

EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y SEDIMENTOS DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES

Evaluation of pollutants in water and sediments of the San Pedro river in the state of Aguascalientes

G Guzmán-Colis, EM Ramírez-López, F Thalasso, S Rodríguez-Narciso, AL Guerrero-Barrera, FJ Avelar-González ✉

(GGC)(ALGB)(FJAG) Laboratorio de Estudios Ambientales. Centro de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, Aguascalientes 20100 Aguascalientes, México fjavelar@correo.uaa.mx
(EMRL) Departamento de Ingeniería Bioquímica. Centro de Ciencias Básicas. UAA
(SRN) Departamento de Estadística. Centro de Ciencias Básicas. UAA
(FT) Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

Artículo recibido: 10 marzo de 2009, **aceptado:** 28 de febrero de 2011

RESUMEN. El río San Pedro es el principal cuerpo de agua superficial del Estado de Aguascalientes. Cruza la entidad en dirección norte-sur, cubriendo una distancia en línea recta de aproximadamente 90 km, hasta su confluencia con el río Santiago en el Estado de Jalisco. Con la finalidad de estudiar el nivel de contaminación del río y la probable infiltración de contaminantes al acuífero del Valle de Aguascalientes, se tomaron muestras de agua y sedimentos de 50 sitios seleccionados a lo largo del río. Se evaluaron además 17 pozos aledaños al río (a menos de 300 m). Se realizaron dos campañas de muestreo, una en temporada de sequía y otra posterior a las lluvias. Se determinó pH, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO, P-total, N-total, fenoles, anilinas, detergentes (SAAM), coliformes fecales y metales pesados (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn). El agua del río San Pedro presentó elevadas concentraciones de materia orgánica, P-total, N-total, detergentes y coliformes fecales. Algunos sitios mostraron contaminación moderada por Al y Fe. De acuerdo con los criterios de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos, todos los sedimentos presentaron contaminación por As; el 50 % de los mismos por Pb y Zn, el 25 % con Cu y aproximadamente el 13 % con Mn y Cr. Tres sedimentos presentaron contaminación moderada por Fe y otros tres por Hg. Los resultados obtenidos en los pozos de agua no mostraron evidencia concluyente de contaminación del acuífero por aguas superficiales.

Palabras clave: Contaminación agua, metales pesados, sedimentos, río, acuífero.

ABSTRACT. The San Pedro river is the main surface water body in the state of Aguascalientes. It crosses the state from north to south, covering a distance along a straight line of approximately 90 km until it meets the Santiago river in the state of Jalisco. In order to determine the level of pollution in the river and the probable infiltration of pollutants to the aquifer of the valley of Aguascalientes, water and sediment samples were collected from 50 sites along the river. Samples were also taken from 17 wells located near the river (less than 300 m). Two sampling campaigns were carried out, one during the dry season and the other after the rainy season. The pH, dissolved oxygen, BOD₅, COD, total-P, total-N, phenols, anilines, detergents (MBAS), fecal coliforms and heavy metals (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) were determined. The water of the San Pedro river presented high concentrations of organic matter, total-P, total-N, detergents and fecal coliforms. Some sites showed a moderate Al and Fe pollution. According to the United States Environmental Protection Agency criteria, all the sediment samples were polluted by As, 50 % by Pb and Zn, 25 % by Cu, and approximately 13 % by Mn and Cr. Three sediment samples presented a moderate pollution by Fe, and another three by Hg. The results obtained for the wells did not show conclusive evidence of pollution of the aquifer by the surface water.

Key words: Water pollution, heavy metals, sediments, river, aquifer.

INTRODUCCIÓN

El Estado de Aguascalientes se localiza en el centro de la República Mexicana, entre las coordenadas geográficas $21^{\circ} 37'$ a $22^{\circ} 28'$ de latitud norte y $101^{\circ} 50'$ a $103^{\circ} 00'$ de longitud oeste, cuenta con una superficie de $5\,589\text{ km}^2$ (0.28 % del territorio nacional) y una población total de 1 065 416 habitantes (Anónimo 2006). El principal sistema hidrológico de la entidad es el río San Pedro, el cual se circunscribe dentro de la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago-Pacífico (Anónimo 2007). Esta región es una de las reservas de agua más importantes de México, con una superficie aproximada de $77\,000\text{ km}^2$, de la cual 7.2 % está localizada dentro del Estado de Aguascalientes (Santos-Medrano et al. 2007). El río San Pedro nace en la sierra de San Pedro, localizada en el municipio de Ciudad Cuauhtémoc en el Estado de Zacatecas, e ingresa al Estado de Aguascalientes por el municipio de Cosío. Recorre la entidad en dirección norte-sur (aproximadamente 90 km en línea recta) y la abandona por el poblado de Chilarillo en el Estado de Jalisco (Ramírez et al. 2007, Santos-Medrano et al. 2007). De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el río se asienta en una falla geológica con una profundidad promedio de 50 cm, y presenta sedimentos principalmente de tipo arcilloso. En sus márgenes se asientan 50 comunidades y seis cabeceras municipales (incluyendo la capital del Estado), que en conjunto albergan al 80 % de la población del Estado; así como industrias textiles, del vestido, procesadoras de alimentos, automotriz y electrónica (Anónimo 1997).

El crecimiento poblacional (500 % en los últimos 60 años), aunado al desarrollo económico del Estado de Aguascalientes, ha causado fuertes presiones sobre los recursos hídricos (Ramírez et al. 2007). De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la disponibilidad total de agua superficial sólo satisface el 35 % de las necesidades del sector agropecuario, el resto de la demanda de este sector (65 %), además del 100 % de las demandas de los sectores industrial y doméstico, se abastece con agua extraída de los cinco acuíferos de la entidad.

Los cuales globalmente presentan un nivel de sobreexplotación cercano al 100 %, destacando el acuífero del Valle de Aguascalientes (Anónimo 2007). Este acuífero subyace al río San Pedro y su sobreexplotación ha provocado inversiones de flujo y agrietamiento por subsidencia, incrementando las posibilidades de infiltración de contaminantes al acuífero (González 2002). Este riesgo es latente, considerando que la CONAGUA señala que el río no presenta flujo base (Anónimo 2002) y en su cauce son vertidas aproximadamente el 96 % (cerca de 120 Mm^3 por año) de las aguas residuales tratadas (aproximadamente 53.6 Mm^3 al año) y crudas generadas por los diversos sectores del Estado (Anónimo 2007, Ramírez et al. 2007). Estudios previos realizados por el IMTA, han reportado la presencia de compuestos orgánicos persistentes en el cauce principal y varios de sus afluentes (Anónimo 1997). Se ha reportado toxicidad aguda en los principales arroyos y ríos afluentes (Rico-Martínez et al. 2000). Ramírez et al. (2007), en un estudio circunscrito al municipio de Aguascalientes, reporta contaminación con materia orgánica, fósforo total (P_t), nitrógeno total (N_t), detergentes (SAAM) y metales pesados (Al, Cd, Cr, Fe, Hg, Pb y Zn); también observó toxicidad aguda en cerca del 60 % de las muestras de agua. Con respecto a la calidad del agua subterránea, se han observado niveles superiores a la Norma NOM-127-SSA1-1994 de fluoruros, arsénico (As), mercurio (Hg) y plomo (Pb); además de fenoles, SAAM y coliformes fecales (Avelar & Llamas 2000). La contaminación del río San Pedro no sólo constituye un probable riesgo para la salud pública de las comunidades aledañas, es una fuente potencial de contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes, principal suministro de agua potable del Estado. El objetivo del presente trabajo fue extender el estudio de la contaminación del cauce del río San Pedro a todo el estado de Aguascalientes, evaluar su variación temporal y estudiar la posible contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes por aguas superficiales provenientes de este cauce.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se establecieron 50 sitios de muestreo a lo lar-

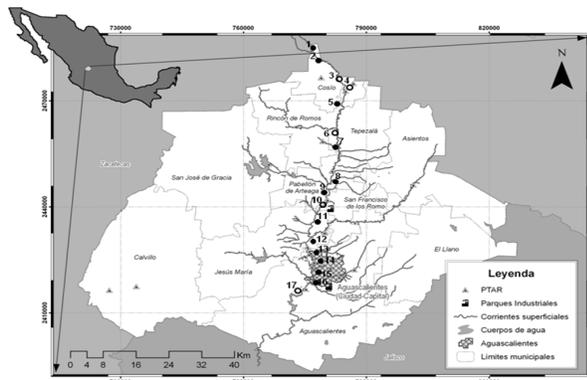


Figura 1. Ubicación de los pozos urbanos (●) y agrícolas (○) aledaños al cauce del río San Pedro.
Figure 1. Localization of urban (●) and agricultural (○) wells near the San Pedro River.

go del cauce del río San Pedro, considerando factores topográficos, geológicos e hidrológicos, además de puntos relevantes de descarga de contaminantes al río. Fueron seleccionados además 17 pozos de agua próximos al cauce del río San Pedro (a menos de 300 m de distancia), los cuales tienen una profundidad entre 200 y 300 m; salvo los dos últimos pozos ubicados al sur de la entidad, cuyas profundidades son de 429 y 90 m, respectivamente. La posición geográfica de todos los sitio de muestreo se determinó con un GPS marca GARMIN, modelo GPS MAP 60c. En la Figura 1 se muestra la localización de los pozos de agua seleccionados, así como la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales y los dos parques industriales con los que cuenta la entidad. En la Figura 2 se observan los sitios de muestreo ubicados en el cauce del río San Pedro. Del total de los sitios de muestreo estudiados, aproximadamente el 50 % fueron estaciones próximas a descargas de origen municipal, 25 % cercanas a descargas de origen industrial y el otro 25 % próximas a descargas de origen agrícola y pecuario. Se realizaron dos muestreos, el primero durante la época de sequía (mayo-junio) y el segundo después de la temporada de lluvias (septiembre-noviembre). En cada sitio de colecta del río San Pedro se to-

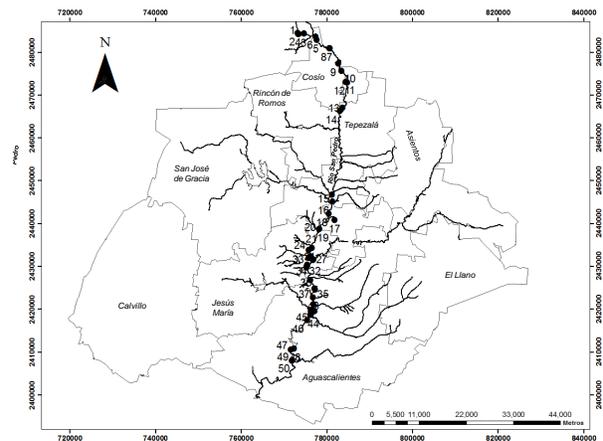


Figura 2. Mapa del Estado de Aguascalientes con la ubicación de los sitios de muestreo seleccionados en el cauce del río San Pedro (●).
Figure 2. Map of the state of Aguascalientes showing the location of the selected sampling sites along the San Pedro river (●).

maron muestras puntuales de agua (4.0 L) y muestras compuestas de sedimentos (500 g). La toma de muestras de sedimentos fue mediante una selección aleatoria simple, colectando muestras de superficie y a 10 cm de profundidad (Anónimo 1993). El agua de los pozos (4.0 L) se recolectó en las estaciones de bombeo, directamente de la llave de toma de muestra, después de desconectar el mecanismo de cloración y purgar el sistema por 15 minutos.

La toma y preservación de las muestras de agua, así como todas las determinaciones analíticas empleadas, se desarrollaron bajo los controles de calidad recomendados por APHA- AWWA-WPCF en los Métodos Normalizados para el análisis de agua y agua residual (Anónimo 1998). A continuación se mencionan los métodos empleados para la determinación de cada uno de los parámetros evaluados, entre paréntesis se indica la clave del método de acuerdo a los Métodos Normalizados para el análisis de agua y agua residual (Anónimo 1998). En campo se determinó el pH (método 4500-H+ B, equipo marca HACH modelo EC10) y el oxígeno disuelto (método 4500-O G, equipo HACH modelo DO175). A las muestras de agua colectadas se les determinó DBO₅ (5210 B), DQO por el método de reflujos cerrados y colorimetría (5220 D), nitrógeno

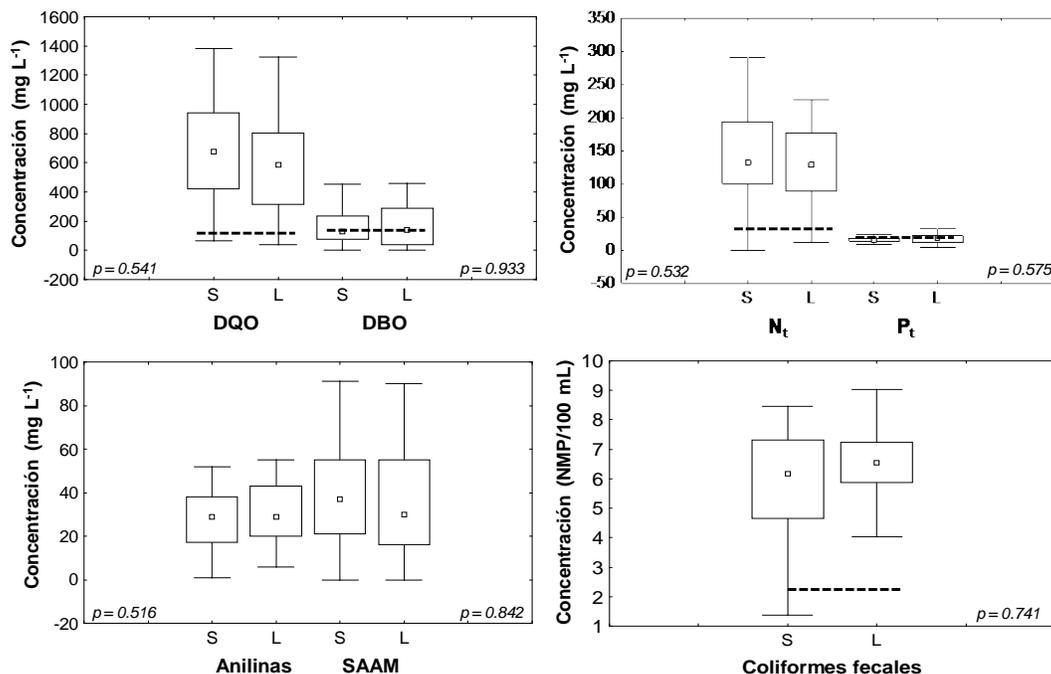


Figura 3. Análisis estadístico de las muestras de agua del cauce del río San Pedro en la época de sequía (S) y posterior a las lluvias (L). Se muestra la mediana (\square), los cuartiles Q1 y Q3 (\square) y el intervalo de concentraciones sin datos aberrantes (I). La línea punteada señala los LMP señalados en las normas oficiales mexicanas (Anónimo 1996; Anónimo 1997a). Los valores de $p > 0.05$ indican que no existe diferencia significativa entre las campañas de muestreo (Mann-Whitney, $P = 5\%$).

Figure 3. Statistical analysis of the water samples of the San Pedro river in the dry season (S) and after the rains (L). Shown are the medium values (\square), the Q1 and Q3 quartiles (\square) and the range of non-outlier concentrations (I). The dotted line indicates the PML of the official Mexican norm (Anonymous 1996; Anonymous 1997a). The values of $p > 0.05$ indicate that there is no significant difference among the sampling campaigns (Mann-Whitney, $P = 5\%$).

total (N_t) por microKjeldahl (4500-Norg B), fósforo total (P_t) por el método del ácido ascórbico (4500-P E), detergentes como sustancias activas al azul de metileno (SAAM, 5540 C), fenoles por el método de la 4-aminoantipirina y extracción clorofórmica (5530 C), anilinas por el método colorimétrico de Hess *et al.* (1993) y coliformes fecales por el método del NMP (9221 C). Los metales fueron cuantificados por medio de espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer Analyst 100. Dependiendo de la sensibilidad requerida, se empleó la modalidad de horno de grafito (3113 B) o flama (3111 B) para determinar Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En las determinaciones por flama, a fin de incrementar la sensibilidad del método, las muestras fueron concentradas 10 veces durante el proceso de digestión. El As fue cuantificado por la modalidad de generación de hidruros (3114 B)

y Hg por vapor frío (3112 B). Las determinaciones se realizaron por triplicado, en cada lote se utilizó una muestra fortificada al azar (porcentaje de recuperación entre 85 y 115 %) y duplicados al azar (coeficiente de variación menor al 15 %). Los métodos se validaron empleando el material de referencia SRM 1643d del US National Institute of Standards and Technology (NIST).

Las muestras de sedimentos fueron sometidas a un tratamiento de lixiviometría, mediante una modificación del método propuesto por Robledo y Maldonado (1997). Los sedimentos fueron secados a 50°C por 72 h, seguido de una homogenización en un mortero de porcelana con mazo de madera y posteriormente fueron tamizados en una malla de 1.0 mm. Para obtener los extractos se agregó 5.0 g de muestra tratada a 800 ml de agua destilada. La mezcla se mantuvo en agitación durante 24 h

y finalmente fue filtrada. A partir de los extractos obtenidos se determinó pH, DQO, N_t , P_t y tóxicos orgánicos (fenoles, anilinas y SAAM), siguiendo los métodos antes mencionados. La determinación de metales pesados se realizó de acuerdo con los métodos propuestos por la USEPA (Anónimo 1991), empleando los controles de calidad recomendados y el material de referencia RM 8704 (Buffalo River Sediments) del US NIST.

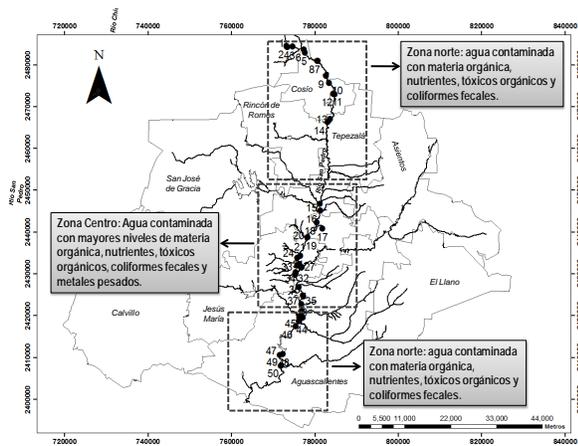


Figura 4. Distribución de los principales contaminantes observados en el agua del río San Pedro. El Estado de Aguascalientes se dividió en tres Zonas. Sitios de muestreo (●).

Figure 4. Distribution of the main pollutants observed in the water of the San Pedro river. The state of Aguascalientes was divided into three Zones. Sampling sites (●).

Se realizó un análisis de estadística descriptiva a los resultados obtenidos del cauce del río (mediana, cuartiles y valores máximos) y un análisis de correlación entre agua y sedimentos. Ambos análisis se realizaron empleando el programa de STATISTICA v 7. Para determinar diferencias significativas entre las campañas de muestreo evaluadas, se realizó la prueba de Mann-Whitney ($P < 0.05$) con MINITAB 14 (Silva *et al.* 2002). Para evaluar la calidad del agua del río San Pedro se emplearon los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-001-1989) en el rubro de riego agrícola (Anónimo 1989) y los límites máximos permisibles (LMP) publicados en las normas oficiales mexicanas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-003-ECOL-1997 (Anónimo 1996, 1997a). En el caso de los sedimentos fueron considerados como referencia los valores

señalados por la Agencia de Protección al Ambiente de USA (Anónimo 1977) y las concentraciones de referencia totales (CR_T) indicadas en la norma mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Anónimo 2004). Las muestras de agua de los pozos fueron valuadas a partir de los LMP publicados en la norma oficial para agua de consumo humano NOM-127-SSA1-1994 (Anónimo 1994). Los parámetros que no están incluidos en ninguna de las referencias anteriores fueron comparados de manera individual con valores de referencia de otros trabajos u organizaciones, y se comentan en el apartado de discusión.

RESULTADOS

Muestras de agua del Río San Pedro

Todas las muestras de agua del río San Pedro presentaron valores de pH entre 6.0 y 8.5, dentro de los LMP (5.0 - 10) señalados en la NOM-001-ECOL-1996 (Anónimo 1996). Las concentraciones de materia orgánica (DQO y DBO_5) fueron en general elevadas a lo largo del cauce, su presencia se debe principalmente a las descargas residuales de origen municipal que son vertidas al río sin tratamiento previo (Ramírez *et al.* 2007). El 90% de las estaciones de colecta tuvieron concentraciones de DQO por arriba del LMP (100 mg L^{-1}) señalado para descargas a ríos y embalses en la norma oficial mexicana 001-ECOL-1996 (Anónimo 1996); las medianas se encontraron entre 700 y 600 mg L^{-1} , con valores máximos que alcanzaron los 1 400 mg L^{-1} (estaciones de colecta de la 15 a la 19). De acuerdo con esta misma referencia, el 50% de los sitios evaluados sobrepasaron los LMP de DBO_5 (150 mg L^{-1}) y P_t (20 mg L^{-1}). Los sitios más impactados por estos contaminantes se ubicaron en la zona centro de la entidad (del punto 15 hasta el 27) con concentraciones máximas de 500 y 40 mg L^{-1} para DBO_5 y P_t , respectivamente (Figura 3). En general, las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) fueron menores a 1.0 mg L^{-1} , en correspondencia con las elevadas concentraciones de materia orgánica, únicamente los sitios ubicados cerca de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (estaciones de colecta 16 y 44), presentan altas concentraciones de OD (aproximadamente 5.0

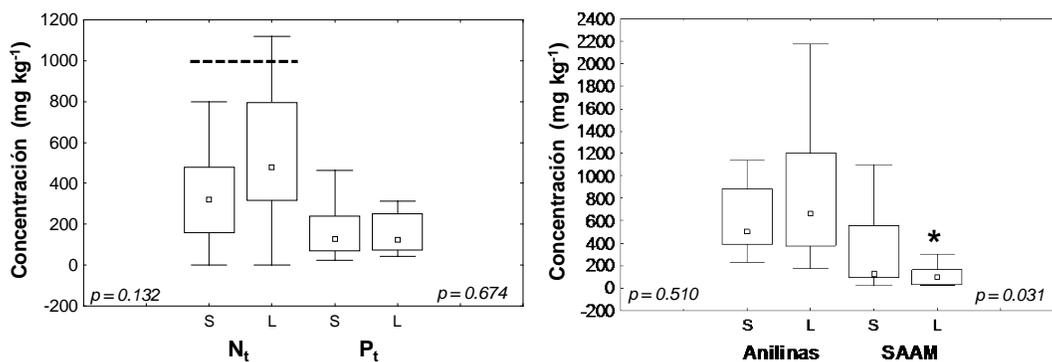


Figura 5. Análisis estadístico de las muestras de sedimentos del cauce del río San Pedro en la época de sequía (S) y posterior a las lluvias (L). Se muestra la mediana (\square), los cuartiles Q1 y Q3 (\square) y el intervalo de concentraciones sin datos aberrantes (I). La línea punteada señala el límite inferior para considerarlo “moderadamente contaminado” de acuerdo a la agencia norteamericana (Anónimo 1977). Los valores de $p > 0.05$ indican que no existe diferencia significativa entre las campañas de muestreo (Mann-Whitney, $P = 5\%$). * Diferencia significativa. **Figure 5.** Statistical analysis of the sediment samples of the San Pedro river in the dry season (S) and after the rains (L). Shown are the medium values (\square), the Q1 and Q3 quartiles (\square) and the range of non-outlier concentrations (I). The dotted line indicates the low limit to consider the value “moderately polluted” according to the USEPA (Anonymous 1977). The values of $p > 0.05$ indicate there is no significant difference among the sampling campaigns (Mann-Whitney, $P = 5\%$). * Significant difference.

mg L⁻¹) y una carga orgánica baja (concentraciones de DBO₅ y DQO menores a 10 mg L⁻¹). En el 75 % de los puntos evaluados (localizados de forma irregular en todo el cauce), los valores de N_t superaron entre 2.5 y 6.5 veces el LMP (40 mg L⁻¹) señalado en la norma oficial mexicana 001-ECOL-1996 (Anónimo 1996); los valores máximos observados fueron cercanos a los 300 mg L⁻¹ (sitios 7 y 19). Los nutrientes N_t y P_t provienen principalmente de las aguas de retorno de los campos agrícolas y en segundo término de descargas municipales. Se observaron también concentraciones elevadas en las estaciones de colecta próximas a descarga de rastros municipales, ubicados en San Francisco de los Romo y Jesús María. Las concentraciones de fenoles en todos los sitios fueron menores de 0.8 mg L⁻¹. Las concentraciones medianas de anilinas y SAAM fueron alrededor de 30 mg L⁻¹, con niveles máximos de anilinas cercanos a los 50 mg L⁻¹ (sitios 17, 20 y 29) y niveles máximos de SAAM de 90 mg L⁻¹ (sitios 18 y 29). Pese a que no existen valores de referencia mexicanos para estos compuestos, su origen es principalmente antropogénico y aportan evidencia sobre contaminación de origen industrial. Esto coincide con la ubicación al Parque Industrial del Valle de Aguascalientes (sitio 17, Figura 1). El valor de las concentraciones medianas de coliformes

fecales fue alrededor de 3.16 × 10⁶ NMP/100 mL, sobrepasando por más de cuatro órdenes de magnitud el LMP (240 NMP/100 mL) para reuso en servicios al público con contacto directo, señalado en la NOM-003-ECOL-1997 (Anónimo 1997a). Únicamente las estaciones próximas a descargas de plantas de tratamiento (16 y 44) presentaron concentraciones de coliformes por debajo del LMP. El resto refleja descargas de aguas residuales municipales sin tratamiento, ya que los coliformes fecales son el principal indicador de descargas sanitarias. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos antes mencionados se muestran en gráficas de cajas y bigotes (Figura 3). Los valores de p obtenidos en la prueba de Mann-Whitney fueron mayores a 0.05 (Figura 3), indicando que las concentraciones de estos parámetros no mostraron cambios significativos entre la campaña de muestreo realizada en la época de sequía y la campaña realizada después del periodo de lluvias.

En todas las muestras de agua, las concentraciones de Cd y Pb fueron inferiores al límite de detección (0.003 y 0.045 mg L⁻¹ respectivamente). Las concentraciones de As, Cr, Cu, Hg y Zn fueron menores a los LMP señalados en la NOM-001-ECOL-1996 (Anónimo 1996) en todos los sitios de muestreo (Tabla 1). Los valores máximos de Al y Fe

fueron 7.40 y 8.86 mg L⁻¹ respectivamente, sobrepasando los LMP (5 mg L⁻¹ para ambos metales) de los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989) en dos (17 y 29) y cuatro (17, 19, 20 y 36) de los sitios evaluados, respectivamente. Estos sitios se ubican aguas abajo y próximos del parque industrial del Valle de Aguascalientes. Las concentraciones medianas de Mn fueron de 0.05 mg L⁻¹, con máximos hasta de 1.01 mg L⁻¹ (sitios 5 y 29). No se cuenta con normas de referencia mexicanas para este metal; sin embargo, el valor de referencia de acuerdo a la OMS es de 0.4 mg L⁻¹ y valores superiores habitualmente están asociados a contaminación industrial (Anónimo 2003). En general, las concentraciones más altas de metales pesados fueron observadas en la zona centro de la entidad (parte de los municipios de Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo, Jesús María y la zona norte de la Ciudad de Aguascalientes), donde se ubica la mayor actividad industrial. El contenido de metales en el agua fue mayor en la época de sequía (mayo-junio), mostrando diferencias significativas entre la campaña de muestreo posterior a las lluvias (Mann-Whitney; p < 0.05). Lo cual se explica por un efecto de dilución derivado de las lluvias (promedio mensual de 162.7 mm, Anónimo 2007). De acuerdo con los resultados anteriores, se observó contaminación del agua por materia orgánica, nutrientes (N_t y P_t), tóxicos orgánicos (anilinas y SAAM) y coliformes fecales, en todo el cauce del río San Pedro. Los niveles más elevados de contaminación, incluyendo los metales pesados, se observaron en la zona centro de la entidad (Figura 4), coincidiendo con la ubicación de la mayor parte de la población y la actividad industrial.

Muestras de sedimentos del Río San Pedro

En los sedimentos, el pH osciló entre 7.0 y 8.5, con medianas alrededor de 7.7. Las concentraciones medianas de DQO fueron aproximadamente de 8 000 mg kg⁻¹, con máximos de 60 000 mg kg⁻¹ (observados en la zona norte de la entidad). Las medianas de las concentraciones de P_t, anilinas y SAAM (Figura 5) estuvieron aproximadamente en 130, 600 y 100 mg kg⁻¹, respectivamente. Los valores máximos observados de P_t (hasta 500 mg kg⁻¹)

y anilinas (hasta 2 200 mg kg⁻¹) se presentaron en la zona centro. Los valores más altos de SAAM (1 200 mg kg⁻¹) fueron observados aguas abajo de la ciudad de Aguascalientes (zona sur). Pese a no contar con valores de referencia de estos compuestos, el P_t suele provenir de desechos municipales y agrícolas, la presencia de SAAM implica contaminación antropogénica y las anilinas provienen principalmente de la actividad industrial, lo cual aporta evidencia sobre el nivel de alteración por actividades humanas. Las concentraciones medianas de N_t fueron alrededor de 400 mg kg⁻¹ (Figura 5). De acuerdo con los criterios señalados por la USEPA (Anónimo 1977), únicamente el sitio 27 se encontró "moderadamente contaminado" con este nutriente (1 000 - 2 000 mg kg⁻¹). Este sitio corresponde a la confluencia del río San Pedro con su principal afluente, el río Chicalote, en cuyos márgenes se ubican importantes industrias agropecuarias, lo cual explica los elevados niveles de N_t en la zona (Figura 6).

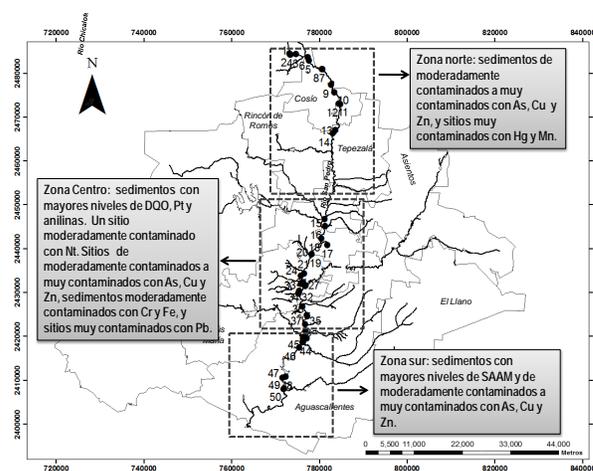


Figura 6. Distribución de los principales contaminantes observados en los sedimentos del río San Pedro. El Estado de Aguascalientes se dividió en tres Zonas. Sitios de muestreo (●).

Figure 6. Distribution of the main pollutants observed in the sediments of the San Pedro river. The state of Aguascalientes was divided into three Zones. Sampling sites (●).

Al igual que en las muestras de agua, tampoco se detectó Cd en ninguna de las muestras de sedimentos. Las concentraciones medianas de Al fueron aproximadamente de 6 000 y 4 000 mg kg⁻¹ (Tabla 2), y el valor máximo fue 45 000 mg kg⁻¹ en un

Tabla 1. Análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua del río San Pedro y comparación con los valores de referencia.

Table 1. Statistical analysis of the heavy metal concentrations in the water samples of the San Pedro river and a comparison with the reference values.

Metal	Campaña de muestreo	Q1 (mg L ⁻¹)	Mediana (mg L ⁻¹)	Q3 (mg L ⁻¹)	Máximo (mg L ⁻¹)	Valor de referencia ¹ (mg L ⁻¹)
Al	S*	0.138	0.770	2.088	7.400	5.0 ^{ce}
	L	ND	ND	0.103	4.780	
As	S*	0.010	0.010	0.013	0.030	0.2
	L	ND	ND	0.002	0.020	
Cr	S*	ND	0.010	0.010	0.460	1.0
	L	ND	ND	0.010	0.010	
Cu	S*	ND	0.013	0.040	0.110	4.0
	L	ND	ND	0.006	0.100	
Fe	S*	0.260	0.765	2.240	8.860	5.0 ^{ce}
	L	ND	ND	0.288	3.790	
Hg	S*	ND	0.001	0.001	0.004	0.01
	L	ND	ND	0.002	0.003	
Mn	S*	0.030	0.050	0.133	1.010	—
	L	ND	ND	0.042	0.440	
Zn	S*	0.478	0.100	0.152	0.560	10.0
	L	ND	0.002	0.045	0.460	

¹LMP señalado en la NOM-001-ECOL-1996 (Anónimo 1996). ^{ce} LMP de los criterio ecológicos para uso agrícola (Anónimo 1989). ND: No Detectable. S: Sequía. L: Lluvia. * Diferencia significativa entre campañas de muestreo (Mann-Whitney; P = 0.05). En negritas las concentraciones que sobrepasan los valores de referencia.

punto de la zona centro (sitio 21), inferior al criterio (71 000 mg kg⁻¹) señalado por Lindsay (1979) para considerar a los sedimentos contaminados por este metal. Más del 50 % de los sedimentos (Tabla 2) presentaron concentraciones de As entre 0.5 a 10 veces superiores al criterio establecido por la USEPA (Anónimo 1977) como “muy contaminado” (> 8.0 mg kg⁻¹); estos sitios se encontraron dispersos en todo el cauce. En el resto de los sedimentos se observaron concentraciones en el nivel de “moderadamente contaminado” (2.0 a 8.0 mg kg⁻¹). Con respecto al Cu y Zn, el 25 % de los sitios se encontraron “moderadamente contaminados” (25 a 50 mg kg⁻¹ para Cu y 90 a 200 mg kg⁻¹ para Zn) y “muy contaminados” (más de 50 mg kg⁻¹ para Cu y más de 200 mg kg⁻¹ para Zn). También estos sitios se encontraron dispersos por todo el cauce. El 13 % de los sedimentos estuvieron “moderadamente contaminados” por Cr (de 25 a 75 mg kg⁻¹) y Fe (de 17 000 a 25 000 mg kg⁻¹); en ambos casos los sitios se ubicaron en la zona centro del estado. El 10 % de los sitios se observaron “muy contaminados” con Hg (> 1 mg kg⁻¹), Mn (> 500 mg kg⁻¹) y Pb (> 60 mg

kg⁻¹). Los sitios muy contaminados por Hg y Mn se presentaron en la zona norte, mientras que los muy contaminados por Pb se observaron en la zona centro. En la Figura 6 se muestra la distribución de la contaminación de sedimentos por estos metales en la entidad. Considerando las concentraciones de referencia totales (CR_T), señaladas para remediación de suelo para uso agrícola/residencial en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Anónimo 2004), únicamente el 25 % de los sitios sobrepasaron la concentración de referencia de As (22 mg kg⁻¹). En todos los sitios, los metales Cd, Cr, Hg y Pb estuvieron por debajo de las CR_T (37, 280, 23 y 400 mg kg⁻¹, respectivamente). En las muestras de sedimentos, únicamente las concentraciones de SAAM mostraron diferencias significativas entre las campañas de muestreo evaluadas (Mann-Whitney; p < 0.05). El análisis de correlación entre las concentraciones de los contaminantes en agua y sedimentos mostró coeficientes de correlación (r²) por debajo de 0.35 en todos los casos (Tabla 3). Lo cual indica que la correlación de contaminantes encontrados en agua y sedimentos no es significativa.

Tabla 2. Análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en las muestras de sedimentos del río San Pedro y comparación con los valores de referencia.

Table 2. Statistical analysis of the heavy metal concentrations in the sediment samples of the San Pedro river and a comparison with the reference values.

Metal	Campaña de muestreo	Q1 (mg kg ⁻¹)	Mediana (mg kg ⁻¹)	Q3 (mg kg ⁻¹)	Máximo (mg kg ⁻¹)	Valor de referencia ¹ (mg kg ⁻¹)		CR _T ² (mg kg ⁻¹)
						Moderadamente contaminado	Muy contaminado	
Al	S	3836	5969	11696	44611	—	—	—
	L	3466	4445	6431	39136	—	—	—
As	S	7.141	17.460	32.212	56.803	2.0 - 8.0	> 8	22
	L	6.790	12.391	23.505	86.808	—	> 8	—
Cd	S	ND	ND	ND	3	—	> 6	37
	L	ND	ND	ND	0.3	—	> 6	—
Cr	S	4.231	9.890	14.406	32.606	25 - 75	> 75	280
	L	4.194	6.902	10.164	31.405	—	> 75	—
Cu	S	8.372	17.961	41.381	167.600	25 - 50	> 50	—
	L	8.985	20.525	37.955	116.607	—	> 50	—
Fe	S	4695	7827	11598	23615	17000 - 25000	> 25000	—
	L	4589	6318	8034	16311	—	> 25000	—
Hg	S	0.230	0.333	0.615	4.900	—	1	23
	L	0.311	0.367	0.483	0.909	—	1	—
Mn	S	125.570	181.931	246.022	517.904	300 - 500	> 500	—
	L	131.742	185.654	221.078	759.900	—	> 500	—
Pb	S	11.253	22.155	27.843	126.300	40 - 60	> 60	400
	L	14.681	19.448	27.832	91.805	—	> 60	—
Zn	S	38.634	97.811	284.691	903.701	90 - 200	> 200	—
	L	50.623	88.753	260.326	745.609	—	> 200	—

¹ Límite señalado por la USEPA (Anónimo 1977). ² Concentración de referencia total de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Anónimo 2004). ND: No Detectable. S: Sequía. L: Lluvia. En negritas las concentraciones que sobrepasan los valores de referencia.

Pozos de agua

Todos los pozos evaluados fueron pozos profundos, las muestras de agua se obtuvieron directamente de la llave de muestreo. Las muestras no presentaron concentraciones de materia orgánica ni tóxicos orgánicos por arriba del límite de detección de las técnicas empleadas (0.2 mg L⁻¹ de DQO, 0.5 mg L⁻¹ de DBO, 1 µg L⁻¹ de fenoles y 50 µg L⁻¹ de SAAM). únicamente en dos pozos agrícolas (10 y 17) se observaron concentraciones de P_t cercanas a 3.0 mg L⁻¹, y en estos mismos pozos el contenido de N_t fue alrededor de 6.0 mg L⁻¹. Además, en el pozo 10, la concentración de coliformes fecales fue 1 100 NMP/100 mL, 10 % superior al LMP establecido en los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989) para agua de uso agrícola (1 000 NMP/100 mL). Con respecto a los metales pesados (Tabla 4), dos pozos agrícolas (3 y 4) y un pozo urbano (7) sobrepasaron hasta 2.0

veces el LMP (0.025 mg L⁻¹) para As en la norma mexicana para agua de consumo humano (Anónimo 1994). Sin embargo, en ninguno de estos pozos la concentración de As sobrepasó el LMP (0.1 mg L⁻¹) señalado en los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989). Dos pozos (pozo urbano 9 y agrícola 10) mostraron concentraciones de Fe hasta un 70 % mayor que el LMP (0.3 mg L⁻¹) señalado en la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Anónimo 1994). De acuerdo con la referencia anterior, dos pozos de suministro a la población (pozos 12 y 14) duplicaron el LMP para Hg (0.001 mg L⁻¹). La concentración máxima (0.004 mg L⁻¹) de este metal se observó en un pozo agrícola (pozo 17). Los niveles de Mn en los pozos urbanos no sobrepasaron el LMP (0.15 mg L⁻¹) de la norma para agua de consumo humano (Anónimo 1994). Sin embargo, el pozo agrícola número 10 presentó concentraciones de Mn hasta cuatro veces superiores al LMP.

Tabla 3. Coeficientes de correlación (r^2) de los parámetros fisicoquímicos y metales pesados entre las concentraciones observadas en agua y sedimentos del cauce del río San Pedro.

Table 3. Correlation coefficients (r^2) of the physicochemical parameters and heavy metals among the concentrations observed in the water and sediments of the San Pedro river.

Campaña de Muestreo	Parámetros fisicoquímicos							
	DQO	DBO	PT	NT	Anilinas	SAAM	Fenoles	
Sequía	-0.082	0.122	0.004	0.327	-0.051	0.083	0.033	
Lluvia	0.251	0.295	0.293	0.072	-0.011	-0.142	-0.086	
Campaña de Muestreo	Metales Pesados							
	Al	As	Cu	Cr	Fe	Hg	Mn	Zn
Sequía	-0.200	0.352	-0.091	-0.236	-0.171	-0.042	-0.204	-0.157
Lluvia	0.0340	-0.032	-0.025	-0.032	-0.029	-0.260	-0.073	-0.261

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente trabajo en todo el cauce del Río San Pedro coinciden con el estudio realizado por Ramírez *et al.* (2007) en el tramo del río comprendido en el municipio de Aguascalientes. Se observó un marcado deterioro de la calidad del agua, provocado principalmente por las descargas de aguas residuales sin tratar, de origen municipal, agropecuario e industrial (Jáuregui-Medina *et al.* 2007). El 50 % de las muestras de agua sobrepasaron el LMP de referencia para dos o más parámetros de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos y coliformes fecales. Las concentraciones máximas de DBO_5 , P_t y N_t fueron hasta 7.5 veces superiores a los LMP establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 (150, 20 y 40 $mg L^{-1}$, respectivamente) para uso público urbano (Anónimo 1996), mientras que los valores de DQO fueron hasta 14 veces superiores al LMP señalado para descargas a ríos y embalses en la misma norma (100 $mg L^{-1}$). Estos elevados niveles de materia orgánica son congruentes con las bajas concentraciones de OD (menores a 1.0 $mg L^{-1}$) observadas en el 94 % de las estaciones de colecta, dado que la disminución del OD está asociada a su consumo por parte de los organismos heterótrofos aerobios durante el proceso de oxidación de la materia orgánica (Martínez *et al.* 2001). Los altos niveles de nutrientes también contribuyen a la disminución del OD, dado que inducen la eutrofización de los cuerpos de agua y la proliferación, muerte y descomposición de los productores primarios, lo cual conduce a una marcada disminución del

OD (Camargo & Alonso 2007).

Los resultados obtenidos en el presente trabajo en todo el cauce del Río San Pedro coinciden con el estudio realizado por Ramírez *et al.* (2007) en tramo del río comprendido en el municipio de Aguascalientes. Se observó un marcado deterioro de la calidad del agua, provocado principalmente por las descargas de aguas residuales sin tratar, de origen municipal, agropecuario e industrial (Jáuregui-Medina *et al.* 2007). El 50 % de las muestras de agua sobrepasaron el LMP de referencia para dos o más parámetros de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos y coliformes fecales. Las concentraciones máximas de DBO_5 , P_t y N_t fueron hasta 7.5 veces superiores a los LMP establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 (150, 20 y 40 $mg L^{-1}$, respectivamente) para uso público urbano (Anónimo 1996), mientras que los valores de DQO fueron hasta 14 veces superiores al LMP señalado para descargas a ríos y embalses en la misma norma (100 $mg L^{-1}$). Estos elevados niveles de materia orgánica son congruentes con las bajas concentraciones de OD (menores a 1.0 $mg L^{-1}$) observadas en el 94 % de las estaciones de colecta, dado que la disminución del OD está asociada a su consumo por parte de los organismos heterótrofos aerobios durante el proceso de oxidación de la materia orgánica (Martínez *et al.* 2001). Los altos niveles de nutrientes también contribuyen a la disminución del OD, dado que inducen la eutrofización de los cuerpos de agua y la proliferación, muerte y descomposición de los productores primarios, lo cual conduce a una marcada disminución del OD (Camargo & Alonso 2007).

Tabla 4. Análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en los pozos de agua y comparación con los valores de referencia.

Table 4. Statistical analysis of the heavy metals concentrations in the water wells and a comparison with the reference values.

Metal	Campaña de muestreo	Mínimo (mg L ⁻¹)	Mediana (mg L ⁻¹)	Máximo (mg L ⁻¹)	Valor de referencia ¹ (mg L ⁻¹)
As	S	0.001	0.014	0.051	0.025
	L	ND	0.013	0.042	0.100 ^{ce}
Fe	S	ND	ND	0.872	1.000
	L	ND	ND	1.700	
Hg	S	ND	ND	0.004	0.001
	L	ND	ND	0.002	
Mn	S	ND	ND	0.731	0.150
	L	ND	ND	0.602	
Zn	S	ND	ND	0.016	5.000
	L	ND	ND	0.600	

¹ LMP señalado en la NOM-127-SSA1-1994 (Anónimo 1994). ^{ce} LMP para uso agrícola indicado en los criterios ecológicos (Anónimo 1989). ND: No Detectable. S: Sequía. L: Lluvia. *Diferencia significativa entre campañas de muestreo (Mann-Whitney, P = 0.05). En negritas las concentraciones que sobrepasan los valores de referencia.

Las altas concentraciones de materia orgánica observadas en los sedimentos del río San Pedro (hasta 60 000 mg kg⁻¹ de DQO), no representan por sí mismas un indicador concluyente de contaminación, dado que en condiciones naturales los sedimentos de ríos o lagos pueden contener grandes cantidades de materia orgánica (Jian-feng *et al.* 2009). En general, las concentraciones de N_t en los sedimentos no sobrepasaron el criterio de referencia de USEPA (Anónimo 1977); únicamente un sitio presentó niveles catalogados como “moderadamente contaminado” (1 000 a 2 000 mg kg⁻¹). No obstante, la presencia de concentraciones significativas de N_t (medianas del orden de 400 mg kg⁻¹), aunado al elevado contenido de materia orgánica presente en los sedimentos, favorece la acumulación de aminos y nitritos, que a su vez conducen a la formación de nitrosaminas, las cuales son sustancias cancerígenas (Seoanez 1999). Devesa-Rey *et al.* (2008) señalan que el fósforo ejerce una influencia significativa sobre la geoquímica del As, compitiendo con este metaloide por sitios de adsorción en los sedimentos; lo cual favorece la liberación de As a la columna de agua. Considerando los altos niveles de As en los sedimentos (entre 7.0 y 86 mg kg⁻¹) y las significativas concentraciones de P_t (medianas cercanas a 100 mg kg⁻¹) implican un mayor riesgo

de liberación de As hacia la columna de agua. Pese a no existir criterios de referencia, dada la naturaleza antropogénica de los detergentes medidos como SAAM y del origen principalmente industrial de las anilinas, las significativas concentraciones de estos compuestos en suelo y sedimentos del río San Pedro (de 100 a 1 200 mg kg⁻¹ para SAAM y 200 a 2 200 mg kg⁻¹) demuestran un claro efecto adverso de las actividades humanas sobre el cauce y la acumulación de compuestos tóxicos en los sedimentos. Los detergentes pueden estabilizarse en los sedimentos por periodos de hasta tres o cuatro años sin descomponerse (Seoanez 1999). La principal problemática de contaminación por metales en los sedimentos fue por As, Cu y Zn; seguido de Pb y Cr, y por último Fe y Hg con apenas tres sitios contaminados. De acuerdo con los límites señalados por la USEPA (Tabla 2, Anónimo 1977), el 75 % de los sedimentos estuvieron “muy contaminados” por As (concentraciones por arriba de 8.0 mg kg⁻¹) y el 25 % restante en el nivel de “moderadamente contaminado” (niveles entre 2.0 y 8.0 mg kg⁻¹). Su elevado contenido en todos los sedimentos y su distribución irregular a lo largo del cauce sugieren que el origen principal del As es geogénico (Avelar & Llamas 2000). De acuerdo con los criterios de la procuraduría mexicana para la protección del ambiente (PROFEPA), el

50 % de los sitios presentaron niveles que implican riesgo para la salud humana y riesgo ecológico (20 mg kg^{-1} , Anónimo 2000). En el 75 % de los casos el Cu mostró niveles de “moderadamente contaminados” (25 a 50 mg kg^{-1}) a “muy contaminados” ($> 50 \text{ mg kg}^{-1}$); su probable origen también es geogénico. De acuerdo con Moreno (2003), el Zn se encuentra de forma natural en el medio ambiente y puede presentar niveles significativos en el medio acuático debido a las deyecciones de animales y personas. Esto se refleja en el 50 % de los sitios, los cuales se encontraron “muy contaminados” por Zn ($> 200 \text{ mg kg}^{-1}$), y distribuidos de manera irregular a lo largo del cauce. Dos sitios superaron 800 mg kg^{-1} de Zn, considerado por la PROFEPA como riesgo ecológico (Anónimo 2000). El 25 % de los sedimentos estuvieron “moderadamente contaminados” con Cr (25 a 75 mg kg^{-1}). Su presencia suele ser de origen industrial (Hernández et al. 2000); lo cual concuerda con la ubicación de dos industrias dedicadas a la galvanoplastia y otras tres empresas de teñidos textiles en el parque industrial del Valle de Aguascalientes. El Pb es ampliamente utilizado en diferentes procesos industriales, llega a los ríos en descargas de aguas residuales y escurrimientos urbanos (Lima et al. 2005). De acuerdo con Navarro et al. (1998), este metal tiende a absorberse por el material arcillosos y la materia orgánica. Lo cual se reflejó en el 25 % de los sedimentos, con concentraciones en el nivel de “muy contaminado” ($> 60 \text{ mg kg}^{-1}$). Un sitio presentó riesgo ecológico (100 mg kg^{-1} de Pb) de acuerdo con la PROFEPA (Anónimo 2000). Tres sedimentos alcanzaron un nivel de “muy contaminado” (más de 1.0 mg kg^{-1}) con Hg. Las altas concentraciones de este metal observadas por Avelar & Llamas (2000) en agua de pozos profundos (hasta 0.005 mg L^{-1}) sugieren un probable origen geogénico. Otros tres sedimentos mostraron niveles de “moderadamente contaminados” (de $17\ 000$ a $25\ 000 \text{ mg kg}^{-1}$) por Fe, y de acuerdo con la PROFEPA (Anónimo 2000), uno de ellos presenta riesgo a la salud humana (más de $23\ 000 \text{ mg kg}^{-1}$). No se observaron correlaciones significativas entre las concentraciones de los contaminantes evaluados en muestras de agua y sedimentos del cauce del río San Pedro. No obstante, los niveles de materia or-

gánica, N_t , P_t , SAAM y anilinas fueron en general acordes en ambas matrices (Figuras 2 y 4). Con respecto a los metales, la problemática de contaminación observada en los sedimentos fue muy superior a la observada en el agua. Las condiciones observadas en los sedimentos, pH superiores a 6.0 y altos niveles de materia orgánica y detergentes, favorecen la acumulación de metales en los sedimentos (Petrovich et al. 1999; Schuling et al. 1999; Jian-feng et al. 2009); lo cual permite explicar la disparidad encontrada en la problemática de contaminación por metales en el agua y sedimentos del río.

Las altas concentraciones de coliformes fecales en todo el cauce, hasta 40 veces superiores al LMP por la NOM-003-ECOL-1997 para uso público con contacto directo ($240 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$), se explican por la importante presencia de aguas residuales de origen municipal y pecuario sin tratamiento. Estos resultados implican un evidente riesgo sanitario, situación frecuente en ríos que reciben descargas de grandes zonas urbanas (Rivera-Vázquez et al. 2007). A pesar de no disponer de valores de referencia para SAAM, el origen antropogénico de estos detergentes y el hecho de que son los principales surfactantes de uso doméstico, sus niveles aportan evidencia sobre la contaminación de origen municipal. De acuerdo con el IMTA, las concentraciones típicas de SAAM en los efluentes municipales son de 12 a 16 mg L^{-1} (Anónimo 1997); en contraste, las concentraciones medianas en el río San Pedro fueron dos veces mayores (30 mg L^{-1}), con máximos de 90 mg L^{-1} . Estos resultados muestran un alto grado de contaminación por SAAM y al igual que los indicadores de materia orgánica, nutrientes y coliformes fecales, son congruentes con la presencia de descargas municipales sin tratar. De acuerdo con Metcalf & Eddy, las concentraciones típicas de anilinas y fenoles en aguas residuales municipales son 10 y 3.5 mg L^{-1} , respectivamente (Anónimo 1995). Se observaron concentraciones medianas de anilinas superiores a los 30 mg L^{-1} y valores máximos cercanos a 60 mg L^{-1} , coincidiendo las concentraciones más altas en la zona centro del estado, donde se ubican las zonas industriales. La presencia en la zona de industrias del teñido, las cuales emplean colorantes a base de anilina, permite explicar

estos resultados. En el caso de los fenoles, no se observó una problemática de contaminación relevante. Tampoco se observó una problemática significativa de contaminación por metales en el agua del río San Pedro. En general, a lo largo de todo el cauce, las concentraciones de As, Cr, Cu, Hg y Zn fueron inferiores a los LMP para agua de uso agrícola, señalados en la norma mexicana 001-ECOL -1996 (Anónimo 1996). Las concentraciones más elevadas correspondieron a Al y Fe, con valores 50 % superiores a los LMP señalados en los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989), en dos y cuatro sitios respectivamente. De acuerdo con la prueba de Mann-Whitney, la comparación entre las campañas de muestreo en temporada de sequía y la realizada posterior a las lluvias no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en los parámetros analizados, salvo el caso de los metales pesados que presentaron concentraciones menores después de las lluvias. El esperado efecto de dilución derivado de las lluvias únicamente se observó en los metales. En el resto de los parámetros, fundamentalmente de origen municipal, el arrastre hacia el cauce del río de contaminantes acumulados en suelo y sedimentos durante las lluvias puede compensar la dilución derivada de las precipitaciones (Holguín *et al.* 2006). La ausencia de flujo base en el río San Pedro implica una capacidad de auto purificación muy inferior a los ríos con flujo permanente, lo cual deriva en una mayor susceptibilidad al efecto de las descargas contaminantes (Longe & Omole 2008). Esta situación se hace aún más patente en la zona Centro del Estado, donde confluyen las descargas de los dos parques industriales de la entidad y descargas Municipales de Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo, Jesús María y Aguascalientes.

En lo que respecta a las muestras de agua subterránea, no se encontró evidencia concluyente de infiltración de contaminantes del cauce del río al acuífero. No obstante que en dos pozos se observaron niveles elevados de N_t (6.0 mg L^{-1}), P_t (3.0 mg L^{-1}) y coliformes fecales ($1100 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$), se trata de pozos agrícolas con sello en muy mal estado, lo cual no permite descartar que la contaminación de dichos pozos se deba al deficiente estado del sello. Sin embargo, considerando el elevado ni-

vel de contaminación del agua del río San Pedro y el fenómeno de subsidencia (Anónimo 2002), existe un riesgo permanente de contaminación del acuífero por infiltración de agua del cauce del río.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el río San Pedro está fuertemente contaminado por descargas municipales e industriales. Presenta altas concentraciones de materia orgánica, N_t , P_t , coliformes fecales, SAAM y anilinas. Lo anterior, pese al incremento de la infraestructura de saneamiento de aguas residuales en el Estado, con una capacidad instalada de $3\,500 \text{ L s}^{-1}$ (Ramírez *et al.* 2007). Los sedimentos reflejaron el efecto adverso que las actividades humanas han provocado al cauce durante décadas de ser utilizado como reservorio de residuos. Presentaron altos contenidos de SAAM y anilinas, y niveles de contaminación por Cr, Cu, Pb y Zn. Se observó además una importante contaminación de origen natural por As. Las características de los sedimentos implican un alto nivel de inmovilización de metales pesados en los sedimentos. No se encontraron evidencias concluyentes de contaminación del acuífero por aguas superficiales provenientes del río San Pedro. Las prioridades de remediación del cauce del río San Pedro incluyen el control efectivo de las descargas municipales e industriales que vierten sus residuos sin tratamiento alguno. El tratamiento adecuado de estos efluentes reduciría significativamente la problemática de contaminación por coliformes fecales, materia orgánica, nutrientes y tóxicos orgánicos en agua y sedimentos. A fin de atender la problemática de contaminación de los sedimentos por metales, se requiere verificar el potencial de lixiviación de estas sustancias de los sedimentos del río San Pedro. En los sitios donde el potencial de lixiviación sea alto, deberán aplicarse tecnologías de remediación apropiadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Fondo SEMARNAT-CONACyT por la aportación de recursos para el proyecto "Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes" (clave FOSEMARNAT-2004-01-78). A CONACyT por la

beca otorgada para la realización de los estudios de Doctorado en Ciencias Biológicas de Guilda Guzmán Colis (clave 170010). A la M. en C. Jennifer

López Baltazar, la M. en C. Mónica Mora Silva y el MIA José Luis Carrasco, por su valiosa aportación al presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- Anónimo (1977) United States Environmental Protection Agency (USEPA). Guidelines for Pollution Classification of Great Lakes Harbor Sediments. USEPA Region V, Great Lakes Surveillance Branch, Chicago IL. 8 pp.
- Anónimo (1989) Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua CE-CCA-001-1989. Instituto Nacional de Ecología. Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.
- Anónimo (1991) Environmental Protection Agency (EPA). Methods for the determination of metals in environmental samples. Environmental Monitoring System Laboratory. Cincinnati. USA. EPA/600-4-91-010. 281 pp.
- Anónimo (1993) United States Environmental Protection Agency (USEPA). Subsurface Characterization and monitoring techniques. A Desk Reference Guide, Vol 1: Solids and Ground Water. EPA/625/R-93/003a. Office of Research and Development, Washintong D.C. Pp 48-50.
- Anónimo (1994) Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1996.
- Anónimo (1995) Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. Metcalf & Eddy. McGraw Hill/Interamericana de España. 1485 pp.
- Anónimo (1996) Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 1996.
- Anónimo (1997) Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA). Recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Informe final. Aguascalientes, México. 67 pp.
- Anónimo (1997a) Norma Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación el 14 de enero de 1998.
- Anónimo (1998) Standard Methods for Water and Wastewater. 20th Edition. APHA- AWWA-WPCF. Washington D. C. 1585 pp.
- Anónimo (2000) Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). Disposiciones y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 225 pp.
- Anónimo (2002) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Aguascalientes, estado de Aguascalientes. <http://www.conagua.gob>.
- Anónimo (2003) Manganese in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/104). Pág. 3
- Anónimo (2004) Norma Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente,

- mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación del 02 de marzo de 2007.
- Anónimo (2006) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Resultados definitivos del 11 conteo de población y vivienda 2005 para el Estado de Aguascalientes. <http://www.inegi.gob.mx>
- Anónimo (2007) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 626 pp.
- Avelar FJ, Llamas J (2000) Monitoreo de pesticidas orgánoclorados, metales pesados, cianuros y fluoruros en agua potable de pozos considerados de alto riesgo en 10 municipios de Estado de Aguascalientes. Informe final. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Ags, México. 155 pp.
- Barceló Q Ávila PP, López RC, Zarazúa OG, Torres R, Frías PH (2000) Biodisponibilidad de Cr y Hg en agua y niveles de concentración en el sedimento en la presa de José Antonio Alzate en el Estado de México. I Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, La Paz Baja California Sur. <http://www.bvsde.paho.org>
- Camargo JA, Alonso A (2007) Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de la calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Ecosistemas vol. XVI (2): 1-12.
- Devesa-Rey R, Iglesias ML, Díaz-Fierros F, Barral MT (2008) Total phosphorous distribution and bioavailability in the bed sediments of an atlantic basin (Galicia, NW Spain): spatial distribution and vertical profiles. *Water Air Soil Pollut.* 341-352.
- González L (2002) Hidrogeología del Valle de Aguascalientes, México. En: Bocanegra E, Martínez D, Massone H (eds.). *Groundwater and Human Development.* 1157-1164 Pp.
- Hernández SG, Solorio MG, Vasallo ML, Flores DL, Maples VM, Hernández SD, Alcalá MR (2000) Dispersión de Ni y Cr en sedimentos y suelos superficiales derivados de piroxenitas, serpentinitas y basaltos de la cuenca de San Juan de Otates, Estado de Guanajuato, México. *Ciencias Geológicas* 17(2): 125-136.
- Hess TF, Silverstein J, Schmidt SK (1993) Effect of glucose on 2, 4-dinitrophenol degradation kinetics in sequencing batch reactors. *Water Environment Res.* 65: 73-81.
- Holguín C, Rubio H, Olave ME, Saucedo R, Gutiérrez M, Bautista R (2006) Calidad del agua del río Conchos en la región de Ojinaga, Chihuahua: Parámetros fisicoquímicos, Metales y Metaloides. *Universidad y Ciencia* 22(1): 51-63.
- Jáuregui-Medina C, Ramírez-Hernández S, Espinoza-Rodríguez MA, Tovar-Rodarte R, Quintero- Hernández B, Rodríguez-Castañeda I (2007) Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3 (1): 65-73.
- Jian-feng P, Yong-hui S, Peng Y, Xiao-yu C, Guang-lei Q (2009) The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials* 161: 633-640.
- Lima CL, Olivares RS, Columbie I, De la Rosa MD, Gil CR (2005) Niveles de Plomo, Zinc, Cadmio y Cobre en el río Almendares, Ciudad Habana, Cuba. *Contaminación Ambiental* 21(3): 115-124.
- Lindsay WL (1979) *Chemical equilibria in soils.* John Wiley and Sons. New York. 449 pp.
- Longe EO, Omole DO (2008) Analysis of pollution status of river Illo, Ota, Nigeria. *Environmentalist* 28: 451-457.

- Martínez G, Alvarado J, Senior W (2001) Estudio Físico-químico de las aguas superficiales de la cuenca baja y pluma del río Manzanares. *Interiencia* 26 (8): 342-351.
- Moreno GM (2003) *Toxicología Ambiental. Evaluación del riesgo para la salud humana*. Editorial McGraw Hill. España. 348 pp.
- Navarro A, Collado D, Font X (1998) Movilidad de los Metales Pesados en el Acuífero Deltaico del Río Almazora (Almería). *Tecnología del agua* 172: 33-45.
- Petrovich M, Kastelan-Macan M, Hovart AJ (1999) Interactive sorption of metal ions and humic acids onto mineral particles. *Water, Air & Soil Pollution* 111(1-4): 43-56.
- Ramírez EM, Avelar FJ, Zaragoza J, Rico R (2007) Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan el cauce del río San Pedro en el municipio de Aguascalientes y zonas aledañas. Informe final. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Ags., México. 218 pp.
- Rico-Martínez R, Velázquez-Rojas CA, Pérez-Legaspi IA, Santos-Medrano GE (2000) The use of aquatic invertebrate toxicity test and invertebrate enzyme biomarkers to asses toxicity in the states of Aguascalientes and Jalisco. In: Butterworth FM, Gunatilake A, Gosebatt ME (eds.). *Biomonitoring and Biomarkers as indicators of environmental change* Vol. 2. Plenum Press. New York. Pp. 427-438.
- Rivera-Vázquez R, Palacios-Vélez OL, Chávez-Morales J, Belmont MA, Nikolski-Gravilov I, De la Isla de Bauer ML, Guzmán-Quintero A, Terrazas-Onofre L, Carrillo-González R (2007) Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23: 69-77.
- Robledo SE, Maldonado TR (1997) *Manual de procedimientos para el análisis de suelos*. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México. 124 pp.
- Santos-Medrano GE, Ramírez-López EM, Hernández-Flores S, Azuara-Medina PM, 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
- Schuling R, Geiger G, Furrer G (1995) Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments. In: Salomons W, Stigliani WM (eds.). *Heavy metals retention by soil organic matter under changing environmental conditions*. Springer-Verlag. New York. Pp. 53-85.
- Seoanez C (1999) *Ingeniería del medio ambiente, aplicada al medio natural continental*. Segunda edición. Mundi-Prensa. España. 701 pp.
- Silva SM, Muñoz A, De la Isla de Bauer ML, Infante S (2002) Contaminación Ambiental en la Región de Atlixco: 1. Agua. *Terra Latinoamericana* 20 (3): 243-251.