

CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO SAN PEDRO EN AGUASCALIENTES, MÉXICO: FUENTES PUNTUALES Y DIFUSAS DE CONTAMINACIÓN

WATER QUALITY IN SAN PEDRO RIVER IN AGUASCALIENTES, MEXICO: POINT AND DIFFUSE SOURCES OF POLLUTION

**Natalie E. Morales-Leiva¹, Andrea A. Acosta-Herrera¹, Virginia Hernández-Montoya^{1,*},
Florianne Castillo-Borja¹, María E. Martínez-Floriano¹, Gabriela Castillo-Ibarra¹**

(1) Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes,
Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote., 20256, Aguascalientes-México
(*e-mail: virginia.hm@aguascalientes.tecnm.mx)

Recibido: 02/10/2023 - Evaluado: 30/10/2023 - Aceptado: 02/12/2023

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de la evaluación de la calidad del agua en algunos puntos de muestreo del río San Pedro en la ciudad de Aguascalientes (México). Específicamente, los muestreos se llevaron a cabo en tres puntos diferentes conforme al estándar NMX-AA-014-1980 y se cuantificaron diversos parámetros establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. El estudio mostró que existen niveles variables de contaminantes en los puntos de muestreo, encontrando concentraciones elevadas de materia orgánica, fosfatos y nitratos, los cuales pueden afectar los ecosistemas acuáticos. Mientras que, parámetros como pH, conductividad eléctrica, temperatura y algunos metales pesados (Cu, Zn, Fe, Cr, Pb, Cd, Hg, As) están por debajo de los límites máximos permisibles. Los resultados proporcionan conocimientos valiosos que pueden ser fundamentales para desarrollar estrategias efectivas en la gestión del agua y la preservación de los recursos hídricos de la región.

ABSTRACT

This work presents the results obtained from the evaluation of water quality at several points along the San Pedro River located in Aguascalientes city (Mexico). Specifically, the sampling carried out according to the methodology reported in NMX-AA-014-1980 standard and some parameters cited in standard NOM-001-SEMARNAT-2021 were quantified in the water samples. This study showed that there are variable levels of pollutants at the sampling points, finding high concentrations of organic matter, phosphates and nitrates, which could affect the aquatic ecosystems. Meanwhile, parameters such as pH, electrical conductivity, temperature and some heavy metals (Cu, Zn, Fe, Cr, Pb, Cd, Hg, As) were found below the maximum permissible limits. The results provide valuable insights that can be crucial for developing effective water strategies in water management and the preservation of water resources in the region.

Palabras clave: calidad del agua, preservación recursos hídricos, fuentes de contaminación, gestión del agua
Keywords: water quality, water resources preservation, sources of pollution, water management

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural esencial no renovable, fundamental para el desarrollo humano, la seguridad alimentaria, la salud pública y para el bienestar de los ecosistemas. Debido al aumento de la población, urbanización, industrialización y prácticas extensivas de agricultura, se ha convertido en un recurso escaso y con problemas de calidad. Las principales fuentes de agua incluyen aguas superficiales y subterráneas, que desempeñan un papel fundamental en el abastecimiento de este recurso (Nazir *et al.*, 2020). Por esta razón, es vital establecer estrategias y técnicas eficaces para preservar el agua y mantener los recursos hídricos libres de contaminantes. Las principales fuentes de contaminación del agua provienen de diversas actividades humanas como el transporte, la industria, la agricultura, la construcción y las descargas de aguas residuales urbanas e industriales. Además, el manejo inadecuado de residuos incrementa los riesgos para la salud pública y el medio ambiente (Escobar, 2002; Guzmán Colis *et al.*, 2011a; Guzmán Colis *et al.*, 2011b; Nazir *et al.*, 2020).

La calidad del agua, según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se refiere a las propiedades o atributos necesario para su adecuación a diversos usos específicos. Se pueden evaluar diversos parámetros fisicoquímicos y biológicos, siendo los 3 parámetros principales, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). La DBO y la DQO son parámetros que indican la cantidad de materia orgánica en el agua, reflejando su nivel de contaminación. Un aumento significativo en la DBO y la DQO, reduce el oxígeno disuelto en el agua lo que puede alterar los ecosistemas acuáticos (CONAGUA, 2015). Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) también establecen parámetros que se emplean para medir y determinar la calidad física, química y biológica del agua. Estos se dividen en 3 categorías: Física (turbidez, temperatura y color), Química (pH, oxígeno disuelto, nitratos y fosfatos, metales pesados, compuestos orgánicos) y Biológica (coliformes fecales y patógenos) (Samboni Ruíz *et al.*, 2021).

Por otro lado, la identificación de las fuentes de contaminación es esencial para comprender y enfrentar los desafíos asociados a la calidad del agua. Las fuentes de contaminación se dividen en dos categorías: puntuales y difusas. Las fuentes de contaminación puntuales al ser específicas y localizables pueden monitorearse y regularse fácilmente y de manera constante, correspondiendo a descargas directas de contaminantes, como los vertidos industriales, las descargas de aguas residuales tratadas o no tratadas y los derrames accidentales de sustancias químicas (Galaviz Villa & Sosa Villalobos, 2019). Por otro lado, las fuentes de contaminación difusas incluyen la entrada dispersa de contaminantes a través de múltiples fuentes y actividades como la escorrentía superficial de aguas agrícolas, urbanas o industriales, erosión del suelo, la deposición atmosférica de contaminantes y la filtración de aguas subterráneas contaminadas, que demandan un enfoque integral y continuo para su manejo efectivo (Galaviz Villa & Sosa Villalobos, 2019; Pedrozo Acuña, 2021). Para la identificación de fuentes difusas de contaminación, se pueden emplear observaciones de campo y técnicas estadísticas que permitan evaluar los parámetros de la calidad del agua a lo largo del sitio de monitoreo (Oruc *et al.*, 2022).

En México, la gestión y protección de los recursos hídricos está bajo la supervisión de la CONAGUA, que, a través del Programa Nacional Hídrico 2024-2030, establece directrices para la conservación y uso sustentable del agua en todo el país enfatizando la gestión equitativa y sostenible del agua para garantizar el acceso universal mediante el ordenamiento de concesiones de agua para evitar la sobreexplotación y promoviendo el Programa Nacional de Tecnificación en coordinación con la Secretaría de Agricultura, contemplando la elaboración de un plan maestro que integra presas y acueductos para dotar de agua potable a las zonas de mayor estrés hídrico (CONAGUA, 2024). Además, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) proporciona un marco legal para la protección y administración sostenible de los recursos hídricos (DOF, 1992). Específicamente, en el estado de Aguascalientes, se ha implementado el Plan Hídrico Estatal 2021-2050 que define estrategias para gestionar el agua en el río San Pedro. Entre las acciones previstas se incluyen el fortalecimiento de la infraestructura del tratamiento de aguas residuales, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para disminuir la carga de contaminantes que ingresan al río y la implementación de monitoreos continuos para asegurar la calidad del agua. Además, se destacan iniciativas como

la promoción de la recolección de aguas pluviales, el tratamiento de aguas residuales para su reutilización en la agricultura y la industria, así como el fortalecimiento de los marcos regulatorios para el uso eficiente del agua en sectores clave (SEGGOB, 2022).

Aguascalientes, ubicado en el centro de México, tiene una superficie de 5589 km² y un clima semiárido. Sus principales actividades económicas son el comercio, la industria textil, electrónica y automotriz, lo que genera una gran presión sobre los recursos hídricos de la región (González *et al.*, 2012). Aguascalientes, es uno de los estados con mayor déficit de agua en México, con una alta dependencia de los recursos hídricos subterráneos, particularmente del acuífero Valle de Aguascalientes, el cual ha experimentado una sobreexplotación significativa en las últimas décadas (CONAGUA, 2015). En este sentido, es importante mencionar que la principal fuente de agua del estado de Aguascalientes para el riego agrícola y las actividades industriales es el acuífero Valle de Aguascalientes y el río San Pedro. Con un escurrimiento anual estimado de 130 millones de m³ en un área de 4330 km², el río San Pedro es fundamental para el abastecimiento de agua en la región y le permite al valle de Aguascalientes mantener mayor humedad, siendo el río más importante del estado (Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2023). El río San Pedro nace en el estado de Zacatecas en la Sierra de Barranca Milpillas, atravesando las localidades de Genaro Codina y San Pedro Piedra Gorda, para posteriormente entrar al estado de Aguascalientes por el municipio de Cosío y atravesar todo el estado cubriendo una distancia aproximada de 90 km (CONAGUA, 2007). Dentro del estado de Aguascalientes y Jalisco, se conoce como río Aguascalientes, y una vez que se une a los ríos Encarnación, Lagos y Teocaltiche en el estado de Jalisco, su nombre cambia a río Verde, donde el agua es aprovechada casi en su totalidad en los valles agrícolas de Aguascalientes y Jalisco (Santos Medrano *et al.*, 2007; Billardi, 2022; Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2023).

Por otro lado, es importante mencionar que, a pesar de su importancia, la calidad del agua del río San Pedro ha empeorado en los últimos años, siendo clasificada como "pobre" debido a los grandes problemas de contaminación a los que se enfrenta. El río recibe desechos domésticos semitratados, así como desechos industriales, lo que afecta gravemente su calidad (Billardi, 2022). En México, la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 establece los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes presentes en las descargas residuales en cuerpos receptores nacionales tales como ríos, lagos y otros cuerpos de agua, lo cual es crítico para asegurar que las aguas residuales cumplan con los estándares de calidad necesarios para evitar la contaminación los recursos hídricos (DOF, 2022). En relación con lo anterior y de acuerdo con estudios reportados en la literatura, algunos contaminantes presentes en el río San Pedro son coliformes fecales, metales pesados como As, Cu, Zn, Pb, Cr, Fe y Hg, detergentes, materia orgánica, fósforo total y nitrógeno total (Santos Medrano *et al.*, 2007; Guzmán Colis *et al.*, 2011a; Billardi, 2022). Este tipo de contaminantes representan un riesgo a la salud y a los ecosistemas, por ejemplo, la presencia de coliformes fecales indica contaminación por aguas residuales, lo cual puede causar enfermedades gastrointestinales en los seres humanos (Thériault & Duchesne, 2015; Wear *et al.*, 2021). Por otro lado, los metales pesados como el arsénico (As), plomo (Pb) y mercurio (Hg) tienen efectos tóxicos acumulativos, afectando tanto a la salud humana como a la fauna acuática, incluso en concentraciones bajas (EPA, 2009; Cruz Casanova, 2013). La materia orgánica contribuye al agotamiento del oxígeno disuelto en el agua, afectando la vida acuática y alterando el equilibrio ecológico del río (Oluwaseun Akinnawo, 2023).

Tomando en cuenta los antecedentes antes descritos, el objetivo general del presente trabajo fue identificar las fuentes puntuales y difusas de contaminación en algunos puntos de muestreo del río San Pedro en la ciudad de Aguascalientes, proporcionando una base de referencia para el control de la calidad del agua de la región y la implementación de políticas de gestión hídrica. El estudio se llevó a cabo mediante muestreos estratégicos a lo largo del río en la ciudad de Aguascalientes, cuantificando algunos de los parámetros más importantes citados en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, así como algunos otros que representan un riesgo para la salud humana y los ecosistemas.

METODOLOGÍA

Para la identificación de las fuentes puntuales y difusas de contaminantes presentes en el río San Pedro, la investigación se llevó a cabo en tres etapas principales, las cuales se describen a continuación: 1) Selección del sitio de muestreo, 2) Muestreo y 3) Análisis cuantitativo de contaminantes.

Selección del sitio de muestreo

Para la selección de los puntos de muestreo del río San Pedro en la Ciudad de Aguascalientes, se consideró la proximidad de posibles fuentes de contaminación, parques industriales y plantas de tratamiento en la zona, así como informes o artículos de estudios previos encontrados en la literatura. En la Tabla 1 se muestran las coordenadas geográficas para los 3 puntos de muestreo seleccionados, los cuales coinciden con algunos de los reportados por Guzman-Colis *et al.* (2011b), esto con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación y poder visualizar como ha sido la evolución de la calidad del agua en diferentes puntos del río San Pedro con el paso del tiempo y las condiciones climáticas. En la Fig. 1 se muestran los 3 diferentes puntos de muestreo seleccionados (color rojo), así como las plantas de tratamiento de residuales (PTAR) que se encuentran cercanas a dichos puntos en (color amarillo). La PTAR Los Sauces se encuentra cerca del punto de muestreo 1, mientras que la PTAR Los Arellano, se encuentra cerca del punto de muestreo 3.

Tabla 1: Puntos de muestreo y coordenadas de los 3 sitios seleccionados en el río San Pedro en la Ciudad de Aguascalientes, México

Punto de muestreo	Coordenadas geográficas	Fecha de muestreo
Punto 1	21° 54' 18.4" N y 102° 19' 07.6" O	Mayo 2024
Punto 2	21° 53' 57.3" N y 102° 19' 27.4" O	Mayo 2024
Punto 3	21° 53' 27.9" N y 102° 19' 26.8" O	Mayo 2024

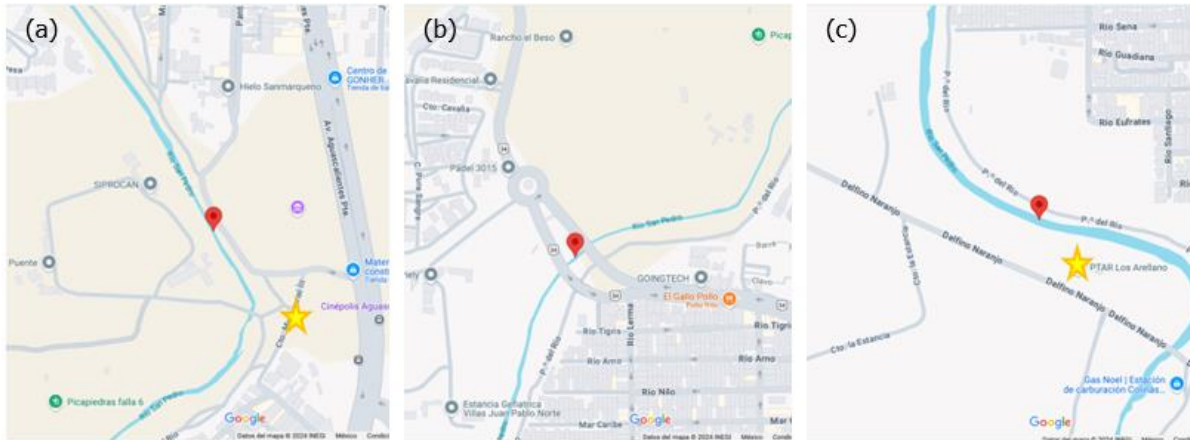


Fig. 1: Puntos de muestreo seleccionados para el presente estudio (a) Punto 1, (b) Punto 2 y (c) Punto 3.

Muestreo

El muestreo se realizó conforme al estándar mexicano NMX-AA-014-1980 con el objetivo de garantizar la precisión y preservación adecuada de las muestras de agua. El procedimiento general fue el siguiente: 1) Preparación y calibración de la sonda multiparamétrica para cuantificar parámetros de campo como pH, temperatura y conductividad, 2) Preparación de material general para muestreo (recipientes, frascos de muestreo, etiquetas, conservadores, hielo), 3) Registro de muestras conforme a la norma NMX-AA-115-SCFI-2015 (Etiqueta con fecha de muestreo, nombre del análisis a realizar y punto de muestreo). Se realizó un muestreo simple en cada punto

de muestreo, donde los recipientes fueron llenados con la muestra de agua de río y posteriormente, se midieron parámetros de campo *in situ* empleando la sonda calibrada y se registraron los valores correspondientes. Para la preservación de las muestras, se usaron los procedimientos específicos de acuerdo con el tipo de análisis basado en los procedimientos de los estándares mexicanos (NMX) correspondientes a cada analito. Se emplearon diversos conservadores químicos en caso de ser necesario y se usó un sellado adecuado de los recipientes para evitar alteración y contaminación de las muestras. Una vez terminado el muestreo, se procedió a su almacenamiento a 4 °C para su preservación hasta su análisis.

En cada uno de los puntos de muestreo, se realizó un análisis del sitio, identificando su ubicación y su cercanía a las plantas de tratamiento o zonas urbanas y residenciales, donde se observaron las posibles fuentes de contaminación puntuales y difusas del río.

Análisis cuantitativo de contaminantes

Para la cuantificación de los contaminantes presentes en las muestras de agua, los análisis se llevaron a cabo bajo los criterios señalados en los estándares mexicanos correspondientes. A cada una de las muestras obtenidas se les determinó la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST), materia orgánica (DBO y DQO), nutrientes (fosfatos y nitratos), sílice, alcalinidad total, sulfatos, metales pesados (Cu, Zn, Fe, Cr, Pb, Cd, Hg), metaloides (As), grasas y aceites. Los procedimientos empleados en los análisis se encuentran citados en los estándares mexicanos: NMX-AA-005-SCFI-2013 (grasas y aceites), NMX-AA-034-SCFI-2015 (sólidos suspendidos totales, SST), NMX-AA-028-SCFI-2021, (Demanda bioquímica de oxígeno, DBO), NMX-AA-051-SCFI-2016 (Zn, Pb, Fe, Cd, Cu, As, Hg), NMX-AA-044-SCFI-2014 (Cr). Parámetros como fosfatos, sulfatos, nitratos y alcalinidad total fueron cuantificados mediante Espectroscopia Ultravioleta-Visible, mientras que, los metales pesados y metaloides fueron cuantificados mediante Absorción Atómica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de contaminantes en el agua del río

En el primer punto de muestreo, situado en el Desarrollo Especial Centro Comercial Las Américas en el municipio de Aguascalientes, se observó que, la Planta de Tratamiento de Agua Residual Los Sauces se encuentra aproximadamente a 0.80 km del cauce del río San Pedro. El entorno a este punto de muestreo como se muestra en la Fig. 2a, se caracteriza por la presencia de infraestructura urbana y el crecimiento de vegetación, en donde algunas fuentes de contaminación incluyen vertidos superficiales, escorrentías superficiales y posibles descargas ilegales en la zona. El segundo punto de muestreo (Ver Fig. 2b), se encuentra localizado cerca de una zona residencial con poca vegetación y fácil acceso para personas locales. En este punto, las posibles fuentes de contaminación incluyen aguas residuales domésticas, escorrentía urbana y algunas posibles descargas de sistemas sépticos. Finalmente, en el punto de muestreo 3, se encuentra localizado cerca de una zona urbana-residencial y con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Arellanos a 0.96 km de distancia, donde además se observó presencia de vegetación (Ver Fig. 2c). Las posibles fuentes de contaminación pueden ser escorrentías superficiales, descargas ilegales y descargas directas de la PTAR.

Los resultados de la presencia de metaloides y metales pesados en las diferentes muestras de agua recolectadas en los puntos de muestreo del río San Pedro se muestran en la Tabla 2 (regulados en la NOM-001-SEMARNAT-2021). La presencia de dichos metales y metaloides, así como su concentración, son indicadores importantes de la calidad del agua y de las posibles fuentes de contaminación. Se puede observar que, no se detectó la presencia de Zn, Cd, Pb, Cu, Cr y Ni en los tres puntos de muestreo, lo que puede sugerir que no hay fuentes significativas de contaminación por estas especies en el cauce del río favoreciendo a la calidad del agua. Sin embargo, la presencia de As fue detectada en los puntos de muestreo 1 y 2 en concentraciones menores a los LMP en la NOM-001-SEMARNAT-2021, con valores de 0.0016 y 0.0017 mg/L, respectivamente. Esto indica que no suponen un riesgo inmediato para la salud humana o para el medio ambiente. Sin embargo, es recomendable mantener un

monitoreo constante para asegurar el cumplimiento de los límites máximos permisibles. Por otra parte, la presencia de Hg en límites muy bajos también fue detectada en los puntos de muestreo 1 y 2.



Fig. 2: Puntos de muestreo de agua del río San Pedro en la Ciudad de Aguascalientes seleccionados en este estudio: Punto de muestreo 1 (a), Punto de muestreo 2 (b) y Punto de muestreo 3 (c).

Tabla 2: Resultados de la concentración de los metales pesados presentes en los 3 diferentes puntos de muestreo del río San Pedro

Punto de Muestreo	Concentración en mg/L							
	As	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Hg	Cr
Punto 1	0.0016	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.00007	Nd
Punto 2	0.0017	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.00009	Nd
Punto 3	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd

Nd: No detectado

Los resultados de pH, así como la temperatura y la conductividad eléctrica se muestran en la Fig. 3. Los valores de pH registrados en los tres puntos de muestreo se encuentran dentro del LMP de la norma NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual establece un intervalo de 6-9, indicando que no hay variaciones significativas en la acidez o alcalinidad del agua a lo largo de los tres puntos de muestreo estudiados en el río San Pedro.

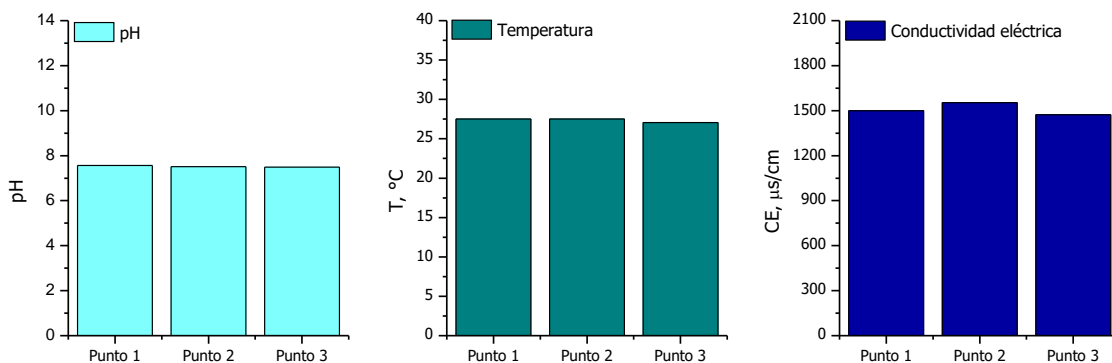


Fig. 3: Resultados de pH, temperatura y conductividad eléctrica de las muestras de agua obtenidas en los diferentes puntos de muestreo en el río San Pedro

Por otra parte, la conductividad eléctrica (CE) es un parámetro que está directamente relacionado con la presencia de iones en solución y con la calidad del agua. Los resultados muestran que, la muestra del punto 2 presentó el nivel de CE más alto (1554 $\mu\text{s}/\text{cm}$), lo cual podría estar indicando la presencia de iones disueltos es mayor respecto a los otros dos puntos de muestreo debido a la descarga de aguas residuales y a las diversas actividades industriales presentes en el área cercana al punto de muestreo. La diferencia existente entre la CE en los puntos de muestreo también puede reflejar variaciones en las fuentes de contaminación, así como en la composición mineral del suelo y de las rocas que se encuentran en las zonas. Cabe destacar que este punto, es el único que no cuenta con una PTAR cerca de la zona. A su vez, se observó que la temperatura del agua en los 3 puntos de muestreo es estable, lo que sugiere que no hay fuentes significativas de calentamiento o enfriamiento localizado, como descargas térmicas o sombreados diferenciales.

Los parámetros que fueron cuantificados mediante Espectroscopia UV-Visible se muestran en la Fig. 4. Se puede observar que, la alcalinidad total (en mg/L de CaCO_3) es el parámetro que presentó valores más altos en comparación con parámetros como PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , SiO_2 y NO_3^- . En los 3 puntos de muestreo se obtuvieron valores similares de CaCO_3 : 528, 528 y 520 mg/L para el punto 1, punto 2 y punto 3, respectivamente. La alcalinidad en el agua superficial es un indicador de la calidad del agua y la salud de los sistemas acuáticos, ya que ayuda a mantener el pH dentro de un rango adecuado para la vida acuática, principalmente. Cambios drásticos en la alcalinidad, pueden influir directamente en dichos ecosistemas y además es un parámetro relacionado con el pH.

Por otro lado, los nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y fósforo total son parámetros que también se encuentran regulados dentro de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Con respecto a la concentración de NO_3^- , se pudo observar un valor mayor en el punto 1 (35 mg/L), mientras que en el punto 2 y 3, se registraron concentraciones menores (14.9 y 33.4 mg/L , respectivamente). La variabilidad en la contaminación por NO_3^- a lo largo del cauce posiblemente se ve influenciada por actividades agrícolas, esto debido a que los nitratos son los principales compuestos empleados en la manufactura de fertilizantes. También, la cercanía con zonas urbanas a la zona de muestreo, así como la presencia de plantas de tratamiento de agua residual son posibles causantes de la contaminación por NO_3^- (Jiang *et al.*, 2021; Moloantoa *et al.*, 2022).

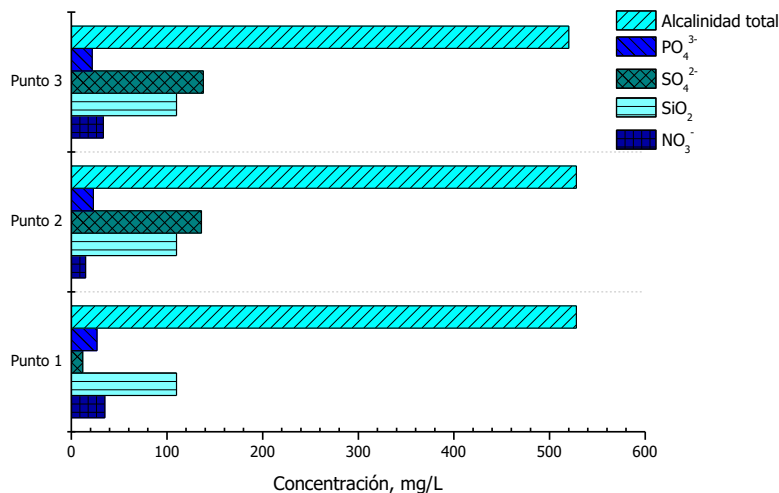


Fig. 4: Resultados de la concentración de fosfatos, sulfatos, silicatos, nitratos y alcalinidad total en los tres puntos de muestreo

Por su lado, los fosfatos en alta concentración representan un gran riesgo para los ecosistemas acuáticos debido a que son los principales causantes de la eutrofización debido al uso excesivo de fertilizantes, así como descargas domésticas e industriales principalmente generando problemas en el crecimiento de algas y plantas acuáticas que

disminuyen significativamente la calidad del agua y del oxígeno disuelto (Muisa *et al.*, 2015). En general, se pudo observar que la concentración de fosfatos fue de 26.7, 23 y 21.9 mg/L para el punto 1, 2 y 3, respectivamente. La presencia de P, en forma de fosfatos se puede deber a la presencia de estiércol en áreas de pastoreo, así como fertilizantes empleados en agricultura (Muñoz Nava *et al.*, 2012). A su vez, se puede identificar la presencia de sulfatos en concentraciones de 12 a 138 mg/L, y la presencia de sílice en concentraciones de 110 mg/L para los 3 puntos del muestreo. Cabe destacar, que este tipo de contaminantes no se encuentran regulados en las normas oficiales mexicanas, sin embargo, representan un riesgo para la calidad del agua debido a la formación de incrustaciones por compuestos insolubles, así como problemas de salud para los seres humanos y la vida acuática (Sharma & Kumar, 2020; Simazaki *et al.*, 2020; Cob *et al.*, 2012).

Por su lado, la contaminación por materia orgánica se relaciona con parámetros como DQO y DBO, y los resultados de los tres puntos de muestreo se pueden observar en la Fig. 5a. En general, se puede resaltar que la DQO mostró una concentración más alta en el punto de muestreo 1 (263 mg/L), en comparación con el punto 2 (260 mg/L) y punto 3 (254 mg/L), no obstante, no hay diferencia significativa entre los tres puntos. Sin embargo, la presencia de DQO mayor a 210 mg/L, excede los LMP de acuerdo con la NOM- 001-SEMARNAT-2021, representando así un riesgo para la calidad del agua, ya que el oxígeno disuelto se puede ver disminuido, afectando los ecosistemas acuáticos, así como fomentando la proliferación de algas y plantas acuáticas debido a la alta concentración de materia orgánica, siendo las principales fuentes de DQO los efluentes industriales, aguas residuales domésticas y escorrentías agrícolas (Toledo Medrano & Amurrio Derpic, 2006; Lee & Kang, 2010). Por otro lado, la DBO en el punto 1 tuvo la concentración más alta, con un valor de 26 mg/L, esto principalmente atribuido a la presencia de una PTAR cercana a este punto de muestreo, lo que representa una fuente de contaminación y presencia de una mayor carga orgánica biodegradable que posiblemente se encuentre influenciada por descargas industriales y urbanas. Es importante mencionar que el punto 1, se encuentra cerca de residenciales, ranchos y granjas, que pueden ser los causantes el aumento en la carga orgánica en este punto.

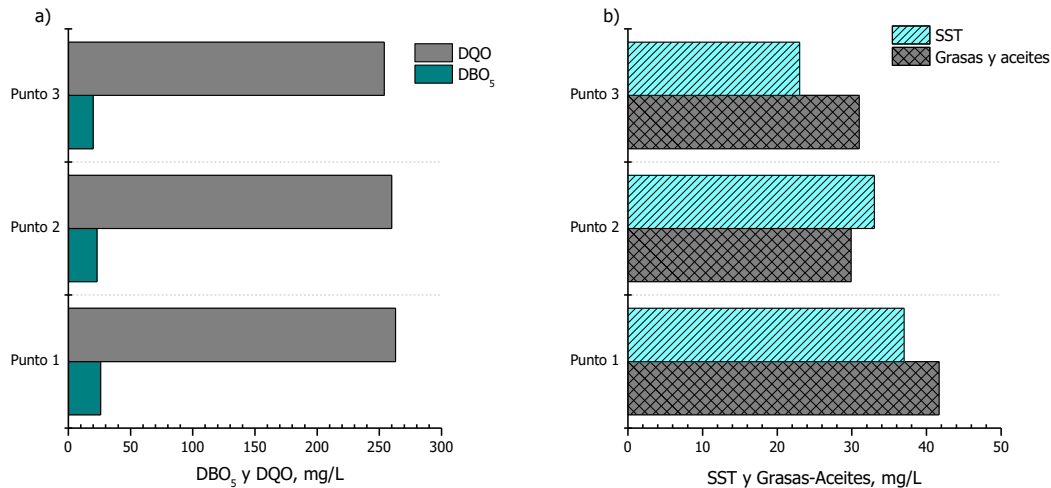


Fig. 5: Resultados de DQO, DBO₅ (a) y SST, Grasas y Aceites (b) de las muestras estudiadas

En la Fig. 5b, se muestran los resultados de concentración para grasas aceites y sólidos suspendidos totales en los 3 puntos de muestreo. Se puede observar que el punto que tuvo una concentración más alta de ambos parámetros fue el punto de muestreo 1, que es el se encuentra cerca de una PTAR municipal (Los Sauces), con una capacidad de 100 L/s (INAGUA, 2023). Los resultados muestran diferencias significativas entre los 3 puntos de muestreo, lo que puede sugerir una posible influencia de actividades industriales y residenciales cercanas a las zonas. Para grasas y aceites, el punto 1 muestra la concentración más alta con un valor de 41.7 mg/L, seguido por el punto 3 con 31.0 mg/L y finalmente el punto 2 con 29.9 mg/L. Estos valores exceden los LMP establecidos

por la NOM- 001-SEMARNAT-2021, siendo el LMP de 21 mg/L, por lo que se resalta la importancia de controlar y regular las descargas de grasas y aceites en zonas urbanas e industriales de las zonas adyacentes al río San Pedro, ya que la presencia de estos contaminantes puede afectar la salud de los organismos acuáticos y la capacidad para reutilizar el agua de manera segura.

Por otro lado, los sólidos suspendidos totales también muestran una variabilidad entre los puntos de muestreo evaluados, reflejando diferentes niveles de turbidez y sedimentación en cada zona muestreada. La concentración más alta de SST se observó el punto 1 (37 mg/L), seguido del punto 2 (33 mg/L) y el punto 3 (23 mg/L). Las diferencias entre los puntos de muestreo pueden atribuirse a diversas actividades humanas como la deforestación, la urbanización y la construcción cercana a las áreas de muestreo.

Análisis de las fuentes puntuales y difusas de contaminación y comparación con la normatividad

Finalmente, en la Tabla 3, se presenta un comparativo de los límites máximos permisibles de algunos contaminantes citados en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 y los parámetros cuantificados en el presente estudio. Específicamente, se muestra el LMP del valor instantáneo que de acuerdo con la norma se refiere al resultado obtenido del análisis de laboratorio a una muestra simple de agua residual colectada en la descarga en ríos, arroyos, canales o drenes. Los resultados obtenidos en los diferentes puntos de muestreo a lo largo del cauce del río San Pedro han permitido poder establecer una evaluación de la calidad del agua de acuerdo con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas residuales en cuerpos de agua y bienes nacionales. Se pudieron observar diferencias significativas entre los 3 puntos de muestreo, lo que proporcionó una visión general sobre las condiciones fisicoquímicas y biológicas del río San Pedro, así como las posibles fuentes de contaminación. Específicamente, todos los metales pesados cuantificados en este estudio cumplieron con los LMP establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 indicando un buen estado general del agua respecto a estos contaminantes para los 3 puntos de muestreo. Sin embargo, parámetros como DQO, grasas y aceites se encontraron por encima de los LMP, siendo posibles causas de contaminación puntuales las descargas directas de las PTAR que se encuentran cerca de la zona del muestreo 1 y 3, así como descargas ilegales como vertidos no tratados de cocinas industriales y domésticas. Por otra parte, actividades comerciales como talleres mecánicos, posibles derrames de hidrocarburos y emisiones vehiculares son una fuente de contaminación difusa en la zona. En particular, la descarga de aguas domésticas es la que más contribuye al aumento en la DQO presente en el agua, asociada principalmente a la manipulación de productos químicos y materiales orgánicos y la falta de tratamientos eficientes en las PTAR (Mijangos Carro *et al.*, 2008; Bravo Inclán *et al.*, 2013).

Tabla 3: Comparación de algunos parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y los resultados obtenidos en los 3 puntos de muestreo en el río San Pedro

Parámetro	Valor obtenido del muestreo			LMP
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	(Valor instantáneo) NOM-001-SEMARNAT-2021
pH	7.56	7.51	7.49	6-9
Temperatura, °C	27.52	27.51	27.06	35
DQO, mg/L	263	260	254	210
Grasas y Aceites, mg/L	41.7	29.9	31	21
SST, mg/L	37	33	23	84
N _T , mg/L	35	14.9	33.4	35
P _T , mg/L	8.71	7.50	7.14	21
As, mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	0.4
Cd, mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	0.4
Cu, mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	6
Cr, mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	1.5
Hg, mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.02
Ni, mg/L	<0.2	<0.2	<0.2	4
Pb, mg/L	<0.25	<0.25	<0.25	0.4
Zn, mg/L	<0.2	<0.2	<0.2	20

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la evaluación de la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo a lo largo del río San Pedro proporcionan una visión integral sobre el estado ambiental de esta importante fuente hídrica. La comparación con los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021) para descargas de aguas residuales en aguas nacionales destaca la importancia de estos datos para la gestión ambiental y la protección de los ecosistemas acuáticos. Específicamente, el análisis de la calidad del agua en el río San Pedro revela la influencia de diversas fuentes de contaminación en los tres puntos de muestreo estudiados. Aunque los metales pesados regulados se encuentran en concentraciones por debajo de los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021, lo cual indica un buen estado del agua en términos de metales y metaloides, otros parámetros críticos exceden estos límites. La DQO, grasas y aceites presentan niveles superiores a los permitidos, lo cual se atribuye a descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), vertidos ilegales, y la falta de un tratamiento adecuado de aguas domésticas e industriales, especialmente en las áreas cercanas a las PTAR y zonas urbanas. Parámetros como la conductividad eléctrica y la alcalinidad muestran diferencias entre los puntos de muestreo, reflejando variaciones en las fuentes de contaminación y en la composición mineral del suelo. Asimismo, los altos niveles de fosfatos y nitratos indican la presencia de contaminantes asociados con el uso de fertilizantes en actividades agrícolas, así como descargas domésticas e industriales, aumentando el riesgo de eutrofización del cuerpo de agua y afectando la vida acuática. Por tanto, estos resultados resaltan la necesidad de un monitoreo constante, así como de medidas de control más estrictas en las descargas de aguas residuales y en la gestión de residuos agrícolas e industriales en la región para proteger la calidad del agua del río San Pedro.

REFERENCIAS

- Billardi, B. (2022). Narrativas y metáforas sobre el río San Pedro en la ciudad de Aguascalientes, México. *Sociedad y Ambiente*, 25, 1-27.
- Bravo Inclán, L., Saldaña-Fabela, P., Izurieta-Dávila, J. & Mijangos-Carro, M. (2013) La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo. *El portal del agua desde México*, 10, pp. 1-10. https://www.cmic.org.mx/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/noticias_principales/contaminacion_difusa/contaminacion.pdf
- Cob, S., Beaupin, C., Hofs, B., Nederlof, M.M., Harmsen, D.J.H., Cornelissen, E.R., et al. (2012). Silica and silicate precipitation as limiting factors in high-recovery reverse osmosis operations. *J. Membr. Sci.*, 423-424, 1-10.
- CONAGUA - Comisión Nacional del Agua (2007). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales. https://www.cmic.org.mx/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/estadisticas/estadisticas%202008/14_EAM_2007_Completo.pdf
- CONAGUA - Comisión Nacional del Agua (2015). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales. <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- CONAGUA- Comisión Nacional del Agua (2024). *Conoce el Plan Nacional Hídrico 2024-2030: Agua es Bienestar*. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/presenta-conagua-plan-nacional-hidrico-384239#:~:text=El%20objetivo%20principal%20del%20Plan,agua%20en%20todos%20sus%20usos>.
- Cruz Casanova, F.E. (2013). Efecto de la contaminación por metales pesados en los ecosistemas costeros del sureste de México. *Kuxulkab*, 19 (37), 65-68.
- DOF - Diario Oficial de la Federación (1992). *Ley de Aguas Nacionales (LAN)*. Sitio web: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5342552

DOF - Diario Oficial de la Federación (2022). *Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales*. [NOM-001-SEMARNAT-2021]. Sitio web: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

EPA - Environmental Protection Agency (2009). *Human Health Risk Assessment for Contaminants of Concern: Arsenic, Lead, and Mercury*. Washington D.C.: EPA.

Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. CEPAL, Santiago de Chile. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/db3b12df-ae24-4302-97ca-94db2b0d738c/content>

Galaviz Villa, I. & Sosa Villalobos, C.A. (2019). *Fuentes Difusas y Puntuales de Contaminación. Calidad de las Aguas Superficiales y Subterráneas*. Universidad Autónoma de Campeche, 142. https://drive.google.com/file/d/1E1tcVEtzkG06ORUT6jAYgs_Lb1-A10F/view

Gobierno del Estado de Aguascalientes (2023). *Hidrografía*. Sitio web: <https://www.aguascalientes.gob.mx/estado/hidrografia>

González, F.J.A., López, E.M.R., Saldaña, M.C.M., Barrera, A.L.G., Juárez, F.J. & Sánchez, J.L.R. (2012). Water Quality in the State of Aguascalientes and its Effects on the Population's Health. *Water Resources in Mexico*, 7, pp. 217-229.

Guzmán Colis, G., Ramírez López, E.M., Thalasso, F., Rodríguez Narciso, S., Guerrero Barrera, A.L. & Avelar González, F. J. (2011a). Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el estado de Aguascalientes. *Universidad y Ciencia, Trópico Humedo*, 27(1), 17-32.

Guzmán Colis, G., Thalasso, F., Ramírez López, E.M., Rodríguez Narciso, S., Guerrero Barrera, A.L. & Avelar González, F. J. (2011b). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27(2), pp. 89-102.

INAGUA - Instituto del Agua (2023). *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Sitio web: <https://aguascalientes.gob.mx/INAGUA/plantas>

Jiang, H., Zhang, Q., Liu, W., Zhang, J., Pan, K., Zhao, T., et al. (2021). Isotopic compositions reveal the driving forces of high nitrate level in an urban river: Implications for pollution control. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126693.

Lee, Y.S. & Kang, C.K. (2010). Causes of COD increases in Gwangyang Bay, South Korea. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 1537-1546.

Mijangos Carro, M., Izurieta Dávila, J., Gómez Balandra, A., Hernández López, R., Huerto Delgadillo, R., Sánchez Chávez, J., et al. (2008). Importance of diffuse pollution control in the Patzcuaro Lake Basin in Mexico. *Water Science & Technology*, 58(11), 2179-2186.

Moloantoa, K.M., Khetsha, Z.P., Heerden, E.V., Castillo, J.C. & Cason, E. D. (2022). Nitrate Water Contamination from Industrial Activities and Complete Denitrification as a Remediation Option. *Water*, 14(5), 799.

Muisa, N., Shumirai, Z., Zelma, M.L. & Upenyu, M. (2015). Impacts of Untreated Sewage Discharge on Water Quality of Middle Manyame River: A Case of Chinhoyi Town, Zimbabwe. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(3), 133-138.

Muñoz Nava, H., Suárez Sánchez, J., Vera Reyes, A., Orozco Flores, S., Batlle Sales, J., Ortiz Zamora, A.J., et al. (2012). Demanda Bioquímica de Oxígeno y población en la sucesión del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Rev. Int. Contam. Amb.* 28(1), 27-38.

Nazir, K., Hussain, S., Amjad, M., Kanwal, F., Khan, U. & Riaz, M. (2020). Role of Heavy Metals and Anthropogenic Activities in Water Contamination. *Sci Inquiry Rev*, 4(2), 31-47.

Oluwaseun Akinawo, S. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733.

Oruç, H.N., Salim Oncel, M., Onkal Engin, G., Gulgen, F., Karpuzcu, M., Vural, S. et al. (2022). Determination of Primary Surface Water Pollution Indicators by Multivariate Statistical Techniques in an Industrialized Basin. *Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22)*. Paper No. ICEPTP 166. <http://doi.org/10.11159/iceptp22.166>.

Pedrozo Acuña, A. (2021). Contaminación difusa, el reto para la gestión del agua. *Perspectivas IMTA*, 20, 1-4. <https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/perspectivas/2021/b-imta-perspectivas-2021-20.pdf>

Samboni Ruíz, N.E., Carvajal Escobar, Y. & Escobar, J.C. (2021). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172–181.

Santos Medrano, G.E., Ramírez López, E.M., Hernández Flores, S., Azuara Medina, P.M. & Rico Martínez, R. (2007). Determination of toxicity levels in the San Pedro River Watershed, Aguascalientes, Mexico. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42, 1403-1410.

SEGGOB - Secretaría de Gobierno (2022). *Plan Hídrico Estatal 2021-2050 del Estado de Aguascalientes*. <https://eservicios2.aguascalientes.gob.mx/NormatecaAdministrador/archivos/EDO-23-180.pdf>

SEMARNAT - Secretaría de Marina y Recursos Naturales (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/642632/PNH_2020-2024_ptimo.pdf

Sharma, M.K. & Kumar, M. (2020) Sulphate contamination in groundwater and its remediation: an overview. *Environ Monit Assess*, 192 (74), 73-83.

Simazaki, D., Futami, K., Ichimaru, K., Kumagai, T., Konuma, S., Saito, T., et al. (2020). Fate of Sulfate in the Course of Japanese Drinking Water Purification Plants- Implications for Dialysis Therapy. *Journal of Water and Environmental Technology*, 18 (1), 54-61.

Thériault, A. & Duchesne, S. (2015). Quantifying the Fecal Coliform Loads in Urban Watersheds by Hydrologic Modeling: Case Study of the Beauport River Watershed in Quebec. *Water*, 7, 615-633.

Toledo Medrano, R. & Amurrio Derpic, D. (2006) Evaluación de la calidad de las aguas del río Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba-Bolivia. *Acta Nova*, 3 (3), 521-542.

Wear, S.L., Acuña, V. & McDonald, R. (2021). Sewage pollution, declining ecosystem health and cross-sector collaboration. *Biological Conservation*, 255, 109010.