	0,131	-	-	0,135	0,269
CVQ	0,110	0,122	0,113	0,104	0,109	0,126	0,114	0,202
CVQ1	-	0,186	0,173	0,159	-	-	0,175	0,307

Fonte: Autor (2024).

Uma redução no número de variáveis foi considerada através da correlação de Pearson entre os dados originalmente compilados (com nível com $\alpha = 0,05$ e $r_{min} = 0,381$). Os maiores valores de coeficientes de correlação ($r \geq 0,794$) sugeriram a seleção dos parâmetros

DQO, SST, NAM e P. A exceção foi o parâmetro CTT que apresentou maior correlação com DBO ($r = 0,468$) e TKN ($r = 0,438$), porém inferiores ao mínimo com os demais parâmetros.

Uma explicação plausível para isso reside na escala de variação do parâmetro CTT, bem como devido a expressão de fração orgânica degradável nas análises de DBO e TKN. Também, para o conjunto de tecnologias do estudo, os mecanismos de remoção de indicadores microbianos envolvem desinfecção por processos distintos e complexos. Por outro lado, é razoável considerar a inclusão dos coliformes termotolerantes no grupo de estruturação básica do IQEF em razão do importante significado sanitário dessa variável.

3.3.1 Aplicação da ponderação em IQEF

A matriz abaixo (Tabela 14) exemplifica a aplicação dos pesos computados e aplicados nos índices apresentados nas Tabelas de números 9 a 11. A agregação foi do tipo aditiva.

Tabela 14 – Exemplo de aplicação de IQEF, com ponderação com ENT, CVN e CVQ.

<i>Parâmetro</i>	<i>Concentração na Amostra</i>	<i>Peso</i>	<i>Escore IQEF</i>	<i>Classe NQEF</i>	<i>Arranjo</i>
DQO	100 mg/L	0,213	88,4	4	ENT1
SST	92 mg/L	0,176	63,3	3	
NAM	7,5 mg N/L	0,099	83,5	4	
P	4,0 mg P/L	0,118	1,0	2	
CTT	7500 NMP/100 mL	0,394	87,0	3	
Valor Agregado	-	-	73	3,2	
DQO	90 mg/L	0,251	94,2	4	CVN1
SST	50 mg/L	0,214	93,0	4	
NAM	2,5 mg N/L	0,131	100,0	5	
P	2,5 mg P/L	0,135	50,5	3	
CTT	1000 NMP/100 mL	0,269	100,0	4	
Valor Agregado	-	-	90	4,0	
DQO	158 mg/L	0,186	54,6	3	CVQ1
SST	102 mg/L	0,173	56,3	3	
NAM	15,0 mg N/L	0,159	34,0	3	
P	3,5 mg P/L	0,175	17,5	3	
CTT	8300 NMP/100 mL	0,307	100,0	3	
Valor Agregado	-	-	59	3,0	

Fonte: Autor (2024).

Diante dos resultados da aplicação evidenciados na Tabela 14, foi possível se observar que o CVQ1 apresentou uniformidade de Classe NQEf para cada parâmetro do estudo.

Isso pode estar relacionado com a natureza estatística do modelo de quartis o qual poderá ser melhor explorada para abordagem de efluentes. Uma outra possibilidade, é a investigação da de uso do CVN₁ para qualificadores que não utilizem os valores de nutrientes (P e N). Por outro lado, a aplicação de entropia, nessa configuração específica, não demonstrou um padrão definido nos escores de Classe NQEf para cada uma das variáveis.

3.4. CONCLUSÃO

O presente estudo tratou dos métodos da Entropia de Shannon e do Coeficiente de Variação para determinação de pesos de parâmetros constituintes de um Índice de Qualidade de Efluente. O método de Entropia Shannon apresentou maior variação entre os pesos computados.

Dentre os parâmetros considerados inicialmente, o conjunto mais apropriado para ser empregado em um IQEF foi composto por: DQO, SST, NAM, P e CTT. Em ordem crescente, os pesos dos parâmetros foram: $w_{NAM} < w_P < w_{SST} < w_{DQO} < w_{CTT}$. Essa ordem foi alcançada com os métodos da Entropia Shannon e do Coeficiente de Variação da Normal. Com a aplicação do Coeficiente de Variação entre os Quartis houve alternância de posição entre SST e P.

4. UMA COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS

Considerando todos os métodos utilizados no estudo pode-se constatar algumas conclusões. Na etapa inicial, representada pela Tabela 15, os pesos atribuídos aos parâmetros variaram ligeiramente entre as metodologias, mas mantiveram uma tendência geral consistente. Coliformes Termotolerantes (CTT) receberam o maior peso médio (0,231), indicando sua alta relevância no contexto da análise. Outros parâmetros, como Nitrogênio Total e Nitrogênio Total Kjeldahl, apresentaram pesos médios mais baixos. Isso levanta a hipótese de uma menor influência dos compostos nitrogenados na avaliação geral. Por outro lado, os resultados refletem a importância de parâmetros microbiológicos e químicos (exceção de N e TKN) na análise de qualidade do efluente.

Tabela 15 – Resumo de ponderação com cada método, valor médio do peso de cada variável e respectivo desvio padrão

Parâmetro	ENT	CVN	CVQ	AHP	AHPG	Média	σ
DBO	0,137	0,119	0,110	0,203	0,119	0,138	0,038
DQO	0,158	0,181	0,122	0,203	0,181	0,169	0,031
SST	0,130	0,154	0,113	0,116	0,154	0,133	0,020
NAM	0,073	0,094	0,104	0,058	0,094	0,085	0,019
N	0,064	0,081	0,109	0,050	0,081	0,077	0,022
TKN	0,060	0,080	0,126	0,054	0,080	0,080	0,028
P	0,087	0,097	0,114	0,042	0,097	0,087	0,027
CTT	0,291	0,194	0,202	0,274	0,194	0,231	0,048

Fonte: Autor (2024).

A matriz de correlação de Pearson apresentada na Tabela 16 demonstrou forte alinhamento entre os métodos, com valores de correlação superiores a 0,86 na quase totalidade das combinações. A alta correlação entre o método de Entropia (ENT) e a média geral (0,982) sugere que este método é capaz de capturar com considerável precisão a tendência geral dos pesos atribuídos pelos demais métodos.

Tabela 16 – Matriz de Pearson de correlação entre os pesos computados pelos métodos do estudo.

Método	ENT	CVN	CVQ	AHP	AHPG	Média
ENT	1					
CVN	0,890	1				
CVQ	0,871	0,640	1			
AHP	0,916	0,868	0,679	1		
AHPG	0,890	1	0,640	0,868	1	
Média	0,982	0,945	0,799	0,956	0,945	1

Fonte: Autor (2024).

Com o refinamento da análise para de oito para cinco variáveis, foi possível computar os resultados, os quais estão apresentados nas Tabelas 17 e 18. A Tabela 17 revelou que CTT continuou a ser o parâmetro mais relevante, com o maior peso médio (0,321). Outros parâmetros, como DQO e SST, também mantiveram alta relevância, enquanto NAM e P apresentaram pesos médios menores, embora ainda significativos. A coerência entre os métodos permaneceu evidente, com variações mínimas nos pesos atribuídos.

Tabela 17 – Comparativo dos pesos para os parâmetros DQO, SST, NAM, P e CTT.

Parâmetro	AHP	AHPG	ENT	CVN	CVQ	Média
DQO	0,223	0,251	0,213	0,251	0,186	0,225
SST	0,223	0,214	0,176	0,214	0,173	0,200
NAM	0,118	0,131	0,099	0,131	0,159	0,128
P	0,066	0,135	0,118	0,135	0,175	0,126
CTT	0,370	0,269	0,394	0,269	0,307	0,321

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 18 reforça a equivalência entre os métodos, mostrando correlações de Pearson elevadas, variando de 0,689 a 0,982. Novamente, o método de Entropia (ENT) demonstrou alta correlação com a média (0,981), reafirmando sua adequação como uma abordagem simplificada e confiável para ponderação de variáveis.

Tabela 18 – Comparativo de métodos para DQO, SST, NAM, P e CTT.

Método	AHP	AHPG	ENT	CVN	CVQ	Média
AHP	1					
AHPG	0,918	1				
ENT	0,946	0,860	1			
CVN	0,918	1	0,860	1		
CVQ	0,846	0,689	0,962	0,689	1	
Média	0,982	0,937	0,981	0,937	0,892	1

Os resultados confirmam a equivalência dos cinco métodos analisados. A redução do conjunto inicial de oito variáveis para cinco foi realizada uma vez que, de forma geral, os pesos de DBO e TKN se mantiveram baixos. Portanto, ao manter os cinco parâmetros mais representativos para a avaliação da qualidade da água, obtêm-se uma melhor representação de IQEF, o que poderá representar em um ganho gerencial sob o ponto de vista da gestão ambiental. Entre os parâmetros analisados, CTT destacou-se como o mais influente, enquanto os métodos ENT e AHP demonstraram maior alinhamento com os resultados médios.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das variáveis utilizando os métodos de Entropia e Coeficiente de Variação (CVN e CVQ) ratificou a importância de considerar tanto a incerteza quanto a variabilidade na ponderação de variáveis. Esses métodos demonstraram coerência nos resultados. A comparação entre os diferentes métodos também evidenciou que variáveis como CTT, DQO, DBO e SST são consistentemente consideradas mais relevantes sob o ponto de vista dos pesos. Isso mostra uma concordância geral entre as abordagens sobre a importância dessas variáveis para o cálculo da qualidade dos efluentes. No entanto, o método AHPG, em particular, atribuiu maior peso ao Fósforo (0,104), o que revela diferenças pontuais no comportamento das metodologias, o que poderá influenciar em estudos de investigação de poluição eutrófica, já que esse fenômeno está relacionado a variáveis de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo).

A análise inicial considerou oito variáveis, entre elas DBO, DQO, SST, NAM, N, TKN, P e CTT. No entanto, a etapa subsequente refinou o escopo para cinco variáveis prioritárias: DQO, SST, NAM, P e CTT. Esse subconjunto foi suficiente para descrever a qualidade dos efluentes sem comprometer a representatividade dos dados, permitindo a redução da complexidade do índice.

Com o refinamento para cinco variáveis, os métodos AHP e AHPG reafirmaram suas similaridades e concordância. Na AHP padrão, os pesos atribuídos foram: 0,223 para DQO, 0,223 para SST, 0,118 para NAM, 0,066 para P e 0,370 para CTT. A alta relevância atribuída ao CTT reflete seu papel central na avaliação da qualidade dos efluentes. O AHPG apresentou uma redistribuição nos pesos: 0,251 para DQO, 0,214 para SST, 0,131 para NAM, 0,135 para P e 0,269 para CTT. Essa variação demonstra uma leve reorganização da importância relativa entre os parâmetros, especialmente para o Fósforo, que teve maior relevância nesse método.

Os resultados confirmaram a hipótese inicial ao demonstrar que os métodos analisados (Entropia, AHP e Coeficiente de Variação) apresentaram consistência nas ponderações e alta equivalência em seus resultados. A análise demonstrou a capacidade dessas metodologias de capturar nuances importantes entre as variáveis, mesmo em contextos de incerteza. A equivalência observada reforça a validade do uso dessas abordagens para a construção de um IQEF padronizado. Além disso, a análise inicial com oito variáveis evidenciou a eficácia dos métodos em identificar os parâmetros mais relevantes, com o CTT recebendo consistentemente os maiores pesos em quase todas as abordagens, seguido de perto por DQO, SST e DBO, que também se mostraram consistentes e relevantes. Em contrapartida, as variáveis relacionadas ao nitrogênio, como Nitrogênio Total (N) e Nitrogênio Total Kjeldahl (TKN),

apresentaram pesos menores, refletindo uma menor influência no cálculo da qualidade geral dos efluentes, exceto em casos específicos.

O IQEF proposto atendeu ao conjunto de dados tratados neste. Contudo, algumas lacunas ainda persistem, como a necessidade de se estudar o índice em outros cenários como diferentes tipos de efluentes (industriais e rurais), outras regiões e tecnologias de tratamento. Há também a possibilidade de se utilizar novas variáveis ou metodologias, como Análise de Componentes Principais (ACP) e Lógica *Fuzzy*, que podem ser objeto de futuras pesquisas.

O potencial de contribuição deste estudo para a sociedade é significativo, pois o IQEF pode auxiliar órgãos reguladores, pesquisadores e gestores ambientais a tomarem decisões mais assertivas e fundamentadas.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Mohammad Hafez; BUZBY, Karen; FINKLEA, Harry; HODGES, Cole; AMOS, Morgan; SEATS, Payton; WHITE, Nathan; RUTNIK, Charlotte; SIEFERT, Nicholas; LIN, Lian-Shin. Co-treating flue gas desulfurized effluent and produced water enables novel waste management and recovery of critical minerals. **Journal of Environmental Management**, v. 585, e117782, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117782>. Acesso em: 19 out. 2024.
- ALBERTO, Renato; FRANCO, Momesso; BRAZ, Fernando; HERNANDEZ, Fernando Braz Tangerino; MORAES, Leite. O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2013, Foz do Iguaçu, PR. São Paulo State University. Volume XVI.
- ALVES, Maria Tereza Ribeiro; TERESA, Fabrício Barreto; NABOUT, João Carlos. A global scientific literature of research on water quality indices: trends, biases and future directions. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 26, n. 3, p. 245-253, 2014. DOI: 10.1590/S2179-975X2014000300004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2014000300004>. Acesso em: 7 jan. 2023.
- AMARANTE, Edelvy Bravo; SCHULZ, Ralf Kiran; ROMERO ROMERO, Osvaldo; LÓPEZ BASTIDA, Eduardo Julio; GÜERECÁ, Leonor Patricia. Análisis de decisiones multicriterio en la integración de herramientas de la economía ecológica. **Revista Universidad y Sociedad**, ISSN 2218-3620, Cienfuegos, v. 13, n. 4, p. 468-477,. 2021.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24th Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, 2022. 1516p.
- ARACHCHIGE, Chandima N. P. G.; PRENDERGAST, Luke Anthony; STAUDTE, Robert G. Robust analogs to the coefficient of variation. **Journal of Applied Statistics**, v. 49, n. 2, p. 268–290, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1808599>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- ARAÚJO, Camylla. Rachelle Aguiar. **Índice de Qualidade de Efluente com Ponderação de Variáveis por Método Objetivo**. 2023. 103f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- ARTHUR, Philomina M. A.; KONATÉ, Yacouba; SAWADOGO, Boukary; SAGOE, Gideon; DWUMFOUR-ASARE, Bismark; AHMED, Issahaku; WILLIAMS, Myron N. V. Performance evaluation of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor coupled with trickling filters for municipal wastewater treatment in a developing country. **Heliyon**, v. 8, n. 8, p. e10129, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10129. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10129>. Acesso em: 15 set. 2023.
- AYAN, Bursa; ABACIOGLU, Seda; BASILIO, Marcio Pereira. A comprehensive review of the novel weighting methods for multi-criteria decision-making. **Information**, v. 14, n. 5,

artigo 285, 2023. DOI: 10.3390/info14050285. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/info14050285>. Acesso em: 14 set. 2024.

BARTRAM, Jamie; CAIRNCROSS, Sandy. Hygiene, sanitation, and water: forgotten foundations of health. **PLoS Medicine**, v. 7, n. 11, e1000367, 2010. DOI: 10.1371/journal.pmed. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000367>. Acesso em: 8 jul. 2023.

SILVA, Danielson. O saneamento básico e suas implicações no meio ambiente e na saúde humana. **Engineering Sciences**, v. 8, p. 10-18, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2318-3055.2020.003.0002. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2020.003.0002>. Acesso em: 8 jul. 2023.

BASCARÁN, G.M. Establecimiento de una metodología para conocer la calidad del agua. **Boletín Informativo del Medio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. 30-49, 1979.

BEJ, Shuvasree; SWAIN, Surendra; BISHOYI, Ajit Kumar; MANDHATA, Chinmayee Priyadarsani; SAHOO, Chita Ranjan; PADHY, Rabindra Nath. Wastewater-associated infections: a public health concern. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 7, artigo 444, 2023. DOI: 10.1007/s11270-023-06431-4.

BELIA, Evangelia; BENEDETTI, Lorenzo; JOHNSON, Bruce; MURTHY, Sudhir; NEUMANN, Marc; VANROLLEGHEM, Peter; WEIJERS, Stefan. **Uncertainty in Wastewater Treatment Design and Operation - addressing current practices and future directions**. London: IWA Publishing, 2021. 209 p.

BELLONI, Diego Filipe. **Desempenho de um filtro biológico aerado submerso utilizando como meio suporte tampas de garrafas PET**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

BENKOV, Ivan; TSAKOVSKI, Stefan; VENELINOV, Tony. Assessment of the water quality of WWTPs' effluents through the use of wastewater quality index. **Applied Sciences**, v. 14, n. 18, e8467, 2024. DOI: 10.3390/app14188467.

BIANCHETTI, Fábio José; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; BRANDT, Emanuel Manfred Freire; SANTOS, Henrique Alves. Ferramenta computacional para gestão da recuperação energética e da pegada de carbono em estações de tratamento de esgoto baseadas em reatores anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, e20220093, 2023. DOI: 10.1590/S1413-415220220093.

BINDU, K. Hima; MORUSUPALLI, Raghava; DEY, Nilanjan; RAO, C. Raghavendra. **Coefficient of Variation and Machine Learning Applications**. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2020. 122 p.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 12 ago. 2024.

BUENO, Rodrigo de Freitas; CAMPOS, Fábio; RIVERA, Marianella Munoz; LENIS, Carolina; PIVELI, Roque Passos. Remoção simultânea de material orgânico, nitrogênio e fósforo em um reator em bateladas sequenciais com biofilme de leito móvel operado pelo processo anaeróbico-anóxico-óxico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 747–760, 2019.

BUTZEN, Everton Luis; SANTOS, Gabriel Capellari; FORTUNA, Sandrini Slongo; BRIÃO, Vandrê Barbosa. Membrane bioreactor for mall wastewater treatment. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, p. e2489, 17 abr. 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2489.

CABRERA, Juan José Humanante; ALCIVAR, Lucrecia Cristina Moreno; NAVARRETE, Carlos Alberto Deza; ENDARA, Ana Mercedes Grijalva; MORENO, Juan Humanante; TOMALÁ, Joan Alberto Suárez. Evaluation of biological wastewater treatment in stabilization lagoons from Punta Carnero, Salinas. Equador. **Revista Ambiente & Água**, v. 17, n. 2, e2822, 2022.

CADORIN, Glauber Rover; SOUZA, André Luis Fachini de; DESTEFANI, Anelise; MARTINS, Carlos Eduardo Nogueira. Parâmetros significativos para monitoramento e avaliação da qualidade da água, bacia hidrográfica do Rio Cachoeira (Joinville, Santa Catarina, Brasil). **REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 2023, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21800/2359-1919.202300020>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CARRIÇO, Nelson. **Metodologia multicritério de apoio à decisão na gestão patrimonial de infraestruturas urbanas de água**. 2014. Tese (Doutorado) – Polytechnic Institute of Setúbal, Setúbal, 2014. Orientadores: Dídia Covas; Maria Céu Almeida. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/302098485_Metodologia_multicriterio_de_apoio_a_decisao_na_gestao_patrimonial_de_infraestruturas_urbanas_de_agua. Acesso em: 11 ago. 2023.

CARVALHO, Ana Rita; PÉREZ-PEREIRA, Ariana; COUTO, Cristina M. C. M.; TIRITAN, Maria Elizabeth; RIBEIRO, Cristina M. R. Assessment of effluents quality through ecotoxicological assays: evaluation of three wastewater treatment plants with different technologies. **Environmental Science Pollution Research**, v. 29, n. 1, p. 963-976, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-15671-y

CARVALHO, Clara Bandeira de; MOURÃO, José Marcos Marques; PEREIRA, Erlon Lopes; OLIVEIRA, Maurício Guimarães; SANTOS, André Bezerra dos. Tratamento da água residuária de suinocultura em um sistema biológico para disposição em solo arenoso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 873-888, 2022. DOI: 10.1590/S1413-415220200360.

CARVALHO, José Ribamar Marques de; CURI, Wilson Fadlo. Construção de um índice de sustentabilidade hidro-ambiental através da análise multicritério: estudo em municípios paraibanos. *Sociedade & Natureza*, v. 25, n. 1, p. 91–106, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000100008>. Acesso em: 14 jun. 2024.

CASTRO, Raysa Moraes; MARCIONILIO, Suzana Maria Loures de Oliveira; MORAIS, Wilker Alves; ALVES, Wellmo dos Santos; OLIVEIRA, Lucas Duarte; TEIXEIRA, Marconi Batista; OLIVEIRA, Dener Márcio da Silva. Spatiotemporal analysis of water quality indicators in a watershed in Brazilian Cerrado. **Environmental Monitoring and Assessment**,

2023. Disponível em: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. Acesso em: out. 2024.

CHEN, Ling; WANG, Jiawei; ZHU, Mengyuan; HE, Ruonan; MU, Hongxin; REN, Hongqiang; WU, Bing. Quality evaluation parameter and classification model for effluents of wastewater treatment plant based on machine learning. **Water Research**, v. 268, Part B, e.122696, 2025. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122696.

CHEN, Peizhen; ZHAO, Wenjie; CHEN, Dongkai; HUANG, Zhiping; ZHANG, Cheng; ZHENG, Zhanbin. Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage: a review. **Water**, v. 14, e2439, 2022. DOI: 10.3390/w14152439.

CHIDIAC, Sandra; NAJJAR, Paula El; OUAINI, Naim; RAYESS, Youssef El; AZZI, Desiree El. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 22, p. 349–395, 2023. DOI: 10.1007/s11157-023-09650-7.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais: Apêndice C – Índices de Qualidade das Águas**. São Paulo: CETESB, 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos de água receptores e complementa a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=1835&option=com_sisconama&view=processo. Acesso em: nov. 2024.

COSTA, David de Andrade; AZEVEDO, José Paulo Soares de; SANTOS, Marco Aurélio dos; ASSUMPCÃO, Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes. Water quality assessment based on multivariate statistics and water quality index of a strategic river in the Brazilian Atlantic Forest. **Scientific Reports**, v. 10, artigo 22038, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78563-0>. Acesso em: nov. 2024.

CYBIS, Luiz Fernando de Abreu; SANTOS, Altemar Vilar dos; GEHLING, Gino Roberto. Eficiência do reator sequencial em batelada (RSB) na remoção de nitrogênio no tratamento de esgoto doméstico com DQO baixa. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 260–264, 2004. DOI: 10.1590/S1413-41522004000300012.

DANDEKAR, Pranali; THAKRE, Vivekananda; SHARMA, Kunal; KUSHWAHA, Avani. A predictive model for water quality index assessment by machine learning approach. In: **IEEE International Conference on Computing, Communication, and Control (IC4)**, 2024. p. 1–6. DOI: 10.1109/IC457434.2024.10486535.

DARKO, Amos; CHAN, Albert P. C.; AMEYAW, Ernest; EFFAH, Ameyaw; OWUSU, Emmanuel Kingsford. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. **International Journal of Construction Management**, v. 19, n. 5, p. 1–10, 2018. DOI: 10.1080/15623599.2018.1452098.

FELICE, Fabio; PETRILLO, Antonella; SAATY, Thomas. **Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process: Decision Making for Strategic Decisions**. Rijeka: IntechOpen, 2016. DOI: 10.5772/61387.

FORIO, Marie Anne Eurie; GOETHALS, Peter L. M. An Integrated Approach of Multi-Community Monitoring and Assessment of Aquatic Ecosystems to Support Sustainable Development. **Sustainability**, v. 12, n. 14, artigo 5603, 2020. DOI: 10.3390/su12145603. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>. Acesso em: set. 2023.

FORTES, Ana Carolina Chaves; BARROCAS, Paulo Rubens Guimarães; KLIGERMAN, Debora Cynamon. Water quality indices: construction, potential, and limitations. **Ecological Indicators**, v. 157, e111187, 2023. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111187.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE - FUNASA. **Manual de Saneamento**. 5ª ed. Brasília: Funasa, 2019. 545 p. ISBN 978-85-7346-060-5. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/506>. Acesso em: 4 jan. 2023.

GORGII, Alireza Docheshmeh; MOAYERI, Mohammad Mehdi. Proposing a novel method for the irrigation water quality assessment, using entropy weighted method, entitled: “EIWQI”. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, e462, 2023. DOI: 10.1007/s12665-023-11150-4.

GURLER, Hasan Emin; OZCALICI, Mehmet; PAMUCAR, Dragan. Determining criteria weights with genetic algorithms for multi-criteria decision making methods: The case of logistics performance index rankings of European Union countries. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 91, p. 102–115, 2024.

HAMERSKI, Fernando. **Partida de um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB) no Tratamento de Efluentes Provenientes de uma Indústria de Laticínios**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

HATEFI, Armin; HATEFI, Ehsan. Sequential Monte Carlo with cross-validated neural networks for complexity of hyperbolic black hole solutions in 4D. **European Physical Journal C**, v. 83, n. 11, p. 1083, 2023.

HIRAS, Demetrios N.; MANARIOTIS, Ioannis D.; GRIGOROPOULOS, Sotirios G. Organic and nitrogen removal in a two-stage rotating biological contactor treating municipal wastewater. **Bioresource Technology**, v. 93, n. 1, p. 91–98, 2004. DOI: 10.1016/j.biortech.2003.06.005.

HOSS, Louise; ZANATTA, Rodrigo; QUADRO, Maurício; CORRÊA, Érico Kunde; ANDREAZZA, Robson. Evaluation of the phytotoxicity of landfill leachate treated with a Rotating Biological Reactor. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 47-53, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200283>. Acesso em: ago. 2024.

IMMICH, Tiago Bisognin; MEDEIROS, Raphael Corrêa; DECEZARO, Samara Terezinha. Feasibility study for the implementation and operation of different types of constructed wetlands for a decentralized wastewater treatment system. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 29, e20240005, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220240005>. Acesso em: 19 nov. 2024.

KACHROUD, Moez; TROLARD, Fabienne; KEFI, Mohamed; JEBARI, Sihem; BOURRIÉ, Guilhem. Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. **Water**, v. 11, n. 2, artigo 361, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11020361>. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/journal/water>. Acesso em: dez. 2023.

KALAISELVAN, Subramani; LENIN, A. R.; PADMANABAN, J.; DHANASEKARAN, K. Evaluation of water quality of the surface water bodies in Gorakhpur City. **Ecology, Environment & Conservation**, v. 30, n. SUPPL, p. S280–S284, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i03s.049>. Acesso em: set. 2024.

KESARI, Kavindra Kumar; SONI, Ramendra; JAMAL, Qazi Mohammad Sajid; TRIPATHI, Pooja; LAL, Jonathan A.; JHA, Niraj Kumar; SIDDIQUI, Mohammed Haris; KUMAR, Pradeep; TRIPATHI, Vijay; RUOKOLAINEN, Janne. Wastewater treatment and reuse: a review of its applications and health implications. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 5, article 208, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8>. Acesso em: set. 2024.

KHATRI, Neeraj; VYAS, Abhay Kumar; ABDUL-QAWY, Abdulla Salem Hadid; RENE, Eldon Raj. Artificial neural network based models for predicting the effluent quality of a combined upflow anaerobic sludge blanket and facultative pond: performance evaluation and comparison of different algorithms. **Environmental Research**, v. 217, e114843, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114843>. Acesso em: ago. 2024

KIMWAGA, Richard J.; MASHAURI, Damas Alfred; MBWETTE, Tolly S.A.; KATIMA, Jamidu H.Y.; JØRGENSEN, Sven Erik. Use of coupled dynamic roughing filters and subsurface horizontal flow constructed wetland system as appropriate technology for upgrading waste stabilisation ponds effluents in Tanzania. **Water, Science, Technology and Policy Convergence and Action by All (A Meeting Point for Action Leading to Sustainable Development)**, v. 29, n. 15, p. 1243–1251, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.021>. Acesso em: jun. 2023.

KLAMT, Rodrigo Augusto; COSTA, Adilson Ben da; GAEDKE, Mari Ângela; LOBO, Eduardo Alexis. Drinking water quality indices: a systematic review. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 16, n. 2, p. e2630, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2630>. Acesso em: dez. 2023.

KUMAR, Rambaran; PRASAD, Dipak. Evaluation of water quality of the surface water bodies in Gorakhpur City. **Ecology, Environment & Conservation**, v. 30, n. SUPPL, p. S280–S284, 2024.. Disponível em: <https://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i03s.049>. Acesso em: dez. 2024.

KUMAR, Rinku; SAH, Dinesh; RAJ RANJAN, Abhishek; VERMA, Rahul; GUPTA, Devrani; KUMAR, Arun. Kumar et al. 1992-1996. **Zenodo**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11429287>. Acesso em: jul. 2023.

LEONETI, Alexandre Evillacqua; PRADO, Eliana Leão do; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**, v. 44, n. 6, p. 1271-1295, 2010. ISSN 0034-7612. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-76122011000200003>. Acesso em: 16 jan. 2023.

LIMA, Brayan de Almeida; SANTOS, Marcos dos; GOMES, Andrei Eduardo de Souza; PEREIRA, Daniel Augusto de Moura. Proposta de um framework para seleção de um chassi de ônibus urbano: uma abordagem a partir do quadro de tomada de decisões e dos métodos

AHP E AHP-Gaussiano. **Revista SIMEP**, 2021, v. 1, n. 2, 2021.

LIMA, Fernanda Travaini; TAVARES, Lúcia Helena Sipaúba. Efficiency of a constructed wetland for wastewaters treatment. **Acta Limnológica Brasiliensia**, v. 24, n. 3, p. 255–265, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000043>. Acesso em: jan. 2024.

MACHADO, Gustavo Carvalhaes Xavier Martins Pontual; MACIEL, Tania Maria de Freitas Barros; THIOLENT, Michel. Uma abordagem integral para Saneamento Ecológico em Comunidades Tradicionais e Rurais. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 26, p. 1333–1344, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-81232021264.08242019>. Acesso em: fev. 2024.

MADEIRA, Luís; CARVALHO, Fátima; ALMEIDA, Adelaide; TEIXEIRA, Margarida Ribau. Optimization of atmospheric carbonation in the integrated treatment immediate one-step lime precipitation and atmospheric carbonation. The case study of slaughterhouse effluents. **Results in Engineering**, v. 17, e100807, 2023 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100807>. Acesso em: set. 2024

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. McGraw Hill, Brasil, 2015. 2008 p.

MICHALAKE, Audrey Elis; SILVA, Cristiane Rosa da; SILVA, Frederico Fonseca da. Análise dos parâmetros físico-químicos do esgoto tratado de Curitiba (PR) - Estação Belém. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 1560, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X22180>. Acesso em: mar. 2024.

MORAIS, Lidiane Santana de; CHAGAS, Isabella Cristina Gonçalves de Carvalho; SILVA, Débora Pereira da; SCALIZE, Paulo Sérgio. Surface water quality in rural communities in the state of Goiás during the dry season and its relationship with land use and occupation. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, e20220215, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220215>. Acesso em: fev. 2024.

MORENO, Gleice Carvalho de Lima; HEINZ, Douglas; HEIN, Nelson. Investimento em saneamento básico e a melhoria das condições de saúde das capitais estaduais brasileiras. **Revista de Políticas Públicas**, v. 25, n. 2, p. 908–920, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18764/2178-2865.v25n2p908-920>. Acesso em: jul. 2023.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos. **Introdução à engenharia ambiental**. 6. ed., atual. e rev. Rio de Janeiro: ABES, 2016. 524 p. ISBN 978-85-420-0755-8.

MUKHAMETZYANOV, Irik Z. Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: Entropy, CRITIC and SD. **Decision Making: Applications in Management and Engineering**, v. 4, n. 2, p. 76-105, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31181/dmame210402076i..> Acesso em: 24 jun. 2024.

NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Relatório Anual das Nações Unidas no Brasil 2023**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/271918-relat%C3%B3rio-anual-das-na%C3%A7%C3%B5es-unidas-no-brasil-2023>. Acesso em: 15 jun. 2024.

OLIVEIRA, Amanda R. M. de; BORGES, Alisson C.; SILVA, Greicelene J. da; NASCIMENTO, Moysés. Development of a water quality index with a reduced number of

parameters. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 42, n. 3, e20220006, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n3e20220006/2022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/LHtdW9wNJyW77SgQqYg8Wxp/?lang=en>. Acesso em: 29 jun. 2025.

OLIVEIRA, Diogo Botelho Correa de; SOARES, Willames de Albuquerque; HOLANDA, Marco Aurélio Calixto Ribeiro de. Effects of rainwater intrusion on an activated sludge sewer treatment system. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, p. e2497, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/8rDJC5psy4m9H5X8fnYY6pt/>. Acesso em: 29 jun. 2024.

OLIVEIRA, Sílvia Corrêa; VON SPERLING, Marcos. Análise da confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 389-398, 2007. DOI: 10.1590/S1413-41522007000400005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/xdpVzN4RjNpPnMzKYVhfXCn/>. Acesso em: 4 jul. 2023.

PEREIRA, Alex Cardoso; REZENDE, Bruno Augusto de; ALVES, Fabiano Henrique da Silva; MARQUES, André Luís de Paula; SILVA, Luciana Figueiredo; FEITOZA, Vítor Soares; ROCHA, Héverton Ferreira. Uso da análise multicritério baseada no método híbrido AHP/TOPSIS para implantação de intervenções de programas hidroambientais: estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Doce. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. e022009, 2022. DOI: 10.59824/rmrh.v3i.228. Disponível em: <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/NM/article/view/228>. Acesso em: 21 mai. 2024.

PEREIRA, Ruan Carlos Alves; SILVA Jr., Orivalde Soares da; BANDEIRA, Renata Albergaria de Mello; SANTOS, Marcos dos; ROCHA Jr., Claudio de Souza; CASTILLO, Cristian dos Santos; GOMES, Carlos Francisco Simões; PEREIRA, Daniel Augusto de Moura; MURADAS, Fernando Martins. Evaluation of smart sensors for subway electric motor escalators through AHP-Gaussian Method. **Sensors**, n. 8, p. 4131, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23084131>.

PERONDI, Taise; WOLFF, Delmira Beatriz; DECEZARO, Samara Terezinha; ARAÚJO, Ronaldo Kanopf de. Wetlands construídos para o tratamento de esgoto doméstico: uma análise comparativa do custo do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 175–189, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200394>. Acesso em: abr. 2023.

PESCE, Silvia Fabiana; WUNDERLIN, Daniel A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. **Water Research**, v. 34, n. 11, p. 2915–2926, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1). Acesso em: mar. 2024.

PESSOA, Marco Antonio Ribeiro; SOUZA, Flavio Joaquim de; DOMINGOS, Patrícia; AZEVEDO, José Paulo Soares de. Índice fuzzy de qualidade de água para ambiente lótico — IQAFAL. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 21–30, jan./fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020147587>. Acesso em: mar. 2024.

PHILOMINA, M. A. Arthur.; KONATE, Yacouba; BOUKARY, Sawadogo; SAGOE, Gideon; DWUMFOUR-ASARE, Bismark; AHMED, Issahaku; WILLIAMS, Myron N.V. Performance evaluation of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor coupled with trickling filters for municipal wastewater treatment in a developing country. **Heliyon**, v. 8, n. 8, p. e10129, 1 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10129>. Acesso

em: 11 ago. 2024

PONTES, Ana Karla dos Santos. Avaliação do desempenho ambiental de sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados e biorreatores a membrana. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2020.

QIN, Zeng; XI, Luo; FENG, Yan. The pollution scale weighting model in water quality evaluation based on the improved fuzzy variable theory. **Ecological Indicators**, v. 135, e108562, 2021.108562. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108562>. Acesso em: 20 jan. 2024.

RAHIMABADI, Pouyan Dehghan; AZARNIVAND, Hossein; MALEKIAN, Arash. Application of entropy weighted water quality index and physicochemical indices to evaluate groundwater quality in Damghan Plain. **DESERT**, v. 28, n. 2, p. 181-203, 2023. DOI: 10.22059/jdesert.2023.95500. Disponível em: https://jdesert.ut.ac.ir/article_35262_0.html/article_95500.html. Acesso em: 13 jan. 2024.

REIS, José Antonio Tosta dos; POTON, Izadora Santana Bayer; ALMEIDA, Karinnie Nascimento; RODRIGUES, Murilo Brazzali; REIS, Adriana de Oliveira Pereira dos; SILVA, Fernando das Graças Braga da; MENDONÇA, Antônio Sérgio Ferreira. Seleção de sistemas de tratamento de esgotos com o emprego da análise multicritério: avaliação do emprego de diferentes estruturas de preferências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 761-771, jul./ago. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/4hmxRZxP574fWBQMstKmvwj/>. Acesso em: 15 mar. 2024.

REIS, José Antonio Tosta dos; POTON, Izadora Santana Bayer; ALMEIDA, Karinnie Nascimento; RODRIGUES, Murilo Brazzali; REIS, Adriana de Oliveira Pereira dos; SILVA, Fernando das Graças Braga da; MENDONÇA, Antônio Sérgio Ferreira. Seleção de sistemas de tratamento de esgotos com o emprego da análise multicritério: avaliação do emprego de diferentes estruturas de preferências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 761-771, jul./ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210185>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210185>. Acesso em: 19 out. 2023.

RIBEIRO, Jaqueline Cardoso; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro da. Acompanhamento operacional e avaliação de uma estação compacta de tratamento de esgoto sanitário: reator UASB seguido de filtro aerado submerso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 27-31, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018164458>. Acesso em: 21 abr. 2023.

RIBEIRO, Lucas da Silva; ROBAINA, Luis Eduardo de Souza. A susceptibilidade geoambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão Lajeado - Tocantins. **Sociedade & Natureza**, v. 35, e67033, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67033>. Acesso em: 15 jul. 2024.

RIBEIRO, Natasha Ulhiana Ferreira; BEGA, João Miguel Mercês; ZAMBRANO, Karen Tavares; AMÉRICO-PINHEIRO, Juliana Heloisa Pinê; CARVALHO, Sergio Luis de. Qualidade da água do rio Paraná em região de balneabilidade: discussão sobre os impactos potenciais do lançamento de efluentes provenientes de tratamento secundário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 445-455, maio/jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210126>. Acesso em: 21 jun. 2024.

RIFFAT, Rabia; HUSNAIN, Tahir. **Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering**. 2. ed. Oxon: CRC Press, 2022. 402p.

RUSSO, Ana Carolina; RUSSO, Edison. Application of the AHP-Gaussian method to support the prioritization of workers' health actions in Brazil, based on data from DATASUS. **Gestão & Produção**, v. 31, e10423, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2024v31e10423>. Acesso em: 14 out. 2024.

SAATY, Thomas L. **Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process**. 1. ed. Pittsburgh: RWS Publications, 1991.

SABLIY, Larisa; KUZMINSKIY, Yevgeniy; ZHUKOVA, Veronika; KOZAR, Marina; SOBCZUK, Henryk. New approaches in biological wastewater treatment aimed at removal of organic matter and nutrients. **Ecological Chemistry and Engineering S**, v. 26, n. 2, p. 331-343, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1515/eces-2019-0023>. Disponível em: <https://sciencedirect.com/article/10.1515/eces-2019-0023>. Acesso em: 4 jul. 2023.

SAGHIR, A.; HAJJAR, S. Biological treatment of slaughterhouse wastewater using Up Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) - anoxic-aerobic system. **Scientific African**, v. 16, p. e01236, 2022. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01236

SANEI, E.; GÓMEZ-GALLEGOS, M. A.; MÁRQUEZ, I. Advances in Wastewater Treatment Technologies as Enablers to Reach Sustainable Development Goal 6. In: SEGOVIA-HERNANDEZ, J. G.; RAMÍREZ-CORONA, N.; ARISTIZÁBAL-MARULANDA, V. (Eds.). **Contributions of Chemical Engineering to Sustainability**. Chapter 4, p. 101–124, Springer Nature Switzerland, 2024.

SANTOS, M.V.A.; MORAIS, J.C.; VERAS, S.T.S.; LEITE, W.R.M.; GAVAZZA, S.; FLORÊNCIO, L.; KATO, M.T. Reatores híbridos anaeróbio e aeróbio para remoção de matéria orgânica e nitrogênio em esgoto doméstico diluído. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 591–600, 2021. DOI: 10.1590/S1413-41522020284

SANTOS, R. C. L.; LIMA, A. S.; CAVALCANTI, E.e B.; M., Cláudia Moura de; MARQUES, M. N. Aplicação de índices para avaliação da qualidade da água da Bacia Costeira do Sapucaia em Sergipe. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 1-6, 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522017159832.

SCHMIDT, Katharina; AUMANN, Ines; HOLLANDER, Ines; DAMM, Kathrin; GRAF VON DER SCHULENBURG, J.-Matthias. Applying the Analytic Hierarchy Process in healthcare research: A systematic literature review and evaluation of reporting. **BMC Health Services Research**, v. 15, artigo 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12913-015-0895-6>. Acesso em: dez. 2023.

SCHMIDT, Márcio Augusto Reolon; BARBOSA, Gustavo Rodrigues. Uso de redes neurais artificiais na ponderação inicial da técnica AHP em análises de vulnerabilidade de bacias hidrográficas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p. 511-525, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000300029>. Acesso em: 7 abr. 2023.

SHANNON, Claude E. A Mathematical Theory of Communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, p. 379-423, 1948. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x. Disponível em: <https://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf>. Acesso

em: 22 ago. 2023.

SIENA, Osmar. Método para avaliar desenvolvimento sustentável: técnicas para escolha e ponderação de aspectos e dimensões. **Production**, v. 18, n. 2, p. 359–374, 2008. Universidade Federal de Rondônia, Departamento de Administração, Rondônia, Brasil. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132008000200012>. Acesso em: 10 set. 2023.

SILVA, César de Oliveira Ferreira; GOVEIA, Danielle. Avaliação da qualidade ambiental de corpos hídricos urbanos utilizando análise multivariada. **Interações**, Campo Grande, MS, v. 20, n. 3, p. 947–958, jul./set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v0i0.1832>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/K855699DWTGgVS3dtsWvxb/>. Acesso em: 26 mai. 2024.

SILVA, Everaldo de Santana; OLIVEIRA, Deloar Duda de; LOPES, Amanda Pontes. Acesso ao Saneamento básico e incidência de cólera: uma análise quantitativa entre 2010 e 2015. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 121–136, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S309>. Acesso em: 30 ago. 2024

SILVA, João Vitor Vieira; SIERRA, Daniel Alfonso; SODEK, Daniela Bonazzi; MARTIM, André Luís Sotero Salustiano; DALFRÉ FILHO, José Gilberto; LUVIZOTTO JUNIOR, Edevar. Proposal of resilience indices for water mains subject to hydraulic transients and case study in Franca (Brazil). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 29, e42, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420240002>. Acesso em: 17 out. 2024.

SILVA, Salomão Anselmo; OLIVEIRA, Rui de. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande: Gráfica Marcone, 2001. 266 p.

SOARES, Andressa de Almeida Oliveira; BASTOS, Reinaldo Gaspar; SOUZA, Claudinei Fonseca. Adaptation of Domestic Effluent for Agricultural Reuse By Biological, Physical Treatment and Disinfection By Ultraviolet Radiation. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 2, p. e2292, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2292>. Acesso em: 18 fev. 2024.

SOUZA, Claudinei Fonseca; BASTOS, Reinaldo Gaspar; GOMES, Marcus Paulo de Moraes; PULSCHEN, André Arashiro. Eficiência de estação de tratamento de esgoto doméstico visando reuso agrícola. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 587–597, 2015. DOI: 10.4136/ambi-agua.1549. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/968yQL8LBZGfMPsLTVBDDnm/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

STOFKOVA, Jana; KREJNUS, Matej; REPKOVA STOFKOVA, Katarina; MALEGA, Peter; BINASOVA, Vladimira. Use of the Analytic Hierarchy Process and Selected Methods in the Managerial Decision-Making Process in the Context of Sustainable Development. **Sustainability**, v. 14, n. 18, artigo 11546, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11546>. Acesso em: 13 out. 2023.

STRANDE, Linda; RONTELTAP, Mariska; BRDJANOVIC, Damir. **Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation**. Londres: IWA Publishing, 2014. 403 p. ISBN eletrônico: 9781780404738. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/9781780404738>. Acesso em: 10 dez. 2023.

SYEED, M. M. Mahbubul; HOSSAIN, Md. Shakhawat; KARIM, Md. Rajaul; UDDIN,

Mohammad Faisal; HASAN, Mahady; KHAN, Razib Hayat. Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: a critical review.

Environmental and Sustainability Indicators, v. 18, e100247, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589791823000290>. Acesso em: 3 fev. 2024.

TAVANA, Madjid; SOLTANIFAR, Mehdi; SANTOS-ARTEAGA, Francisco J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution. **Annals of Operations Research**, v. 326, n. 2, p. 879–907, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>. Acesso em: 14 jul. 2024.

UCHEHARA, Ikechukwu; MOORE, David; JAFARIFAR, Naeimeh; OMOTAYO, Temitope. Sustainability rating system for highway design: A key focus for developing sustainable cities and societies in Nigeria. **Sustainable Cities and Society**, v. 78, p. 103620, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103620>. Acesso em: 22 jul. 2024.

UDDIN, Md Galal; NASH, Stephen; RAHMAN, Azizur; OLBERT, Agnieszka I. A comprehensive method for improvement of water quality index (WQI) models for coastal water quality assessment. **Water Research**, v. 219, 2022, p. 118532. ISSN 0043-1354. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118532

UDDIN, Md. Galal; NASH, Stephen; OLBERT, Agnieszka I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. **Ecological Indicators**, v. 122, 107218, 2021. ISSN 1470-160X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>. Disponível também em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20311572>. Acesso em: 15 ago. 2024.

UZUN, B.; OZSAHIN, S.; DUWA, M. Applications of multi-criteria decision-making techniques in renewable energy: A review. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 11, n. 2, p. 1-10, 2021.

VALE, Rodolpho Mendes; VIEIRA, Mateus Lima; SILVA, Mateus José de Siqueira; DINIZ, Bruno Pereira; TOMAZ, Pedro Paulo Mendes. Selection of a Pneumatic Stunner for an Agro-Industrial Beef Process Using the AHP and AHP-Gaussian Methods. **Revista SIMEP**, v. 1, n. 1, p. 10-20, 2022.

VEDEL, Jane Bjørn; GERALDI, Joana G. A ‘stranger’ in the making of strategy: A process perspective of project portfolio management in a pharmaceutical firm. **International Journal of Project Management**, v. 38, n. 7, p. 454-463, 2020. DOI: 10.1016/j.ijproman.2020.03.003.

VELÁSQUEZ-PITA, Fanny Elizabeth; OLIVERA-ALDANA, Mario Félix; DIAZ-VALIENTE, Frank Alexander; MANTILLA-SEVILLANO, Jorge Edwin. Gestión de residuos sólidos: Una revisión documental Solid waste management: A documentary review. **Revista Arbitrada Interdisciplinaria KOINONIA**, ano VIII, v. VIII, n. 2, ed. especial 2, 2023. Santa Ana de Coro,: Fundação Koinonia (F.K). ISSN: 2542-3088.

VON SPERLING, Marcos. **Basic Principles of Wastewater Treatment**. Biological Wastewater Treatment Series, v. 2.: IWA Publishing, 2007. 210 p. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.2166/9781780402093>. Acesso em: 14 nov. 2023.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 588 p.; v. 7. ISBN 85-88556-07-2.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, volume 2. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 2016. 211p.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. **Wastewater treatment. I: Liquid treatment**. 2. ed. Alexandria, VA: Water Environment Federation, 2018. 752 p.

WEBBER, James; CHANAT, Jeffrey; CLUNE, John; DEVEREUX, Olivia; HALL, Natalie; SABO, Robert D.; ZHANG, Qian. Evaluating water-quality trends in agricultural watersheds prioritized for management-practice implementation. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 60, n. 2, p. 305-330, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13197>. Acesso em: 10 out. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO; UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND UNICEF. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: Special focus on inequalities**. New York: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene, 2019. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516235>. Acesso em: 9 jun. 2023.

WUTICH, Amber; BREWIS, Alexandra; TSAI, Alexander. Water and mental health. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 7, n. 5, artigo e1461, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wat2.1461>. Acesso em: 8 set. 2024.

ZAHED, Hameedullah; OBAIDI, Obaidullah; MUKHTAR, Sarban; SHIRANI, Habiburrahman; AHMADI, Mikael; YONA, Atsushi. Comprehensive analysis and prioritization of sustainable energy resources using analytical hierarchy process. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4873, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16114873>. Acesso em: 9 out. 2024.

ZARDARI, Noorul Hassan; AHMED, Kamal; SHIRAZI, Sharif Moniruzzaman; YUSOP, Zulkifli Bin. **Weighting methods and their effects on multi-criteria decision-making model outcomes in water resources management**. Cham: Springer, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12586-2>. Acesso em: 9 jul. 2024.

ZHAO, Kuo; CHEN, J. Emerging dynamic structure of electrocatalysts unveiled by in situ X-ray diffraction/absorption spectroscopy. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 3, p. 1215-1225, 2021. DOI: 10.1039/D0EE03903A.

ZHAO, Kuo; CHEN, J. Emerging dynamic structure of electrocatalysts unveiled by in situ X-ray diffraction/absorption spectroscopy. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 3, p. 1215-1225, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0EE03903A>. Acesso em: 5 out. 2023.

ZHE, Wang; XIGANG, Xing; FENG, Yan. An abnormal phenomenon in entropy weight method in the dynamic evaluation of water quality index. **Ecological Indicators**, 2021. p. 108137. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108137>. Acesso em: 9 jan. 2023.