

Evaluación de la DBO y la DQO como Indicadores de Eficiencia en el Tratamiento de Aguas Residuales de la PTAR Juan Díaz y su Relación con la Generación Potencial de Gases de Efecto Invernadero (2020–2024)

Cano, Liz

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá

<https://orcid.org/0009-0009-2070-5554>

Domínguez, Viccelda

Universidad de Panamá
Ciudad, País

<https://orcid.org/0000-0002-6201-004X>

Abstract

The Juan Díaz Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in Panama City, is the largest facility of its kind in the country and a key component of the national urban sanitation system. This study analyzed operational data from 2020–2024 to evaluate the efficiency of organic matter removal and its potential relationship with greenhouse gas (GHG) generation. The assessment focused on biochemical oxygen demand (BOD₅) and chemical oxygen demand (COD) across three critical stages of the treatment process: raw influent, biological treatment, and final effluent.

Results showed that the raw influent exhibited an average BOD₅ concentration of 141.4 mg O₂/L, with peak values up to 864,5 mg O₂/L, indicating a high and variable organic load. The treated effluent presented an average BOD₅ concentration of 9,4 mg O₂/L and a maximum of 118,4 mg O₂/L, corresponding to an average removal efficiency of 93,4%.

However, elevated BOD₅ values were observed in the final effluent on certain days, likely associated with hydraulic overloads, aeration limitations, or insufficient retention times. The persistence of organic matter in the treated effluent suggests a potential risk of GHG emissions, primarily methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). These findings highlight the need to strengthen operational control and incorporate CH₄ and N₂O monitoring to improve national GHG inventories and support climate mitigation strategies in Panama.

Keywords: BOD₅, COD, wastewater, efficiency, greenhouse gases.

Resumen

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Juan Díaz, ubicada en la ciudad de Panamá, es la instalación más grande de su tipo en el país y un componente clave del sistema nacional de saneamiento urbano. Este estudio analizó los datos operativos del período 2020–2024 para evaluar la eficiencia en la remoción de materia orgánica y su posible relación con la generación de gases de efecto invernadero (GEI). La evaluación se centró en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) en tres etapas críticas: afluente crudo, tratamiento biológico y efluente final.

Los resultados mostraron que el afluente crudo presentó una concentración promedio de DBO₅ de 141,4 mg O₂/L, con valores máximos de hasta 864,5 mg O₂/L, lo que evidencia una alta y variable carga orgánica. El efluente tratado mostró un promedio de 9,4 mg O₂/L y un máximo de 118,4 mg O₂/L, lo que representa una eficiencia de reducción promedio del 93,4%.

Sin embargo, en algunos días se observaron valores elevados de DBO₅ en el efluente final, posiblemente asociados a sobrecargas hidráulicas, fallas de aireación o tiempos de retención insuficientes. La persistencia de materia orgánica en el efluente tratado sugiere un riesgo potencial de emisión de GEI, principalmente metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Estos hallazgos destacan la necesidad de mejorar el control operativo e incorporar el monitoreo de CH₄ y N₂O para fortalecer los inventarios nacionales de GEI y apoyar estrategias de mitigación acordes con los compromisos climáticos de Panamá.

Palabras claves: DBO₅, DQO, aguas residuales, eficiencia, gases de efecto invernadero.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión adecuada de las aguas residuales urbanas es esencial para reducir los impactos ambientales y climáticos asociados a la descarga de materia orgánica y al potencial de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivados del tratamiento de aguas [1], [2]. A nivel global, las plantas de tratamiento han sido identificadas como fuentes relevantes de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), debido a los procesos biológicos asociados a la degradación de materia orgánica [3]–[5]. Estas emisiones pueden incrementarse en sistemas con cargas orgánicas variables, limitaciones de oxígeno o deficiencias en la operación [6], [7].

En Panamá, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Juan Díaz constituye la instalación más importante del sistema de saneamiento y desempeña un papel central en la depuración del efluente urbano metropolitano. Entre los parámetros fundamentales para evaluar su eficiencia se encuentran la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la

Demanda Química de Oxígeno (DQO), indicadores ampliamente utilizados para caracterizar la fracción biodegradable y la materia orgánica total oxidable presente en el afluente [8], [9]. Su evolución permite detectar fluctuaciones operativas, sobrecargas hidráulicas y variaciones en la composición del agua residual que pueden comprometer la estabilidad de los procesos biológicos [10].

Además de su relevancia como indicadores de calidad del agua, la DBO₅ y la DQO se reconocen como predictores indirectos del potencial de generación de GEI, ya que la materia orgánica removida se transforma parcialmente en CH₄ bajo condiciones anaerobias, y en N₂O durante rutas de nitrificación–desnitrificación [3], [5]. Estudios recientes han demostrado que mayores cargas orgánicas tratadas se asocian con incrementos en la producción de biogás, mientras que variaciones en la operación pueden influir en las emisiones fugitivas de CH₄ y N₂O en plantas de tratamiento a escala real [6].

Investigaciones internacionales también resaltan la importancia de comprender la formación de N₂O y sus rutas bioquímicas para mejorar la eficiencia del tratamiento y reducir las emisiones asociadas al sector saneamiento [7]. En este contexto, evaluar la DBO₅ y la DQO no solo permite caracterizar el comportamiento del afluente y del proceso biológico, sino también inferir el potencial de emisiones derivadas del tratamiento.

Considerando estos aspectos, el presente estudio analiza los datos operativos de la PTAR Juan Díaz entre 2020 y 2024 para evaluar la evolución de la DBO₅ y la DQO en distintas etapas del proceso, determinar la eficiencia de remoción y explorar su relación con el potencial de generación de GEI. Este enfoque aporta información clave para fortalecer la gestión operativa del sistema de saneamiento y contribuir a estrategias nacionales de mitigación climática.

2. MÉTODO

A. Adquisición y preparación de los datos

Los datos operativos correspondientes a los parámetros DBO₅, DQO, caudal, producción de biogás y consumo eléctrico fueron proporcionados por el personal técnico de la PTAR Juan Díaz para el periodo 2020–2024. Posteriormente, se realizó una depuración inicial para identificar valores faltantes, errores de digitación y posibles atípicos asociados a eventos operativos o condiciones ambientales. Una vez validada la consistencia de la base de datos, se procedió a organizar las series temporales por año y por etapa del proceso (afluente crudo, tratamiento biológico y efluente final) [10]. Debido a que durante 2020–2021 la PTAR Juan Díaz operó únicamente con el Módulo 1 y presentó limitaciones en la generación y continuidad de registros, el análisis se centró en el periodo 2022–2024, correspondiente a la fase de operación más estable y con series de datos completas proporcionadas por el personal técnico de la planta.

B. Cálculo de carga orgánica y eficiencia de remoción

Para evaluar la magnitud real de la materia orgánica tratada, se calculó la carga diaria de DBO₅ y DQO utilizando las concentraciones reportadas y el caudal correspondiente. La carga orgánica se expresó en kg/día, lo que permitió normalizar las variaciones del flujo y obtener indicadores más robustos del desempeño operativo [7].

La eficiencia de remoción se estimó por dos enfoques:

- Por concentración: se compararon los valores de entrada y salida en cada etapa del proceso.
- Por carga: se aplicó un balance de masa diario, determinando la diferencia entre la carga afluente y la carga del efluente tratado.

C. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos, generación de series temporales y correlaciones se realizaron en Minitab. Se aplicaron estadísticos descriptivos como media, mediana, cuartiles y rango intercuartílico para caracterizar el comportamiento anual de los parámetros. Se emplearon gráficos de caja para identificar valores atípicos, así como series temporales para evaluar tendencias de eficiencia y fluctuaciones operativas.

Adicionalmente, se realizaron correlaciones lineales entre remoción de DBO₅, eficiencia porcentual, biogás y consumo eléctrico. Estas correlaciones permitieron explorar la relación entre la carga orgánica procesada, el desempeño del tratamiento y el potencial de generación de gases durante los procesos biológicos.

D. Interpretación operativa y ambiental

Los resultados del análisis estadístico se interpretaron considerando las condiciones de operación de la planta, la variabilidad del afluente y la capacidad de los reactores biológicos. Se integraron los patrones observados con la generación de biogás como indicador indirecto del potencial de emisiones, con el fin de establecer conexiones entre eficiencia de remoción, carga orgánica tratada y desempeño ambiental.

3. RESULTADOS

A. Eficiencia de remoción de DBO₅ y DQO

El análisis de los datos operativos de la PTAR Juan Díaz (2022–2024) mostró que la DBO₅ y la DQO son indicadores robustos y consistentes del desempeño del tratamiento. Las eficiencias se mantuvieron superiores al 90 %, con medianas cercanas al 95 % y rangos intercuartílicos

reducidos, lo que refleja un proceso estable y capaz de responder a variaciones en la carga afluente (Fig. 1).

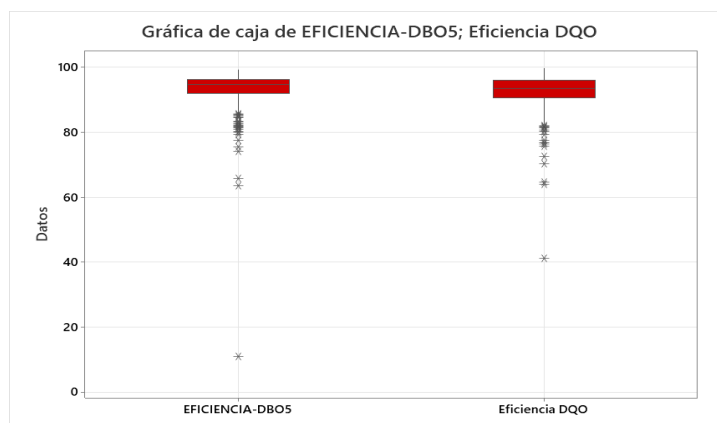


Fig. 1 Distribución de la eficiencia de DBO_5 y DQO durante el periodo evaluado

B. Variación temporal de la eficiencia

Las series temporales evidenciaron un comportamiento mayormente estable, con descensos puntuales asociados a sobrecargas hidráulicas o variaciones operativas, seguidos de una recuperación rápida, lo que demuestra la resiliencia del sistema biológico (Fig. 2).

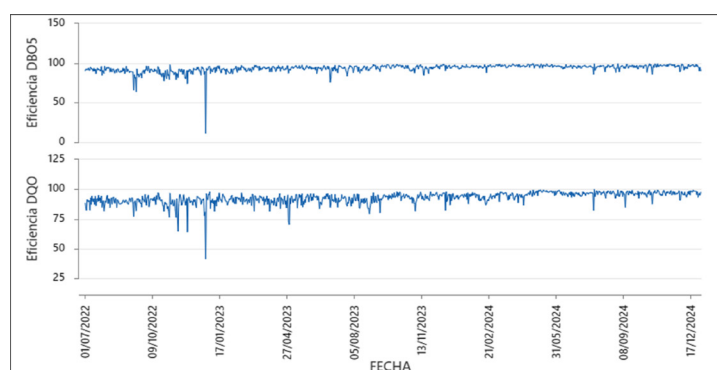


Fig. 2 Serie temporal de la eficiencia de remoción de DBO_5 y DQO entre 2020 y 2024

C. Correlaciones entre carga orgánica, eficiencia y biogás

El análisis de correlaciones mostró que la remoción en carga de DBO_5 fue la variable más asociada a la producción de biogás, indicando que mayores cargas removidas impulsan una mayor generación de gases durante el tratamiento (Fig. 3). Por el contrario, la eficiencia porcentual de DBO_5 presentó una correlación negativa débil con el biogás, coherente con la menor disponibilidad de sustrato biodegradable cuando la remoción es más alta. La relación entre remoción de carga y consumo eléctrico fue mínima, lo que sugiere que la demanda

energética depende principalmente de las condiciones de operación de los sistemas de aireación y no del nivel de carga tratada.

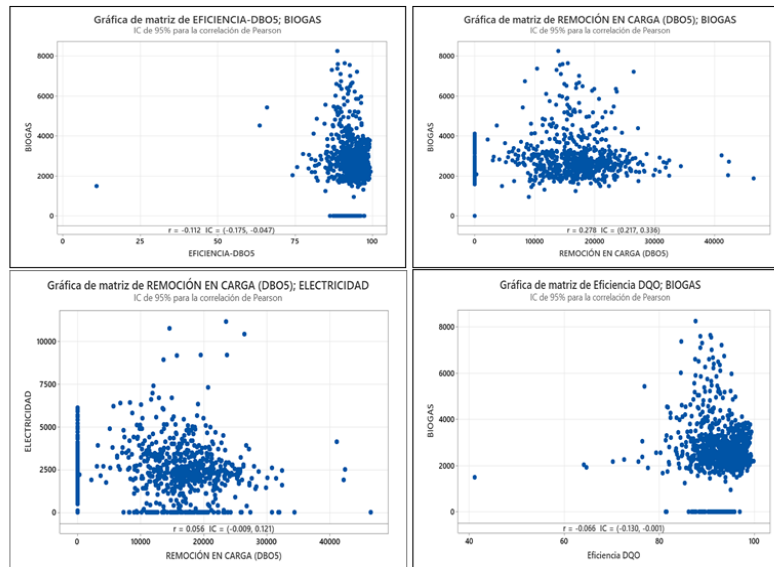


Fig. 3 Matriz de correlaciones entre eficiencia, remoción en carga, biogás y consumo eléctrico en la PTAR Juan Díaz.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los datos operativos de la PTAR Juan Díaz (2022–2024) evidenció que la DBO₅ y la DQO son indicadores robustos y consistentes para evaluar la eficiencia del tratamiento. Las eficiencias superiores al 90 %, junto con los rangos intercuartílicos estrechos observados en los diagramas de caja y series temporales, confirman un desempeño estable aun ante variaciones en la carga afluente.

La disminución progresiva de la carga orgánica tratada, acompañada de un incremento en la eficiencia porcentual, indica que la planta ha operado bajo condiciones más favorables y ha mejorado su capacidad de remoción, sin evidenciar pérdidas de rendimiento.

Las correlaciones muestran que la remoción en carga de DBO₅ es la variable que mejor explica la producción de biogás, confirmando su importancia como indicador del potencial de generación de GEI. En contraste, la eficiencia porcentual de DBO₅ presentó una correlación negativa débil con el biogás, coherente con la menor disponibilidad de sustrato biodegradable cuando la eficiencia es mayor.

En conjunto, los resultados confirman que mejorar la remoción de DBO₅ y DQO no solo asegura la calidad del efluente, sino que influye directamente en la producción de biogás y en el potencial de emisiones asociadas. Estos parámetros deben mantenerse como base para futuras evaluaciones de desempeño, estimaciones de GEI y estrategias de mitigación en el

sector saneamiento. Los hallazgos constituyen además un insumo relevante para optimizar la gestión operativa y fortalecer los inventarios nacionales de GEI en el ámbito del agua en Panamá.

REFERENCIAS

- [1] X. Li, J. Xu, D. Wang, J. Chen, and Y. Li, "Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment plants: A global meta-analysis," *Water Research*, vol. 238, p. 119885, 2023. [Consultado: 15 de mayo de 2025].
- [2] E. A. Ávalos-Martínez and E. Del Ángel-Meraz, "Estimación de gases de efecto invernadero generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas en Tabasco, México," *Región y Sociedad*, vol. 35, e1712, 2023. [Consultado: 18 de mayo de 2025]
- [3] M. J. Kampschreur, et al., "Nitrous oxide emission during wastewater treatment," *Water Research*, vol. 43, pp. 4093–4103, 2009. [Consultado: 18 de mayo de 2025].
- [4] Y. Liu, et al., "Greenhouse gas emissions from wastewater treatment processes: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 807, p. 150–167, 2022. [Consultado: 25 de mayo de 2025].
- [5] APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed., 2017. [Consultado: 18 de mayo de 2025].
- [6] C. Sawyer, P. McCarty, and G. Parkin, *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. [Consultado: 20 de mayo de 2025].
- [7] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2014. [Consultado: 2 de junio de 2025].
- [8] J. H. Ahn, et al., "Nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants," *Water Research*, vol. 44, pp. 4503–4513, 2010. [Consultado: 2 de junio de 2025].
- [9] M. Han, et al., "Mechanisms of N₂O formation in biological nitrogen removal systems," *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 17, pp. 7551–7559, 2011. [Consultado: 2 de junio de 2025].
- [10] M. R. Daelman, et al., "Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment," *Water Research*, vol. 87, pp. 293–303, 2015. [Consultado: 2 de junio de 2025].

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.