

Diagnóstico de la contaminación en afluentes del río Atoyac en Puebla y Tlaxcala: Un enfoque estadístico para su gestión

M. Chavez Portillo¹, T. Martinez Ramos², Y. Panecat Bernal³ y M. A Vicencio Garrido⁴

¹Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio s/n, Ciudad Universitaria, Puebla, 72570, México, melissa.chavez@metropoli.edu.mx

²Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla, Ingeniería en Biotecnología, Popocatepetl s/n, Reserva Territorial Atlixayotl, Tres Cerritos, C.P.72320 Puebla, Pue., México, tania.martinez@metropoli.edu.mx.

³Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad Nacional S/N, Bosques de Aragón, Cdad. Nezahualcóyotl, C.P. 57171, México.
yesmin.pb@personal.uttecama.edu.mx

⁴ Instituto Tecnológico de Apizaco. División de Estudios de Posgrado e Investigación. San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, C.P. 90491, México, marco.vicencio@puebla.tecnm.mx.

Resumen

El presente trabajo analiza la calidad del agua en diversos puntos de los afluentes del río Atoyac, situado en los estados de Puebla y Tlaxcala (México). Para ello, se monitorearon parámetros clave: Coliformes Fecales (C.F.), Sólidos Suspendidos (S.S.), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), durante el periodo 2017–2022 en seis localidades (San Martín Texmelucan, San Matías Tlalancateca, Nativitas, San Jacinto, Cuautlancingo y Puebla). Se aplicó la correlación estadística entre las variables, así como el control de calidad mediante límites de control superior (LCS), límites de control inferior (LCI) y valores promedio. Los resultados muestran concentraciones elevadas de DBO₅ (200–600 mg/L) y DQO (200–1000 mg/L), valores muy superiores a los típicos de cuerpos de agua superficiales no contaminados, así como correlaciones positivas muy fuertes entre DBO₅ y DQO ($r > 0.98$). A nivel normativo, los parámetros exceden con frecuencia o se acercan a los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, lo que enfatiza la necesidad de fortalecer la vigilancia y el cumplimiento en el manejo de descargas residuales. De igual forma, se recomienda la instalación o mejora de plantas de tratamiento con procesos biológicos y terciarios (desinfección), especialmente en puntos donde se concentran mayores descargas y se observan incrementos reiterados de materias orgánicas y patógenos.

Palabras clave— Río Atoyac, Agua residual, Contaminación de agua, DBO₅, DQO.

Diagnosis of pollution in tributaries of the Atoyac River in Puebla and Tlaxcala: A statistical approach to its management

Abstract

The present work analyzes the water quality at various points along the tributaries of the Atoyac River, located in the states of Puebla and Tlaxcala, Mexico. For this purpose, key parameters were monitored: Fecal Coliforms (F.C.), Suspended Solids (S.S.), Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), and Chemical Oxygen Demand (COD), during the period 2017–2022 in six localities (San Martín Texmelucan, San Matías Tlalancateca, Nativitas, San Jacinto, Cuautlancingo, and Puebla). Statistical correlation among the variables was applied, as well as quality control through upper control limits (UCL), lower control limits (LCL), and average values. The results show high concentrations of BOD₅ (200–600 mg/L) and COD (200–1000 mg/L), values much higher than those typically found in unpolluted surface water bodies, as well as very strong positive correlations between BOD₅ and COD ($r > 0.98$). At the regulatory level, the parameters frequently exceed or approach the limits established in NOM-001-SEMARNAT-2021, which emphasizes the need to strengthen monitoring and compliance in the management of wastewater discharges. Likewise, the installation or improvement of treatment plants with biological and tertiary processes (disinfection) is recommended, especially at points where the highest discharges are concentrated and repeated increases in organic matter and pathogens are observed.

Keywords—Atoyac River, Wastewater, DBO₅, DQO.

I. INTRODUCCIÓN

Diversos estudios han documentado que el río Atoyac presenta críticos de contaminación orgánica, microbiológica y química, particularmente en el tramo Puebla-Tlaxcala.

El segmento de mayor riesgo se localiza en la frontera entre Puebla y Tlaxcala, donde confluyen descargas ilegales de

residuos municipales e industriales de ambas entidades [1].

Para los habitantes de esta zona densamente poblada, la exposición a estos contaminantes se ha convertido en una amenaza cotidiana. Las sustancias tóxicas detectadas en concentraciones comparables a venenos no solo degradan los cuerpos de agua (Atoyac, Xochiac, Alseseca), sino que también se volatilizan, contaminando el aire y creando una crisis ambiental bifronte. Se ha documentado en la zona metropolitana de Puebla un patrón epidemiológico vinculado a

esta exposición crónica: mayor incidencia de cáncer de pulmón, vejiga, piel y leucemia linfoblástica, mientras que en Tlaxcala destaca la insuficiencia renal como causa principal de mortalidad [2].

Si bien los esfuerzos de control han reducido la contaminación de fuentes convencionales, emergen nuevos desafíos. Las emisiones accidentales en cuerpos de agua cuyos efectos agudos y crónicos son crecientemente preocupantes han aumentado drásticamente, comprometiendo ecosistemas y abastecimientos [3,4].

La presencia de contaminantes orgánicos persistentes en sedimentos y cuerpos de agua ha sido reportada en sistemas fluviales similares [5,6]. Este problema se agrava por factores estructurales: industrialización desregulada, ubicación de fábricas priorizando rentabilidad sobre criterios ambientales, sobreexplotación de sistemas de tratamiento y manejo inadecuado de químicos [7].

II. METODOLOGÍA

El presente estudio se basó en datos de calidad del agua publicados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para cada localidad y cada año del periodo 2017–2022, se utilizó el valor promedio anual reportado en la base de datos RENAMECA, resultando en un tamaño de muestra de $n = 6$ observaciones por variable y por sitio.

No se realizaron muestreos directos ni mediciones experimentales. Cabe destacar que, al momento de este análisis, no se disponía de datos validados para el periodo 2023–2025.

Los puntos de monitoreo se ubicaron en seis localidades de la cuenca del río Atoyac: San Martín Texmelucan, San Matías Tlalcatepec, Nativitas, San Jacinto, Cuautlancingo y Puebla. Estas localidades corresponden a afluentes y tramos estratégicos del sistema Atoyac, seleccionados por su historial de contaminación y presión antrópica documentada por CONAGUA.

Para los datos de DBO_5 el límite de control superior (LCS) se estableció en 1000 mg/L, mientras que para DQO el límite el LCS correspondió a 1812 mg/L, calculados a partir de la media y desviación estándar de cada conjunto de datos, utilizando el criterio $\pm 3\sigma$.

Para evaluar la relación estadística entre los parámetros de calidad del agua DBO_5 , DQO, coliformes fecales y sólidos suspendidos, se construyen matrices de correlación utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (r), dado que los datos corresponden a variables cuantitativas continuas y se analizaron relaciones lineales entre ellas.

Las matrices de correlación se calcularon a partir de los valores anuales registrados para cada localidad durante el periodo 2017–2022, considerando el conjunto completo de observaciones disponibles por variable. El coeficiente de

correlación de Pearson se determinó conforme la siguiente expresión:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (1)$$

Donde x_i y y_i representan los valores observados de cada par de variables $(\bar{x}, \bar{y})$ y sus respectivas medias.

Los coeficientes obtenidos toman valores en el intervalo $[-1, +1]$, donde los valores cercanos a +1 indican una correlación positiva fuerte, valores cercanos a -1 una correlación negativa fuerte y valores cercanos a 0 una correlación débil. Las matrices se representaron gráficamente mediante mapas de color facilitar la visualización de la intensidad de las relaciones entre variables.

III. RESULTADOS

A Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)

Durante el periodo 2017–2022 los valores de DBO_5 , en las seis localidades se ubicaron mayoritariamente entre 200 y 600 mg/L. La Fig. 1 muestra que ninguna localidad superó el límite de control superior (LCS=1000mg/L); sin embargo, se observaron fluctuaciones interanuales relevantes, particularmente en Nativitas y Puebla, con valores cercanos a 500–600 mg/L.

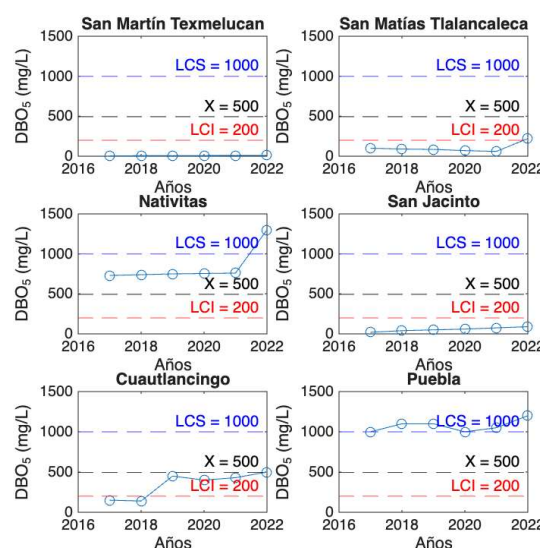


Fig. 1 Variación espacial y temporal de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

B Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los valores de DQO se distribuyeron principalmente en el intervalo de 200 a 1000 mg/L durante el periodo de estudio como se observa en la Fig. 2, los datos permanecieron por debajo del LCS previamente definido (1812 mg/L), aunque se registraron variaciones temporales sin una tendencia creciente o decreciente clara.

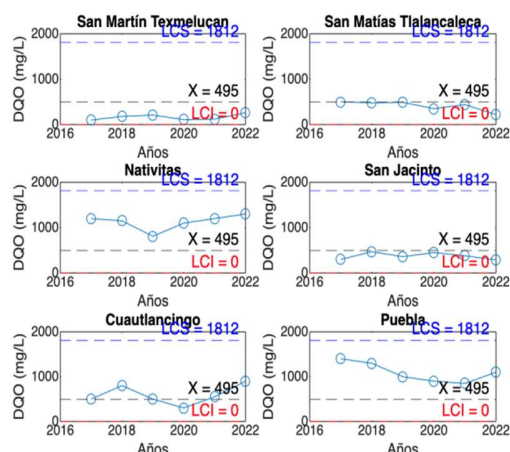
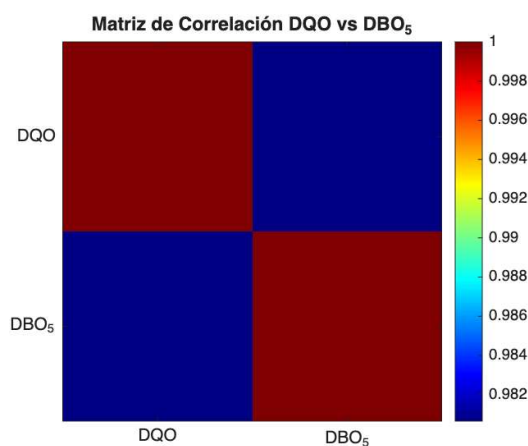


Fig. 2 Variación espacial y temporal de la Demanda Química de Oxígeno

C Matrices de Correlación DBO₅ y DQO

La matriz de correlación entre DBO₅ y DQO (Fig. 3) muestra una correlación positiva sólida, con coeficientes de Pearson en el intervalo $r=0.98-0.99$.

Fig. 3 Matriz de correlación DQO y DBO₅

D Coliformes Fecales

Las concentraciones de coliformes fecales se mantuvieron en torno a un valor medio aproximado de 2000 NMP/100 mL en la mayoría de las localidades, sin rebasar el LCS de 5500 NMP/100mL (Fig. 4)

E Sólidos Suspensos

En el periodo 2017-2019 los sólidos suspendidos presentaron valores inferiores a 200 mg/L en la mayoría de las localidades. A partir de 2020 se observaron picos que alcanzaron valores de 500-1000 mg/L en sitios específicos (Fig. 5)

F Matriz de Correlación de Concentración de Coliformes Fecales y Sólidos Suspensos

En la Fig. 6 se muestra la matriz de correlación entre los datos coliformes fecales y sólidos disueltos. Los datos R(1,2) y R(2,1) muestran la correlación entre C.F. y S.S. (valores cercanos a +1 significan fuerte correlación positiva; valores cercanos a -1 indican fuerte correlación negativa; valores cercanos a 0 indican correlación débil).

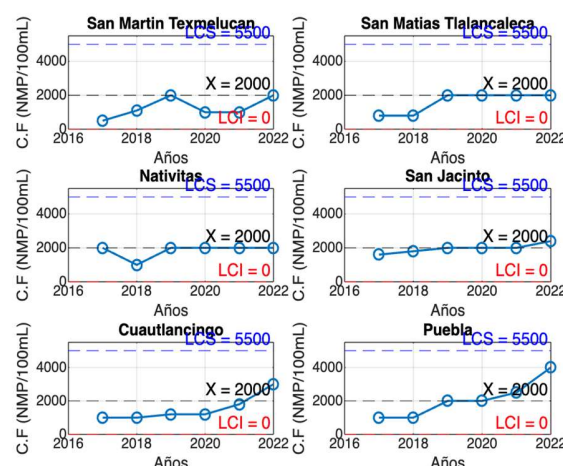


Fig. 4 Variación espacial y temporal de la concentración de coliformes fecales.

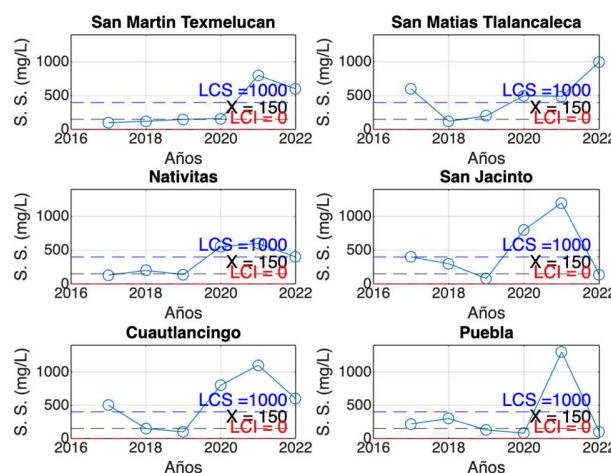


Fig. 5 Variación espacial y temporal de la concentración de sólidos suspendidos.

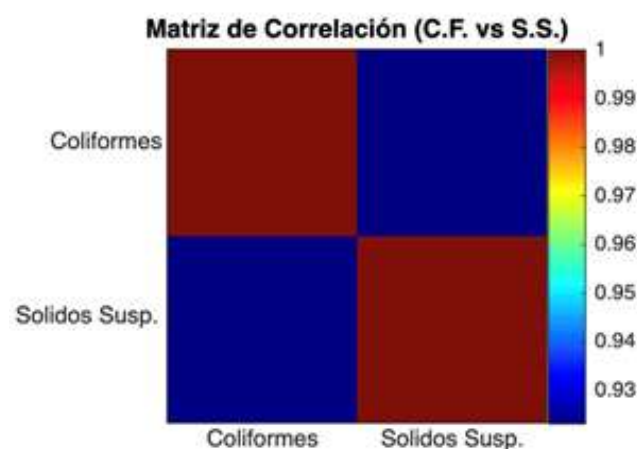


Fig. 6 Matriz de correlación de concentración de coliformes fecales y sólidos suspendidos

G Matriz de Correlaciones DBO₅, DQO, C.F, S.S

En la Fig. 7 se muestra la Matriz de correlación entre la concentración de coliformes fecales, sólidos suspendidos, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demandas Química de oxígeno. A partir de la matriz de correlación entre la concentración de Coliformes fecales, Sólidos Suspendidos, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno, se determinó que las celdas fuera de la diagonal presentan valores muy próximos a 1 (colores que van del amarillo al rojo, según la escala ~0.98–1).

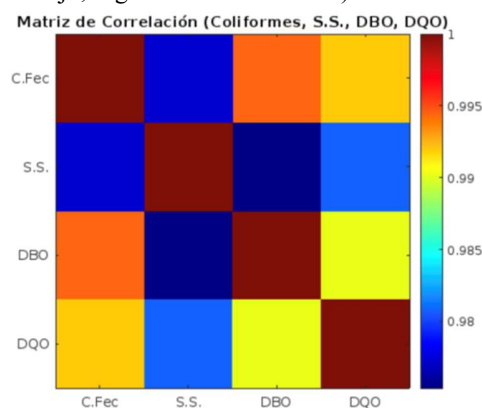


Fig. 7 Matriz de correlación entre DBO₅, DQO, coliformes fecales y sólidos suspendidos..

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A Análisis de DBO₅ y DQO

Diversos estudios han empleado la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como indicadores clave para evaluar la contaminación orgánica en cuerpos de agua superficiales, debido a su capacidad para reflejar la carga de materia orgánica biodegradable y oxidizable presente en el sistema. Investigaciones realizadas en ríos urbanos e industriales han reportado concentraciones elevadas de DBO₅ y DQO asociadas a descargas municipales e industriales, así como una fuerte correlación entre ambos parámetros, lo que indica fuentes comunes de contaminación orgánica [8–10].

En el contexto de la cuenca del río Atoyac, algunos trabajos previos han documentado la presencia de contaminación orgánica y microbiológica a partir de mediciones puntuales de calidad del agua; sin embargo, la mayoría de estos estudios se ha centrado en análisis descriptivos o en campañas de muestreo de corta duración, sin incorporar evaluaciones estadísticas multianuales que permitan analizar la variabilidad temporal y la interrelación entre DBO₅, DQO, coliformes fecales y sólidos suspendidos [11–13].

Asimismo, se observa una limitada aplicación de herramientas estadísticas como gráficas de control y matrices de correlación para el análisis integrado de estos parámetros, lo que dificulta la identificación de patrones temporales y la comprensión de los procesos que gobiernan la degradación de la calidad del agua en la cuenca. En este sentido, el presente estudio aborda este vacío mediante el análisis de datos oficiales correspondientes al periodo 2017–2022, integrando

indicadores fisicoquímicos y microbiológicos con un enfoque estadístico reproducible.

Aunque los valores se mantengan por debajo del límite de control superior estadístico, concentraciones de DBO₅ del orden de 200–600 mg/L y de DQO de 200–1000 mg/L implican un consumo elevado de oxígeno para la degradación de materia orgánica, lo que puede afectar la calidad del agua al disminuir el oxígeno disponible para la vida acuática y limitar su uso recreativo o de contacto primario [13–16].

La ausencia de una tendencia sostenida de mejora o deterioro, junto con las fluctuaciones observadas, sugiere la presencia de descargas intermitentes o variaciones en la eficiencia de los sistemas de tratamiento, lo que refuerza la necesidad de procesos de tratamiento más intensivos y monitoreo continuo [17–18].

Los resultados aquí presentados, obtenidos mediante metodologías estandarizadas (APHA, 2017), se contrastan con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, destacando áreas críticas que requieren intervención inmediata. Este análisis no solo aporta evidencia científica para la gestión hídrica, sino que también subraya la urgencia de políticas integrales frente a la contaminación sinérgica en la cuenca del Atoyac.

B Análisis de Matriz de Correlación entre DBO₅ y DQO

El análisis de la matriz de correlación confirma que la DBO₅ y la DQO presentan una correlación positiva y muy fuerte. Esto indica que, cuando se incrementan los valores de DBO₅, los valores de DQO tienden a aumentar de manera concomitante.

Dado que ambos parámetros son indicadores de carga orgánica y química, una correlación tan elevada sugiere que responden a fuentes de contaminación similares, principalmente descargas industriales y municipales con alto contenido de materia orgánica y compuestos oxidables. Esta relación refuerza la interpretación de que el control de una sola variable resultaría insuficiente para mejorar la calidad del agua.

C Análisis de Coliformes Fecales

Las concentraciones de coliformes fecales registradas en las seis localidades analizadas durante el periodo 2017–2022 muestran un comportamiento relativamente estable en el tiempo, con un valor medio aproximado de 2000 NMP/100 mL. Si bien se observan fluctuaciones interanuales, en la mayoría de los casos los valores permanecen por debajo del límite de control superior (LCS = 5500 NMP/100 mL), lo que indica la ausencia de rebasamientos sostenidos de dicho umbral durante el periodo de estudio.

Al analizar el comportamiento por localidad, San Martín Texmelucan y Nativitas presentan picos puntuales en algunos años del periodo analizado, particularmente alrededor de 2019–2020, mientras que Cuautlancingo muestra incrementos graduales a partir de 2018. No obstante, estas variaciones no derivan en excedencias persistentes del LCS, y los valores tienden a regresar a niveles cercanos al promedio en los años

subsecuentes. Este patrón sugiere la presencia de aportes intermitentes de contaminación microbiológica, posiblemente asociados a descargas residuales domésticas no tratadas o a fallas temporales en los sistemas de saneamiento.

En términos generales, la estabilidad observada en los valores de coliformes fecales, aunada a la ausencia de excedencias prolongadas del límite de control, indica que la contaminación microbiológica en los afluentes evaluados presenta un carácter crónico más que episódico. Sin embargo, la persistencia de concentraciones del orden de 2000 NMP/100 mL refleja una calidad microbiológica deficiente, que puede representar riesgos potenciales para usos recreativos o de contacto primario del agua, especialmente en zonas con alta interacción humana.

Estos resultados resaltan la importancia de mantener un monitoreo continuo de los coliformes fecales, así como de fortalecer las acciones de gestión y control de las descargas residuales municipales. La identificación temprana de picos interanuales permite detectar periodos críticos y orientar estrategias preventivas que eviten incrementos sostenidos de contaminación microbiológica en la cuenca del río Atoyac.

D Análisis de Sólidos Suspendidos

En los primeros años del periodo analizado (2017–2019), la mayoría de las localidades presentaron concentraciones de sólidos suspendidos inferiores a 200 mg/L, con valores cercanos o ligeramente superiores al promedio. Sin embargo, a partir de 2020 se observaron incrementos notables en varias localidades, con picos que alcanzaron valores entre 500 y 1000 mg/L.

San Martín Texmelucan y Cuautlancingo muestran incrementos marcados a partir de 2020, mientras que Puebla y San Jacinto presentan picos pronunciados en 2021, alcanzando las concentraciones más altas del periodo analizado. En contraste, Nativitas mantiene valores relativamente más bajos durante la mayor parte del intervalo temporal, aunque también se observa un incremento en años recientes.

Aunque la mayoría de los valores permanece por debajo del LCS, la presencia de fluctuaciones interanuales significativas y picos cercanos al límite superior evidencia una alta variabilidad temporal en la concentración de sólidos suspendidos, asociada a aportes no controlados o deficiencias en los procesos de tratamiento [19,20].

E Análisis de Matriz de Correlación de Coliformes Fecales y Sólidos Suspendidos

A pesar de que en algunos casos se observa un ligero aumento de C.F en años cercanos a 2020-2021, en general no excede el LCS.

Todas las localidades afluentes conservan valores en torno o por debajo del promedio de 2000 NMP/100 mL, lo que sugiere cierta estabilidad en la calidad microbiológica, aunque con la necesidad de seguir monitoreando para evitar aumentos que pudieran llegar a niveles de riesgo sanitario. La presencia persistente de coliformes fecales indica que hay afluentes de contaminación (posiblemente descargas domésticas) [21]

El control y tratamiento de aguas residuales y la gestión adecuada de excretas son fundamentales para evitar que los valores se acerquen o superen el LCS. Sin embargo algunos valores cercanos o que superan temporalmente el promedio de sólidos suspendidos lo cual indica que existen fuentes de aportes de sólidos no controlados o ineficiencia en la remoción de partículas en ciertas épocas.

Es fundamental mejorar la gestión de vertimientos y/o los sistemas de tratamiento p.e. clarificación, sedimentación, filtración para reducir los valores fuera del estándar de control [22].

F Análisis de Matriz de Correlación de Coliformes Fecales, Sólidos Suspendidos, DBO5, DQO

A partir de la matriz de correlación entre las concentraciones de coliformes fecales, sólidos suspendidos, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), se determinó que las celdas fuera de la diagonal presentan valores muy próximos a 1, lo que indica correlaciones positivas fuertes entre todos los parámetros analizados. Esta alta interdependencia estadística sugiere que las variables no actúan de manera aislada, sino como parte de un mismo proceso de degradación de la calidad del agua.

La asociación observada entre concentraciones elevadas de sólidos suspendidos y coliformes fecales indica que el arrastre de partículas sólidas, en muchos casos de origen orgánico, suele coincidir con aportes de materia fecal, lo cual favorece la proliferación bacteriana y la persistencia de contaminación microbiológica en los afluentes. Este comportamiento ha sido reportado previamente en sistemas fluviales urbanos impactados por descargas domésticas sin tratamiento adecuado [23,24].

De manera complementaria, los incrementos simultáneos de DBO₅ y DQO reflejan mayores aportes de materia orgánica biodegradable y de compuestos químicos oxidables, lo que refuerza la relación funcional entre la carga orgánica, los sólidos en suspensión y la presencia de patógenos. La coincidencia de altos valores en estos parámetros sugiere episodios de descarga compleja, donde confluyen contaminantes de distinto origen y naturaleza.

En conjunto, los resultados evidencian una problemática de contaminación interconectada que demanda estrategias de gestión integrales, ya que el control o tratamiento aislado de una sola variable resultaría insuficiente para lograr una mejora sostenida de la calidad del agua en la cuenca del río Atoyac. Estos hallazgos respaldan la necesidad de enfoques coordinados que integren la reducción de sólidos suspendidos, la remoción de carga orgánica y el control de patógenos, en concordancia con los lineamientos normativos y de gestión ambiental vigentes [25,26].

Esta aproximación reconoce que la contaminación del agua es un problema multifactorial donde las soluciones técnicas deben complementarse con revisión periódica por las autoridades sanitarias.

V. CONCLUSIÓN

El objetivo de este estudio fue evaluar la variación espacial y temporal de la calidad del agua en seis localidades de la cuenca del río Atoyac durante el periodo 2017–2022, a partir del análisis de datos oficiales de DBO₅, DQO, coliformes fecales y sólidos suspendidos, utilizando herramientas estadísticas descriptivas, gráficas de control y matrices de correlación.

Los resultados muestran concentraciones elevadas de DBO₅ (200–600 mg/L) y DQO (200–1000 mg/L) en todas las localidades analizadas, así como valores promedio de coliformes fecales cercanos a 2000 NMP/100 mL y episodios de incremento de sólidos suspendidos que alcanzan valores de hasta 500–1000 mg/L en años recientes. Aunque la mayoría de los datos se mantiene por debajo de los límites de control estadístico establecidos, la magnitud y persistencia de estos valores reflejan una presión significativa sobre la calidad del agua en la cuenca.

El análisis de correlación evidenció relaciones positivas muy fuertes entre DBO₅ y DQO ($r > 0.98$), así como asociaciones relevantes entre sólidos suspendidos y coliformes fecales, lo que indica que estos parámetros responden de manera interrelacionada a procesos comunes de contaminación. Estos resultados confirman que la degradación de la calidad del agua en el río Atoyac es de carácter multifactorial y no puede ser explicada por un solo parámetro de manera aislada.

En el marco del alcance metodológico del estudio, basado en el análisis de datos secundarios y herramientas estadísticas, los hallazgos permiten inferir que las condiciones observadas pueden limitar ciertos usos del agua y afectar el funcionamiento del ecosistema acuático, particularmente en zonas con mayor presión antrópica. No obstante, la cuantificación directa de impactos sanitarios o ecológicos requiere estudios específicos adicionales.

En conjunto, este trabajo aporta un diagnóstico estadístico integrado de la calidad del agua en la cuenca del río Atoyac, útil como base para el seguimiento temporal del sistema y para la toma de decisiones en materia de gestión y control de la contaminación, dentro del contexto de la información analizada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por la beca otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) de la Dra. Melissa Chavez Portillo (CVU 346673) y al apoyo por parte de Vicerrectoría de Docencia (VIEP-BUAP) a través de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

REFERENCIAS

- [1] Sandoval Villasana, A. M., Pulido-Flores, G., Monks, S., Gordillo Martínez, A. J., & Villegas Villareal, E. C. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 34(12), 880-887.
- [2] Pérez Castresana, G., Castañeda Roldán, E., García Suastegui, W. A., Morán Perales, J. L., Cruz Montalvo, A., & Handal Silva, A. (2019). *Evaluation of health risks due to heavy metals in a rural population exposed to Atoyac River pollution in Puebla, Mexico*. Water, 11(2), 277.
- [3] Dong, Y. Y., Hua, Z. L., Wang, P., & Ma, Y. X. (2025). *Insights into the effects of river network topology on sudden pollution risks*. Journal of Hydrology, 648, 132316.
- [4] Lema, M. W. (2024). Contamination of urban waterways: A mini-review of water pollution in the rivers of East Africa's major cities. *HydroResearch*.
- [5] Hu, C., Wu, Q., Liu, G., Ran, H., Guo, M., Zhu, J., & Zeng, J. (2025). Nitrogen and phosphorus non-point source pollution in the upper Wujiang River Karst Basin: Critical source areas identification and influencing factors. *Ecological Indicators*, 170, 112989.
- [6] Ma, Y., Chen, C., Yang, C., Yao, Q., Zhou, X., Huang, Q., & Chen, L. (2025). Unveiling polycyclic aromatic hydrocarbon pollution dynamics in river-lake sediments: Insights for energy transition. *Journal of Environmental Management*, 378, 124737.
- [7] Liu, Y., Smith, W. J., Gebrewold, M., Verhagen, R., Cook, S., Simpson, S. L., ... & Ahmed, W. (2025). A highly prevalent and specific cryptic plasmid pB1143 for human fecal pollution tracking in a subtropical urban river. *Water Research*, 273, 122992.
- [8] Pérez Castresana, G., Tamariz Flores, V., López Reyes, L., Hernández Aldana, F., Castlán Vega, R., Morán Perales, J. L., ... & Handal Silva, A. (2018). Atoyac river pollution in the metropolitan area of Puebla, México. *Water*, 10(3), 267.
- [9] Jones, M. L., Leonard, A. C. F., Bethel, A., Lamb, E., Gaze, W. H., Taylor, T., ... & Garside, R. (2025). Recreational exposure to polluted open water and infection: A systematic review and meta-analysis protocol. *Environment International*, 109371.
- [10] Muñoz-Nava, H., Suárez-Sánchez, J., Vera-Reyes, A., Orozco Flores, S., Batle-Sales, J., Ortiz -Zamora, A. D. J., & Mendiola-Arguelles, J. (2012). Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(1), 27-38.
- [11] Vogel, M., Bergström, M., Al JahJah, R., Hankache, C., Touma, R., & Strande, L. (2025). Comparing total suspended solids sensors for improved dewatering of wastewater from non-sewered sanitation. *Journal of Environmental Management*, 373, 123554.
- [12] Bai, W., Tang, R., Wu, G., Wang, W., Yuan, S., Xiao, L., ... & Hu, Z. H. (2023). Role of suspended solids on the co-precipitation of pathogenic indicators and antibiotic resistance genes with struvite from digested swine wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132235.
- [13] Jalilzadeh Yengejeh, R., Morshedi, J., & Yazdizadeh, R. (2014). The study and zoning of dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand (BOD) of Dez river by GIS software. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 1(1), 23-27.
- [14] Vigiak, O., Grizzetti, B., Udias-Moinelo, A., Zanni, M., Dorati, C., Bouraoui, F., & Pistocchi, A. (2019). Predicting biochemical oxygen demand in European freshwater bodies. *Science of the Total Environment*, 666, 1089-1105.
- [15] Sarkar, A., & Pandey, P. (2015). River water quality modelling using artificial neural network technique. *Aquatic procedia*, 4, 1070-1077.
- [16] Guo, L., Zhao, P., Jia, Y., Li, T., Huang, L., Wang, Z., ... & Rong, M. (2023). Efficient inactivation of the contamination with pathogenic microorganisms by a combination of water spray and plasma-activated air. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130686.
- [17] Meléndez-Plata, G., Mastrogiasomo, J. R., Castellanos, M. L., Romero, J. P., Hincapié, V., Lizcano, H., ... & Reyes, L. H. (2025). Malodorous Gases in Aquatic Environments: A Comprehensive Review from Microbial Origin to Detection and Removal Techniques. *Processes*, 13(4), 1077.
- [18] Li, Y., Xiong, X., Zhang, C., & Liu, A. (2022). Sustainable restoration of anoxic freshwater using environmentally-compatible oxygen-carrying biochar: performance and mechanisms. *Water Research*, 214, 118204.
- [19] Rusydi, A. F. (2018, February). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, p. 012019). IOP publishing.
- [20] Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: A review of the issues, conventional, and remote sensing techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 3534.
- [21] Fábrega, J. J. H., & Vásquez, D. (2022). Evaluación de coliformes y factores fisico-químicos del agua en un sector de la desembocadura del

- Río San Pablo, Veraguas, Panamá. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 11(2), 27-42.
- [22] Li, H., & Sansalone, J. (2020). CFD model of PM sedimentation and resuspension in urban water clarification. *Journal of Environmental Engineering*, 146(3), 04019118.
- [23] Liu, D. H., & Lipták, B. G. (Eds.). (2020). *Wastewater treatment*. CRC Press.
- [24] Tang, J., Li, X., Cao, C., Lin, M., Qiu, Q., Xu, Y., & Ren, Y. (2019). Compositional variety of dissolved organic matter and its correlation with water quality in peri-urban and urban river watersheds. *Ecological Indicators*, 104, 459-469.
- [25] Casiano Flores, C., Vikolainen, V., & Bressers, H. (2016). Water governance decentralisation and river basin management reforms in hierarchical systems: do they work for water treatment policy in Mexico's Tlaxcala Atoyac Sub-basin?. *Water*, 8(5), 210
- [26] Lin, J., He, H., Zou, J., Yang, Y., & Li, J. (2024). Effects of high-concentration influent suspended solids on aerobic granulation in sequencing batch reactors treating real textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104609.