963 - ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE DQO E $DBO_{5,20}$ E OS EFEITOS DA SAZONALIDADE EM EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO.

André Aukar Britschgy de Camargo[(1)]
Engenheiro Ambiental e mestre em Ciências Ambientais (USP). Engenheiro Civil (UNICEP). Foi consultor ambiental em São Carlos, SP e engenheiro ambiental do estado de Minas Gerais (IGAM). Atualmente é Analista de Regulação e Fiscalização (ARES-PCJ).
Carlos Roberto Belani Gravina[(2)]
Engenheiro Mecânico (FAAP/SP). Gerente de Manutenção e de Produção na Construtora CBPO. Superintendente do SAAE-Atibaia. Atualmente é Diretor Técnico-Operacional (ARES-PCJ).

Endereço[(1)]**:** Av. Paulista, nº 633 - Jardim Santana - Americana - SP - 13478-580 - Brasil - Tel.: +55 (19) 3471-5127 - e-mail: andre.aukar@arespcj.com.br.

RESUMO

O presente estudo analisa a correlação entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) em efluentes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), considerando os efeitos da sazonalidade. Utilizando dados de monitoramento obtidos em 2024, durante os períodos chuvoso e seco, foram avaliados 172 laudos laboratoriais de 86 ETEs em 56 municípios. A pesquisa demonstrou uma forte correlação entre $DBO_{5,20}$ e DQO ($R^2 > 0,96$), validando a DQO como um indicador eficiente para estimar a $DBO_{5,20}$. A sazonalidade influenciou a eficiência do tratamento, com maior diluição do esgoto no período chuvoso e maior carga orgânica no período seco, impactando a conformidade com os limites regulamentares. Os resultados destacam a necessidade de otimizações operacionais e investimentos em infraestrutura para mitigar os efeitos da variabilidade climática sobre a qualidade do efluente tratado.

PALAVRAS-CHAVE: Biodegradabilidade, DBO, DQO, Sazonalidade, ETE.

INTRODUÇÃO

A eficiência do tratamento de esgoto é essencial para garantir a proteção dos corpos hídricos e a preservação ambiental (DANTAS *et al*., 2022). Nesse contexto, a análise da Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$) e da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é amplamente utilizada para avaliar a carga orgânica em sistemas de tratamento de águas residuárias e atestar a sua eficiência (SCALIZE *et al*., 2004; BUDEIZ e AGUIAR, 2020; QASAIMEH *et al*., 2020; RUDARU *et al*., 2022). A DBO mede a quantidade de oxigênio necessária para a decomposição biológica da matéria orgânica, enquanto a DQO quantifica a quantidade total de oxigênio necessário para oxidar tanto as substâncias biodegradáveis quanto as não biodegradáveis (VON SPERLING, 2014; MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2008).

A relação entre esses dois parâmetros, expressa pelo índice $DBO_{5,20} \cdot DQO^{-1}$ (também conhecido como Índice de Biodegradabilidade), é uma ferramenta importante para caracterizar a composição do esgoto e avaliar sua biodegradabilidade (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2008). Estudos indicam que essa relação pode variar de acordo com as características do esgoto bruto (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2008; VON SPERLING, 2014), o tipo de tratamento empregado (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2008) e fatores externos, como influências climáticas e industriais (QASAIMEH *et al*., 2020; RUDARU *et al*., 2022). Um índice mais próximo de 1 entre $DBO_{5,20}$ e DQO indica uma maior biodegradabilidade do efluente. Esta condição é essencial para facilitar o monitoramento e otimizar os processos de tratamento, especialmente porque a análise de DQO é mais rápida e acessível do que a de $DBO_{5,20}$ (BUDEIZ e AGUIAR, 2020).

A Agência Reguladora dos Serviços de Saneamento das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (ARES-PCJ) mantém um programa de monitoramento do efluente tratado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) dos municípios fiscalizados. Esse programa tem como objetivo principal avaliar pontualmente a eficiência do tratamento a partir da análise da $DBO_{5,20}$ e DQO nas amostras coletadas in loco, considerando diferentes períodos do ano e condições climáticas.

No contexto desse programa, os dados de $DBO_{5,20}$ e DQO obtidos nas campanhas de monitoramento realizadas em 2024, nos períodos chuvoso e seco, estão sendo utilizados para estudar o Índice de Biodegradabilidade no conjunto de municípios regulados. Essa análise permite caracterizar os efluentes e identificar padrões na eficiência do tratamento das ETEs, fornecendo informações relevantes para o aprimoramento das práticas de saneamento.

OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo realizar um estudo envolvendo os parâmetros DQO e $DBO_{5,20}$ nos afluentes e esgotos tratados das ETEs dos municípios do programa de monitoramento do efluente tratado, utilizando os resultados do monitoramento para avaliar o Índice de Biodegradabilidade e caracterizar os efluentes tratados nas ETEs durante a sazonalidade do ano de 2024.

METODOLOGIA

O estudo utilizou os resultados de Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) obtidos pelo programa de monitoramento do efluente tratado, mantido pela agência reguladora. As análises foram realizadas em duas campanhas distintas: uma durante o período chuvoso e outra no período seco, permitindo a comparação da eficiência do tratamento sob diferentes condições climáticas. Foram analisados um total de 172 laudos laboratoriais, que incluíam resultados dos parâmetros $DBO_{5,20}$ e DQO para coleta pontual de efluente de entrada e saída de 86 ETEs localizadas em 56 municípios. A coleta das amostras, a análise laboratorial e a emissão dos laudos foram realizadas por laboratório acreditado pelo INMETRO, assegurando a qualidade e a confiabilidade dos dados obtidos. A metodologia incluiu a análise da relação entre $DBO_{5,20}$ e DQO tanto para os dados de entrada (esgoto bruto afluente) quanto para os dados de saída (esgoto tratado efluente) das ETEs. Para isso, foram gerados gráficos de dispersão que possibilitaram uma visualização clara da correlação entre os dois parâmetros. A mesma análise foi realizada separadamente para os dados coletados durante o período chuvoso e o período seco, permitindo identificar variações na relação entre $DBO_{5,20}$ e DQO em diferentes contextos. Todos os dados foram submetidos a uma regressão linear, da qual foi possível extrair coeficientes de correlação linear (R^2) que descrevem a relação entre $DBO_{5,20}$ e DQO. A interpretação dessas informações foi realizada utilizando o software Microsoft Excel 365, que facilitou o desenvolvimento matemático dos dados de $DBO_{5,20}$ e DQO, permitindo verificar a presença ou ausência de correlação linear entre os parâmetros. Além da análise da correlação, foram calculadas as porcentagens de remoção dos parâmetros $DBO_{5,20}$ e DQO nas ETEs, bem como as razões entre eles. Esses cálculos forneceram informações adicionais sobre a eficiência do tratamento realizado nas estações monitoradas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no monitoramento de 172 amostras em 86 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) demonstraram a correlação entre os parâmetros $DBO_{5,20}$ e DQO, fundamentais para avaliar a eficiência do tratamento de esgoto e a biodegradabilidade do afluente e efluente.

A figura 1 apresenta um conjunto de doze gráficos do tipo boxplot, representando a distribuição das concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) nas 172 amostras coletadas de 86 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) ao longo do ano de 2024. As amostras foram agrupadas segundo a sazonalidade (períodos chuvoso, seco e total) e segundo a fase do tratamento (afluente e efluente).

Cada boxplot ilustra a distribuição estatística das concentrações observadas, incluindo a mediana (linha central), a média na cor cinza (X), os quartis inferior e superior, e os limites mínimo e máximo dos dados sem outliers. Os outliers foram removidos da apresentação para facilitar a visualização da tendência central e da dispersão dos dados.

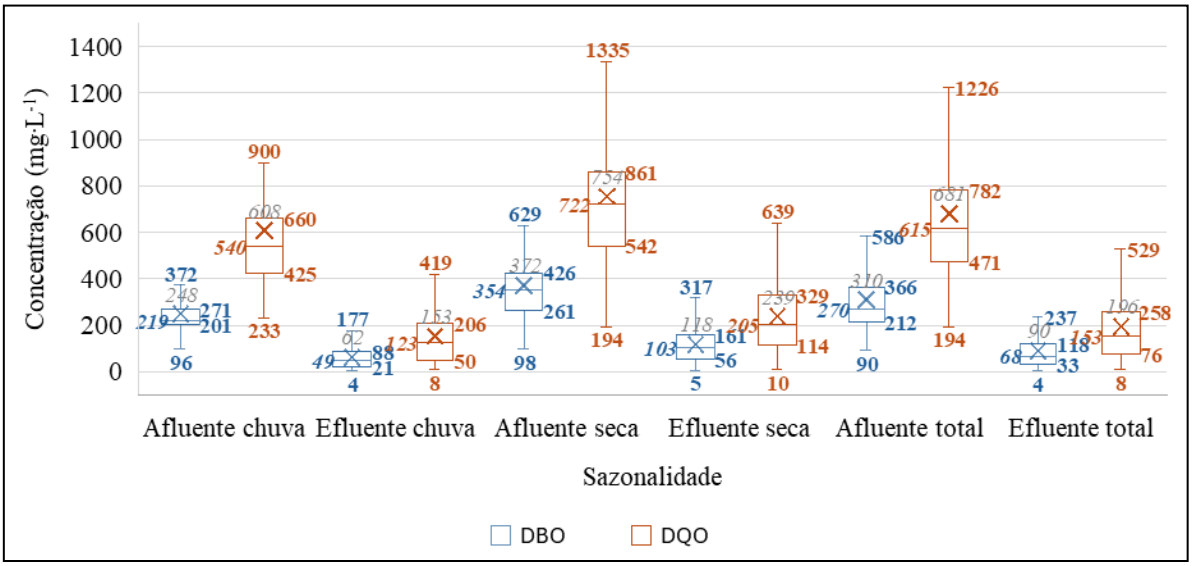

Figura 1: Concentração afluente e efluente de $DBO_{5,20}$ e DQO nas ETEs em 2024 por sazonalidade.
Fonte: Autor.

$DBO_{5,20}$ e DQO nos Afluentes

A média de $DBO_{5,20}$ no esgoto bruto para todo o ano de 2024 foi de 310,0 mg·L^{-1}, com mediana de 269,5 mg·L^{-1} (Figura 1), valores que estão em consonância com a faixa de 250 a 400 mg·L^{-1} para esgoto doméstico descrita por von Sperling (2014). A DQO apresentou média de 680,8 mg·L^{-1} e mediana de 615,0 mg·L^{-1} (Figura 1), também dentro do intervalo de referência do mesmo autor (450–800 mg·L^{-1}). A razão média DQO·$DBO_{5,20}^{-1}$ (Figura 2) foi de 2,24, similar ao índice de biodegradabilidade relatado por Scalize *et al.* (2004), que identificaram razões médias de 2,0 a 2,4 para esgoto doméstico em ETEs de Araraquara, e relatadas por Budeiz e Aguiar (2020), cujas razões médias foram de 2,13 e 2,20, respectivamente para ETEs de Itajubá e Pedralva no sul de MG. Já para o Ministério das Cidades (2008) o valor do índice de biodegradabilidade para o esgoto doméstico bruto pode variar de 1,7 a 2,4.

A análise sazonal revelou que, no período chuvoso, a $DBO_{5,20}$ média foi de 248,5 mg·L^{-1} (Figura 1), inferior ao período seco (371,6 mg·L^{-1}), refletindo diluição maior em épocas de concentração de precipitação. Na Romênia, resultados da influência da sazonalidade na carga orgânica de efluentes foram reportados por Rudaru *et al.* (2022), que destacaram a influência de fatores climáticos na variabilidade dos parâmetros orgânicos. O artigo sugere que as estações secas ou chuvosas podem alterar a carga orgânica e a proporção de material biodegradável no esgoto.

Da mesma forma, no Brasil, conforme destacado por Dantas *et al.* (2022), durante os períodos chuvosos, o aumento do escoamento superficial resulta na diluição dos efluentes, reduzindo temporariamente a concentração de poluentes nas estações de tratamento. Em contraposição, nas estações secas, a menor disponibilidade hídrica reduz o fator de diluição, elevando significativamente a carga poluente dos efluentes lançados. Além disso, a qualidade da água em bacias hidrográficas brasileiras tem demonstrado estar associada tanto à sazonalidade quanto ao uso do solo, sendo mais crítica em áreas sem cobertura adequada de coleta e tratamento de esgoto.

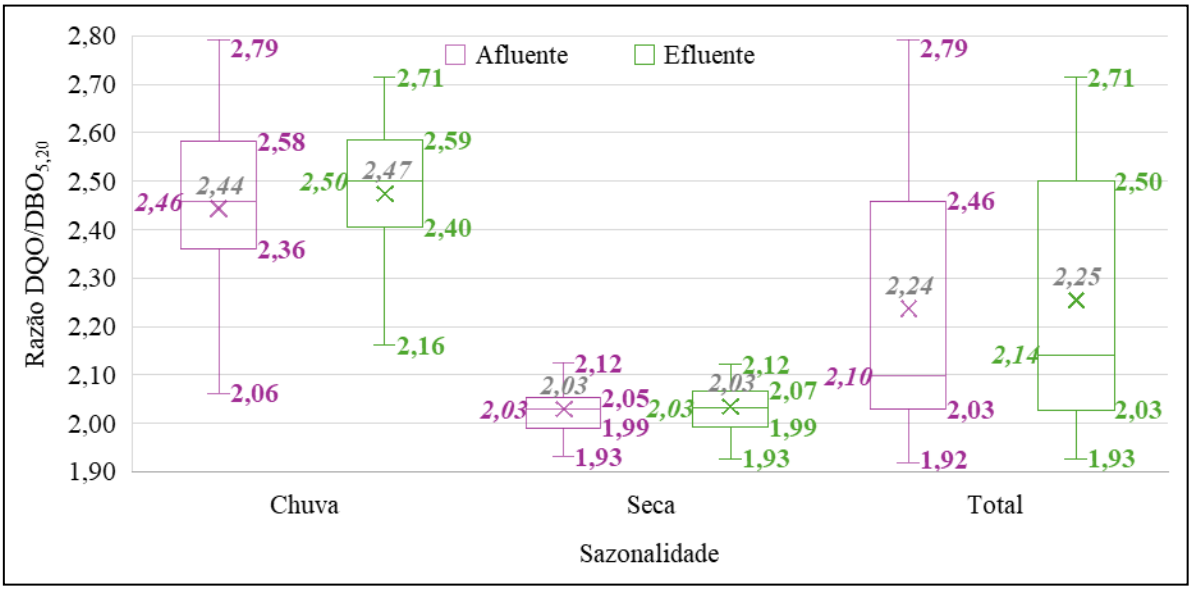

Figura 2: Razão entre DQO/$DBO_{5,20}$ nas ETEs em 2024 por sazonalidade.
Fonte: Autor.

$DBO_{5,20}$ e DQO nos Efluentes Tratados

Nos efluentes tratados, a média de $DBO_{5,20}$ foi de 90,3 mg·L^{-1} (Figura 1), com remoção em conformidade com o Decreto Estadual nº 8468/76 para 89 das 172 amostras. A média de DQO foi de 195,8 mg·L^{-1} (Figura 1), sem limites regulamentares específicos. O índice $DBO_{5,20}$·DQO^{-1} no efluente tratado também foi de 0,45 (Figura 3), inferior à média de 0,53 reportada por Scalize *et al*. (2004) para sistemas de tratamento de Araraquara, SP, e superior aos índices de biodegradabilidade médios de 0,34 e 0,15 descritos por Budeiz e Aguiar (2020) para ETEs de Itajubá e Pedralva no sul de MG, respectivamente. Já a correlação DQO·$DBO_{5,20}^{-1}$ apresentou uma média de 2,25 nas 172 amostras analisadas (Figura 2), valor inferior ao índice típico de 2,5 a 5,0 geralmente observado para esgoto doméstico tratado, conforme o Ministério das Cidades (2008).

A sazonalidade também influenciou a eficiência de remoção de carga orgânica nas ETEs monitoradas. No período chuvoso, 65% das amostras atenderam aos limites para $DBO_{5,20}$, enquanto no período seco, apenas 38% apresentaram conformidade. Este comportamento reflete a capacidade limitada de alguns sistemas em lidar com maior carga orgânica em períodos de menor diluição. De acordo com Qasaimeh *et al*. (2020), o aumento do fluxo e da diluição nas estações de tratamento pode comprometer a eficiência dos processos biológicos. Os autores destacam que microrganismos presentes em sistemas de lodos ativados podem apresentar dificuldades de adaptação frente a variações abruptas na carga orgânica, o que pode resultar na diminuição do desempenho do tratamento.

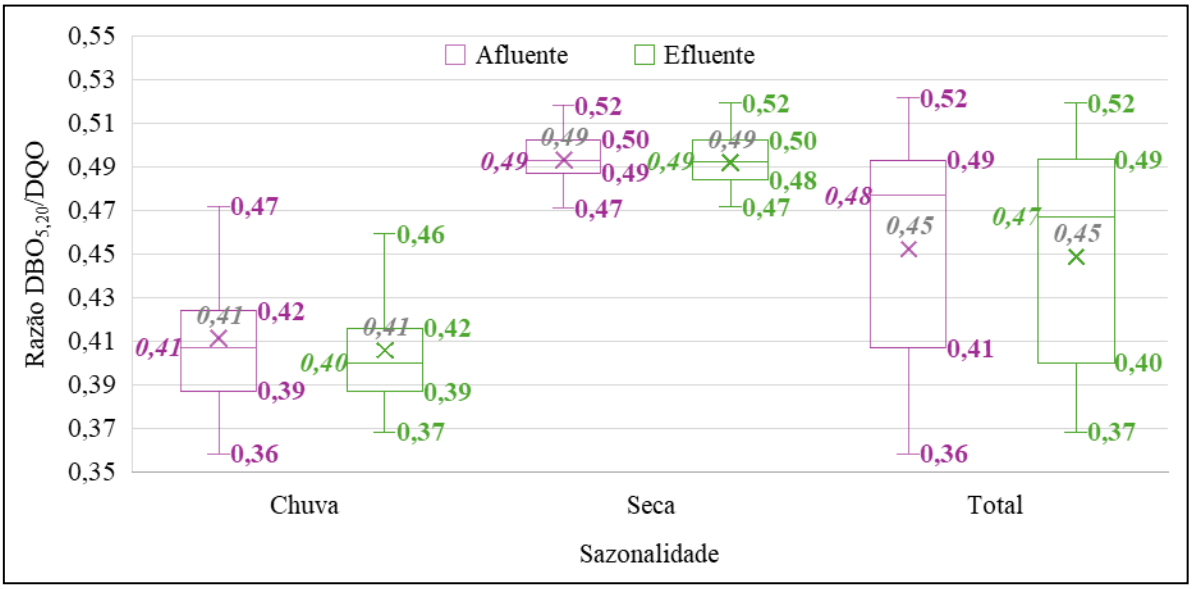

Figura 3: Razão entre $DBO_{5,20}$/DQO nas ETEs em 2024 por sazonalidade.
Fonte: Autor.

Correlação e Índice de Biodegradabilidade

Os coeficientes de correlação linear (R^2) encontrados para os 172 conjuntos de dados mostraram uma forte relação entre $DBO_{5,20}$ e DQO tanto para afluentes, que obteve R^2 = 0,9671 (Figura 4), quanto para efluentes que obteve R^2 = 0,9805 (Figura 5). Esses valores são consistentes com os relatados por Qasaimeh *et al*. (2020), que obtiveram R^2 de 0,96 para efluentes tratados em sistemas de lodo ativado e filtração terciária.

Os índices $DBO_{5,20} \cdot DQO^{-1}$ variaram de 0,36 a 0,52 nos afluentes e efluentes (Figura 3), confirmando a predominância de esgoto doméstico biodegradável na maioria das amostras, de acordo com os critérios de Rudaru *et al*. (2022), que consideram biodegradável um índice acima de 0,35.

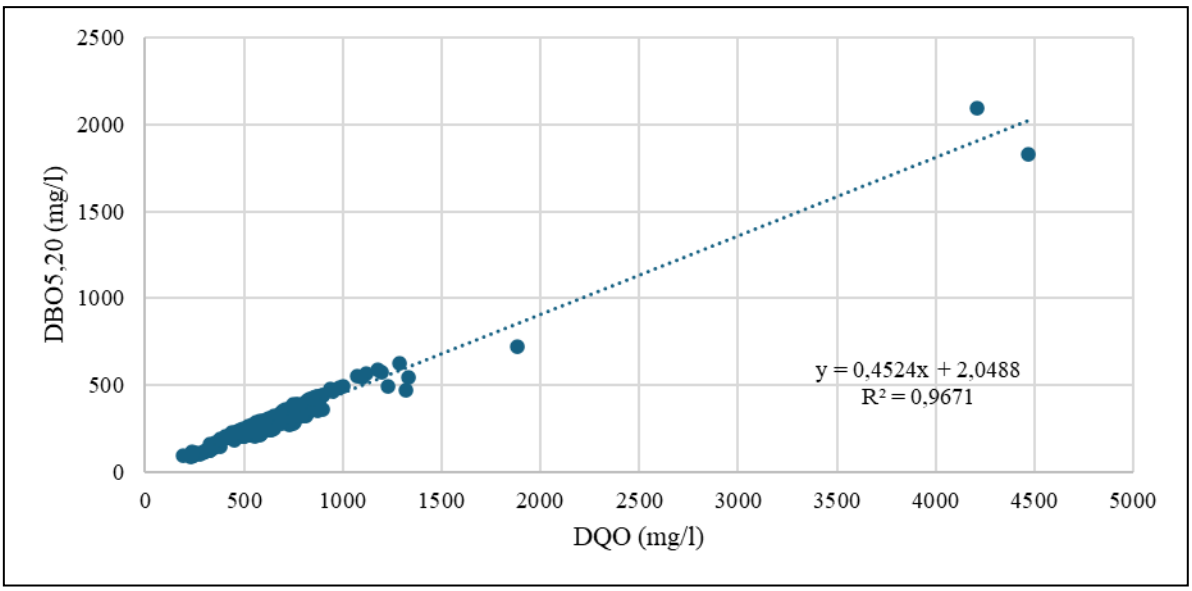

Figura 4: Gráfico de dispersão, linha de regressão linear e correlação linear (R^2) dos valores de DQO-$DBO_{5,20}$ registrados para esgoto afluente (bruto) coletados das ETEs.
Fonte: Autor.

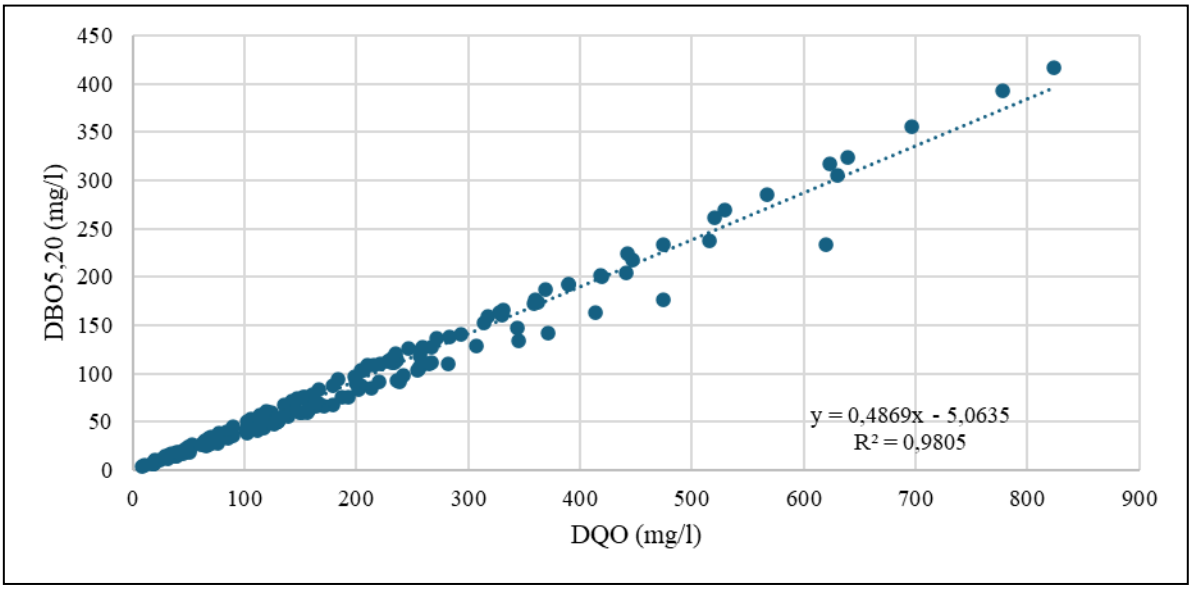

Figura 5: Gráfico de dispersão, linha de regressão linear e correlação linear (R^2) dos valores de DQO-$DBO_{5,20}$ registrados para esgoto efluente (tratado) coletados das ETEs.
Fonte: Autor.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste estudo confirmam a forte correlação entre os parâmetros $DBO_{5,20}$ e DQO no monitoramento de efluentes brutos e tratados das ETEs avaliadas, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,96 em todas as análises. Essa relação sólida valida o uso da DQO como uma métrica rápida e eficiente para estimar a $DBO_{5,20}$, otimizando o controle operacional das estações de tratamento. O índice de biodegradabilidade ($DBO_{5,20} \cdot DQO^{-1}$ e $DQO \cdot DBO_{5,20}^{-1}$) observados nas amostras também evidenciou a predominância de esgoto doméstico nos sistemas monitorados, com valores médios dentro dos padrões reportados na literatura.

A sazonalidade demonstrou impacto significativo na eficiência do tratamento. No período chuvoso, houve maior diluição do esgoto bruto, resultando em menores concentrações de $DBO_{5,20}$ e DQO, enquanto no período seco foi observada maior concentração de carga orgânica e menor conformidade com os limites regulamentares, especialmente em efluentes tratados. Esses achados destacam a necessidade de ajustes operacionais em períodos de maior carga orgânica para garantir a eficiência do tratamento e a conformidade legal.

Como recomendações, sugere-se aos prestadores aprimorar a operação em períodos secos, adotando medidas para otimizar a capacidade de tratamento durante o período de estiagem, como ajustes no tempo de retenção hidráulica e operações unitárias do tratamento.

O investimento na infraestrutura também deve ser alvo de ações por parte dos prestadores, que devem reforçar os sistemas de coleta e tratamento para minimizar o impacto da sazonalidade na eficiência do tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUDEIZ, V.; AGUIAR, A. Monitoramento e relacionamento dos parâmetros DQO e DBO5 em afluente e esgoto tratado das cidades de Itajubá e Pedralva, MG. *Periódico Tchê Química*, v.17, n. 34, 2020, p. 80-92.

DANTAS, M. S.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; CHRISTOFARO, C.; OLIVEIRA, S. C. Effect of 45 full-scale WWTPs on tropical receiving water bodies in Brazil by partial least squares-discriminant analysis. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 12, n. 7, 2022, p. 529-541.

MINISTÉRIO DAS CIDADES (2008). *Processos de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento: nível 2*. Brasília: Ministério das Cidades, 2008. 118 p.

QASAIMEH, A.; AL-GHAZAWI, Z. Regression modeling for rapid prediction of wastewater BOD5. *Desalination and Water Treatment*, 2020, v. 201, p. 165-172.

RUDARU, D. G.; LUCACIU, I. E.; FULGHECI, A. M. Correlation between BOD5 and COD – biodegradability indicator of wastewater. *Romanian Journal of Ecology & Environmental Chemistry*, v. 4, n. 2, 2022, p. 80-86.

SCALIZE, P. S., LEITE, W. C. A., RODRIGUES, J. M., CORREA, M. S., VENUZO, S. B., LOMBARDI, R., OLIVEIRA, S. C., SANTOS, M. F. Correlação entre os valores de DBO e DQO no afluente e efluente de duas ETE's da cidade de Araraquara. In: *VIII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, 2004, Caxias do Sul - RS*. 34a. Assembleia Nacional da ASSEMAE, 2004, p. 1-13.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.* 4 a ed. UFMG: Belo Horizonte, 2014, 452 p.