

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN SISTEMA DE EMBALSES EN CASCADA, CUENCA DEL RÍO SAN JUAN, QUERÉTARO, MÉXICO

• María del Pilar Saldaña-Fabela •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Edmundo Díaz-Pardo • Altagracia Gutiérrez-Hernández •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen

En los últimos años, el número de embalses creados por el hombre ha aumentado por la urgente necesidad de suministrar agua, alimentos y energía a la población. Cuando en un sistema fluvial se ubican varios embalses en la misma cuenca, se produce un efecto en cascada por la liberación del agua río abajo, produciendo cambios en la calidad del agua. El presente trabajo aporta información para el conocimiento de las variaciones en la calidad del agua de un sistema de embalses en cascada, donde se ubican tres embalses que regulan la cantidad de agua y por consiguiente determinan su calidad. Se establecieron ocho sitios de monitoreo a lo largo de los 86 km del cauce principal del río, antes de la presa Zimapán: tres para representar las condiciones de embalse y cinco de tramo de río. En cada sitio se realizaron mediciones de once parámetros fisicoquímicos: cinco determinados *in situ* utilizando equipo multiparamétrico y seis *ex situ* utilizando métodos espectrofotométricos. Se realizaron muestreos bimensuales para la colecta de agua desde octubre de 2004 hasta junio de 2006. Los análisis estadísticos (ANOVA, MANOVA, componentes principales y de agrupamiento) se aplicaron para determinar las variaciones espaciales y temporales de la calidad del agua del sistema. El análisis de ANOVA identificó una correlación positiva significativa ($p < 0.05$) entre la conductividad, sólidos disueltos totales, sulfatos y fosfatos. El análisis MANOVA estableció que no existen diferencias significativas entre la calidad del agua de los sitios de embalses y tramos de río. De los once parámetros, cinco determinan el 73% de la variación. De acuerdo con los criterios de calidad del agua, se limita su uso para riego agrícola y se presentaron condiciones de enriquecimiento, identificándolo como eutrófico y en proceso de azolvamiento, no sólo por la entrada de nutrimentos sino también por el tiempo de vida útil, para lo cual fueron construidos los embalses del río San Juan, en el estado de Querétaro, México.

Palabras clave: embalse, calidad del agua, nutrimentos, descargas.

Introducción

En el siglo pasado, la población mundial aumentó cuatro veces y actualmente existen cerca de seis billones de habitantes (Ritcher *et al.*, 2003), por lo que el crecimiento poblacional está deteriorando los suministros de agua dulce. La degradación de los recursos acuáticos en el

mundo se ha incrementado y está relacionada con las regiones densamente pobladas, ya que las descargas antropogénicas han ocasionado que la capacidad de asimilación natural del ecosistema se vea excedida debido a que los diversos agentes contaminantes que deterioran la calidad del agua no son producidos bajo condiciones naturales (Steinberg y Schiefele,

1988; Karr, 1991), pues los procesos terrestres influyen de manera diversa en los cuerpos de agua receptores, de acuerdo con los usos y aprovechamientos domésticos, industriales y agrícolas; así, se estima que cerca del 50% de ellos se encuentran afectados en su calidad (Rapport, 1999; Brismar, 2002).

En los últimos años, el número de embalses creados por el hombre ha aumentado drásticamente por la urgente necesidad de suministrar agua, alimentos y energía a la población. Tanto los lagos artificiales como los naturales presentan problemas de contaminación por la influencia de sus cuencas hidrográficas (Hemond y Fechner, 1994; Silva y Schiemer, 2002). En México existen 4 000 presas de almacenamiento (Conagua, 2008), las cuales son utilizadas para riego agrícola, control de avenidas, suministro de agua a la población o generación de energía eléctrica. Cuando en un sistema fluvial se ubican varios embalses en la misma cuenca, se produce un efecto en cascada por la liberación del agua río abajo del embalse, por lo que la continuidad del sistema se ve interrumpido, alterando la conectividad longitudinal y lateral del ecosistema acuático (Gomes-Nogueira, 2002; Robinson et al., 2003; Drastik et al., 2008).

Los cambios en la calidad del agua que se presentan en los embalses por la degradación de la vegetación de la zona de inundación, y los problemas de contaminación y deterioro de la calidad del agua de las cuencas hidrológicas que los alimentan, ocasionan que disminuyan o se limiten los aprovechamientos para los cuales fueron creados. La problemática de contaminación y el manejo antropogénico del sistema hídrico con la creación de sistemas de embalses en cascada en zonas tropicales han sido poco estudiados, tanto en el ámbito mundial (Drastik et al., 2008) como nacional (Barragán et al., 2002; Merino et al., 2008). Por ello, en este trabajo se aporta información sobre las variaciones temporales y espaciales en la calidad del agua de un sistema de embalses en cascada.

Área de estudio

La subcuenca del río San Juan se localiza entre los 19° 50' y 20° 45' de latitud norte y 99° 30' y 100° 15' de longitud oeste; su origen se sitúa en el Estado de México, con el nombre de Arroyo Zarco, y después de 23 km de recorrido llega al estado de Querétaro a 2 100 msnm, cambiando su nombre por el de río San Juan a 1 943 msnm. En este punto, el cauce es embalsado en la presa derivadora "Constitución de 1857", de la que parte el canal del mismo nombre y que tiene por objeto alimentar a la presa "Constitución de 1917". Dicha derivadora se utiliza para el almacenamiento del agua que después se lleva al Distrito de Riego de San Juan del Río (SARH, 1970) por medio de una compuerta que deja un gasto de salida para que el río continúe su recorrido atravesando la ciudad de San Juan del Río.

Esta ciudad cuenta con una población de 208 462 habitantes. Sus descargas de aguas residuales tanto municipales como industriales se vierten al río, mismo que vacía sus aguas en la presa Centenario, que almacena el agua dejando pasar un gasto mínimo de salida, a cuyo flujo se le incorporan las descargas domésticas del poblado de Tequisquiapan, cuya población es casi de 60 000 habitantes (INEGI, 2006). El río continúa su recorrido hasta llegar a la presa Paso de Tablas, en donde es nuevamente almacenada, dejando un gasto mínimo de salida que llega a la presa Zimapán, donde termina su recorrido y cambia su nombre por el del río Moctezuma, afluente importante de la cuenca del río Pánuco.

La superficie total de la subcuenca del río San Juan es de 5 427 km², el recorrido del cauce principal del río que abarca la zona de estudio es de 86 km (figuras 1 y 2). El clima según la clasificación de Copen, modificado por García (1980) es BS₁ kw (w), que corresponde al grupo de climas seco, de subtipo semiseco semi-cálido, con lluvias en verano, y un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 del total anual. Se presenta particularmente en los municipios de Ezequiel Montes, Cadereyta, Tequisquiapan y

San Juan del Río. En esta zona, la precipitación media anual oscila entre los 450 y 630 mm (Profepa, 2002).

Materiales y métodos

La ubicación de los sitios de muestreo aparecen en el cuadro 1, los considerados con características de río (sistema lótico) fueron San Sebastián (1SS, inicio del tramo de estudio), Bajo Constitución (3BCON, aguas abajo del embalse), Barrio Magdalena (5BM), Las Rosas (7LR) y Taxhidó (8TAX), mientras que las correspondientes a embalses (sistema léntico) fueron Presa Constitución de 1857 (2CON), Presa Centenario (4CEN) y presa Paso de Tablas (6PT).

Se realizaron muestreos bimensuales de octubre de 2004 a junio de 2006 y, con la finalidad de determinar las condiciones de calidad del agua del sistema de embalses en estudio, en cada sitio se tomaron muestras simples de superficie a una profundidad de 30 cm y se midieron parámetros *in situ* como temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad (CND), sólidos disueltos totales (SDT) y potencial de hidrógeno (pH). Estas lecturas se llevaron a cabo con un medidor multiparamétrico marca YSI, modelo 85, para los primeros cuatro factores, y con el potenciómetro marca Hanna, el quinto. Adicionalmente se colectaron muestras de agua en frascos de plástico de polietileno de 500 ml de capacidad y preservadas a 4 °C,

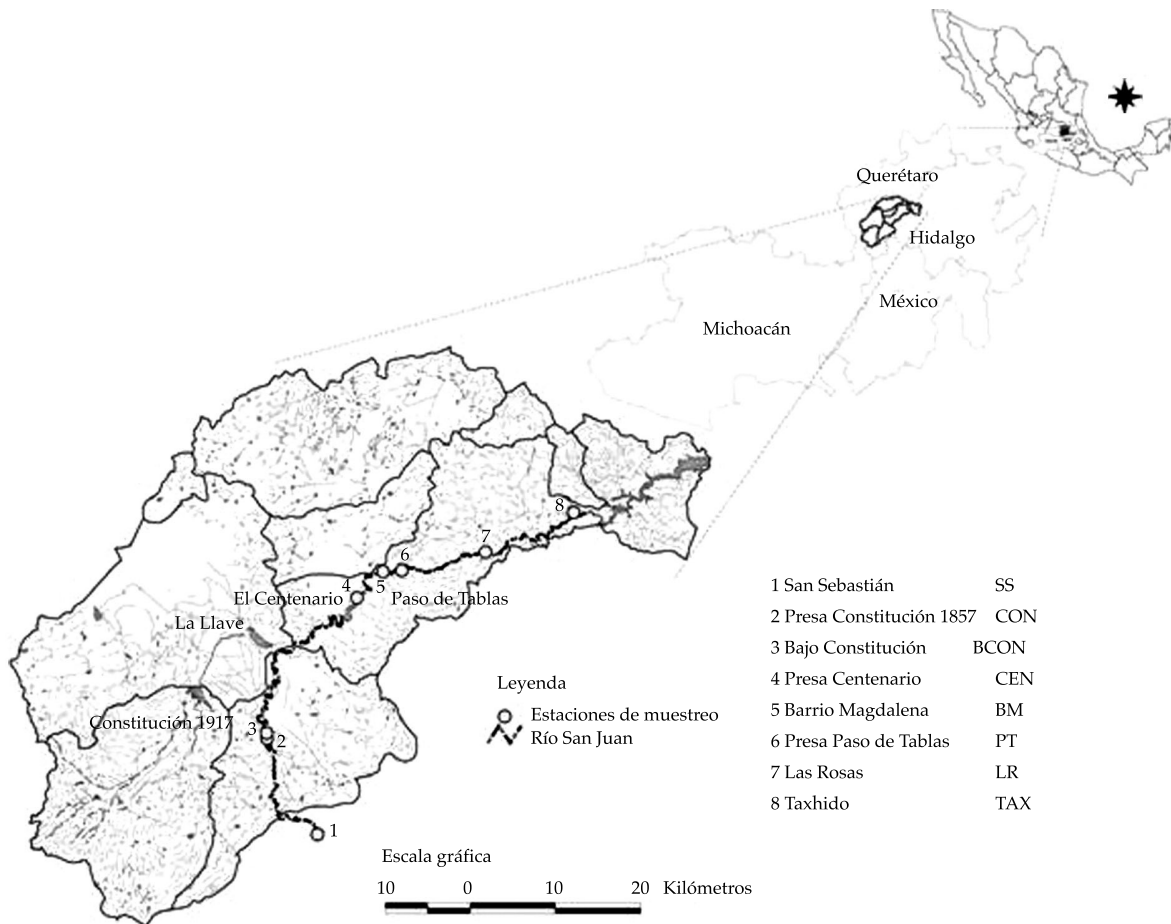


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en la subcuenca del río San Juan, Querétaro, México.

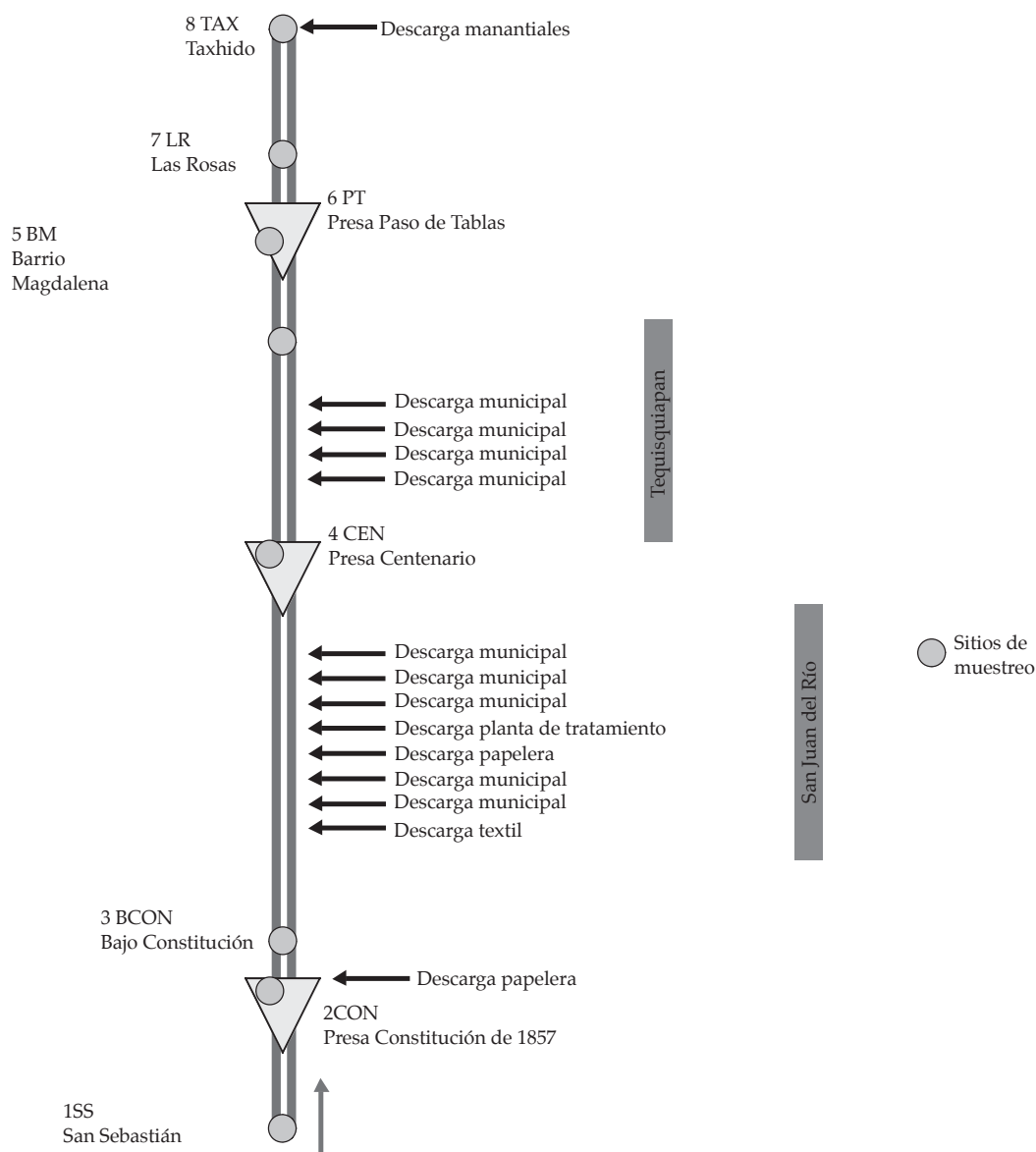


Figura 2. Diagrama unifilar de la ubicación de las descargas aportadas al sistema y los sitios de muestreo.

Cuadro 1. Ubicación de las estaciones de muestreo del sistema de embalses en cascada del río San Juan, Querétaro, México.

Estaciones	Sistema	Altitud (msnm)	Longitud norte	Latitud oeste
1 San Sebastián (ISS)	Lótico	2 086	20° 15' 41.1"	99° 56' 32.9"
2 Presa Constitución de 1857 (2CON)	Léntico	1 943	20° 21' 46.3"	99° 59' 59.3"
3 Aguas abajo de la Presa Constitución de 1857 (3BCON)	Lótico	1 930	20° 21' 50.6"	99° 59' 58.1"
4 Presa Centenario (4CEN)	Léntico	1 902	20° 30' 46.1"	99° 53' 57.5"
5 Barrio Magdalena (5BM)	Lótico	1 885	20° 32' 25.8"	99° 52' 11.6"
6 Presa Paso de Tablas (6PT)	Léntico	1 869	20° 32' 23.2"	99° 50' 53.7"
7 Las Rosas (7LR)	Lótico	1 745	20° 33' 44.0"	99° 45' 16.6"
8 Taxhido (8TAX)	Lótico	1 568	20° 36' 15.5"	99° 39' 19.3"

para cuantificar en el laboratorio, mediante técnicas espectrofotométricas (equipo Hach, modelo 2000), las concentraciones para fosfatos (P), nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3), sólidos suspendidos totales (SST) y sulfatos (SU), medidos como mg/l, así como la turbidez (TU) medida en FTU (unidades de atenuación de formazina).

Se realizó un análisis de variancia (ANOVA) para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en las variables entre los meses (variación temporal) y a lo largo del cauce del río (variación espacial).

Para determinar si la diferencia de calidad del agua entre sitios se debe a un efecto sistemático de los embalses se realizó un MANOVA, considerando todos los sitios localizados en embalses como un grupo y todos los localizados en el río como otro grupo.

Se llevó a cabo un análisis de componentes principales con la matriz correspondiente de correlación entre las variables medidas, utilizando los valores promedio de cada sitio; asimismo, se efectuó un análisis de similitud mediante el método de Ward por distancias euclidianas, a fin de establecer la semejanza entre estaciones. Para dicho análisis se utilizó el paquete estadístico *MVSP* versión 3.13.

Resultados y discusión

El nivel de correlación de las variables cuantificadas, que permiten analizar la estructura de interdependencia entre las mismas, se presenta en la figura 3. Como era de esperarse, la conductividad presentó una alta correlación con los sólidos disueltos totales, fosfatos y sulfatos, lo que sugiere que contribuyen de manera importante al número total de iones y nutrientes del sistema. Esto se refleja también en una alta correlación positiva entre los sulfatos y los sólidos disueltos totales. De la misma forma, los fosfatos presentaron una correlación positiva con los sólidos disueltos totales, sugiriendo que también contribuyen de manera importante al total del material disuelto. El efecto de los sólidos suspendidos

totales en la turbidez se refleja en una alta correlación entre estos dos parámetros. La concentración de nitratos está correlacionada con los sólidos suspendidos totales y la turbidez. Los nitratos y los nitritos presentaron correlación negativa con el pH, mientras que el oxígeno (OD) y el pH presentaron correlación positiva.

Las tonalidades de gris indican la correlación y los asteriscos marcan las correlaciones estadísticamente significativas al 95% de confianza.

Los resultados del análisis estadístico de las variaciones temporales y espaciales de la calidad del agua del sistema de embalses en estudio se presentan en los cuadros 2 y 3. En el segundo se aprecia que los parámetros que tuvieron variaciones espaciales y temporales significativas al 95% de confianza fueron temperatura (T), pH, sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y turbidez (TU), asociados con condiciones del gradiente longitudinal, y con las épocas de estiaje y avenidas. Aquellos que tuvieron variaciones espaciales fueron oxígeno disuelto (OD), conductividad (CND) y sulfatos (SU), asociados con la degradación de la materia orgánica proveniente de los aportes de aguas

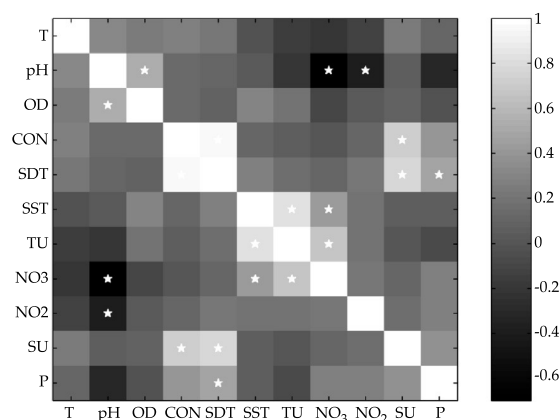


Figura 3. Análisis de correlación de las 11 variables fisicoquímicas. Las tonalidades en gris indican el coeficiente de correlación y los asteriscos indican las correlaciones estadísticamente significativas al 95% de nivel de confianza.

Cuadro 2. Resultados promedio de parámetros fisicoquímicos.

	Turbidez (FTU)				Temperatura (°C)				SST (mg/l)			
	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.
1SS	43.08	± 29.86	90.9	11	16.62	± 3.16	21.7	13.2	45.13	± 39.62	118	10
2CON	59.78	± 35.93	149	22	22.24	± 4.38	29.7	12.3	51.20	± 27.07	109	17
3BCON	96.90	± 55.74	226	38.7	18.24	± 3.63	23.4	12.2	81.56	± 47.28	165	45
4CEN	68.16	± 22.47	105.3	34	22.00	± 1.96	24.8	19.5	84.14	± 36.55	141	28
5BM	77.75	± 36.61	152	46.1	19.43	± 2.47	21.6	13.9	69.53	± 35.44	115	0.31
6PT	93.50	± 33.38	160	55	24.58	± 3.94	29.6	18.6	98.00	± 34.58	141	30
7LR	34.65	± 15.89	72	17	18.74	± 2.58	23	15	32.70	± 17.29	72	13
8TAX	7.67	± 5.93	21.6	3	28.47	± 1.99	31.9	25.5	8.10	± 6.82	21	3

	Oxígeno disuelto (mg/l)				Sulfatos (mg/l)				Fosfatos (mg/l)			
	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.
1SS	4.00	± 1.63	6.5	2.31	24.38	± 5.50	34	18	0.675	± 1.140	2.92	0.001
2CON	6.47	± 1.46	8.04	3.73	60.50	± 46.10	154	18	1.301	± 1.940	6.03	0.070
3BCON	7.96	± 1.18	9.65	6.3	37.89	± 22.53	82	19	0.609	± 0.718	2.11	0.050
4CEN	9.39	± 5.48	18.55	3.28	96.43	± 41.72	148	29	3.176	± 3.369	8.3	0.001
5BM	0.34	± 0.83	2.66	0.1	84.50	± 39.87	148	8	2.395	± 2.612	6.88	0.130
6PT	16.75	± 7.64	24.8	4.89	101.10	± 26.34	140	53	2.371	± 2.883	7.75	0.001
7LR	7.12	± 2.31	11.1	3.48	108.60	± 36.73	180	52	2.039	± 3.038	7.32	0.140
8TAX	7.06	± 2.15	12.57	5.05	67.70	± 24.14	118	38	2.154	± 2.753	6.64	0.060

	Conductividad espec. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)				Nitratos (mg/l)				SDT (mg/l)			
	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. est.	Máx.	Mín.
1SS	160.63	± 100.95	360	61.3	2.913	± 2.396	7.6	0.8	98.86	± 48.88	172	46
2CON	459.29	± 416.97	1 256	117	5.080	± 5.651	20.1	0.2	208.60	± 235.30	585	0.56
3BCON	180.70	± 102.51	435	115	7.667	± 9.079	30.4	0.2	69.94	± 60.07	195	0.57
4CEN	1 766.85	± 336.56	2 204	1 217	3.586	± 4.113	9.2	0.01	907.55	± 369.03	1 502	550
5BM	1 597.39	± 408.29	2 110	830	7.044	± 6.994	19.4	0.4	929.56	± 278.44	1 447	593
6PT	1 855.02	± 457.12	2 842	1 118	5.113	± 4.581	11.7	0.3	913.88	± 267.23	1 276	516
7LR	1 713.91	± 492.59	2 373	868	3.710	± 3.557	9.6	0.5	912.64	± 338.91	1 395	463
8TAX	929.93	± 241.66	1 337	622	1.800	± 1.137	3.2	0.3	449.55	± 162.59	814	294

	Nitritos (mg/l)				pH (unidades de pH)			
	Prom.	Desv. Est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. Est.	Máx.	Mín.
1SS	6.381	± 11.948	29	0.001	8.14	± 0.55	9.10	7.56
2CON	3.022	± 6.330	16	0.008	8.28	± 0.65	9.30	6.92
3BCON	4.585	± 13.655	41	0.011	8.36	± 0.69	9.30	6.95
4CEN	5.180	± 9.900	26	0.005	9.06	± 0.70	9.90	7.85
5BM	6.316	± 13.291	33	0.001	8.18	± 0.65	9.00	7.12
6PT	9.027	± 16.954	42	0.001	9.04	± 0.85	10.00	7.26
7LR	5.181	± 10.490	27	0.014	8.59	± 0.42	9.00	7.89
8TAX	1.712	± 3.766	11	0.008	8.70	± 0.50	9.30	7.88

Cuadro 3. Valores *p* 95% del ANOVA de dos vías; en negritas se presentan las correlaciones significativas.

	Estaciones	Meses
T	0	1.13E-09
pH	3.67E-07	1.18E-12
OD	9.72E-12	0.189873
CON	0	0.012551
SDT	6.66E-16	1.14E-05
SST	4.01E-09	0.001702
TU	4.88E-09	0.001063
NO ₃	0.022595	7.02E-08
NO ₂	0.15644	0
SU	1.9E-06	0.205679
P	0.006514	9.88E-15

residuales, industriales y municipales; en cambio, los que variaron temporalmente fueron nitratos (NO₃), nitritos (NO₂) y fosfatos (P), influenciados por la época de avenidas en la zona, que lavan los suelos aledaños. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Arroyo *et al.* (2008), en un estudio de las variaciones estacionales de tres embalses en el Altiplano Central de México.

El análisis MANOVA aplicado para establecer si los embalses determinan las variaciones en la calidad del agua del sistema en cascada indicó que no existen diferencias significativas al 95% de confianza entre los conjuntos de medias de los sitios de embalses y de río ($\lambda = 0.58$, $df = 11$, $p = 0.4041$), por lo que este resultado sugiere que la calidad del agua de los embalses no tiene un efecto sistemático en las variables fisicoquímicas de los sitios de río que se ubican aguas abajo o aguas arriba de los cuerpos lénticos; esto puede deberse en parte al manejo hidráulico de los embalses y a la entrada de descargas municipales, industriales y agrícolas de las ciudades de San Juan del Río, del Parque Industrial del mismo nombre y de Tequisquiapan, que son continuas, y afectan y deterioran la calidad del agua del río, lo que hace que las condiciones y características fisicoquímicas a lo largo del gradiente longitudinal no presenten cambios significativos (Drastik *et al.*, 2008).

El análisis de componentes principales (ACP) identificó que los parámetros fisicoquímicos que determinan el comportamiento de la calidad del agua en el sistema de embalses en cascada del río San Juan son los siguientes: la conductividad, sólidos disueltos totales y los sulfatos en el primer componente; los nitritos en el segundo, y los sólidos suspendidos totales en el tercer componente, representando en conjunto el 73.6% de la varianza acumulada (figura 4). Dichos parámetros coinciden con lo obtenido por López y Serna (1999) en el embalse Ignacio Allende, Guanajuato, considerado como un sistema eutrófico por las altas concentraciones de sólidos suspendidos, turbidez y sulfatos registrados.

El agua del río San Juan es aprovechada en riego agrícola, por lo que los parámetros de calidad del agua que determinan el 73.6% del comportamiento del sistema se compararon con los criterios ecológicos establecidos para dicho uso (Gaceta Ecológica, 1990). Así, el criterio para conductividad eléctrica es de 1 000 μScm^{-1} , mientras que en el sistema en estudio osciló entre 160.63 μScm^{-1} y 1 855 μScm^{-1} (sitios 1SS y 6PT, respectivamente), el incremento en la conductividad que rebasa el criterio ecológico se presentó a partir de la estación 4CEN, que corresponde al embalse en donde se concentran las descargas de aguas residuales de la población de San Juan del Río y del corredor industrial del mismo nombre, y en donde el flujo de agua en la mayoría de los meses de muestreo permaneció cerrado. Las concentraciones de sólidos suspendidos totales y disueltos totales oscilaron de 8 a 98 mg l^{-1} y de 69 a 929 mg l^{-1} en el mismo orden, por lo que no cumplen con los límites de 50 y 500 mg l^{-1} de manera respectiva desde las estaciones 2CON y 4CEN para dicho uso.

Por lo que respecta a las concentraciones de nitritos (NO₂), éstas oscilaron en promedio de 1.71 a 9.02 mg l^{-1} (estaciones 8TAX y 6PT, respectivamente), si bien no existe un criterio establecido para el uso en riego agrícola de este parámetro. En los cuerpos de agua alterados

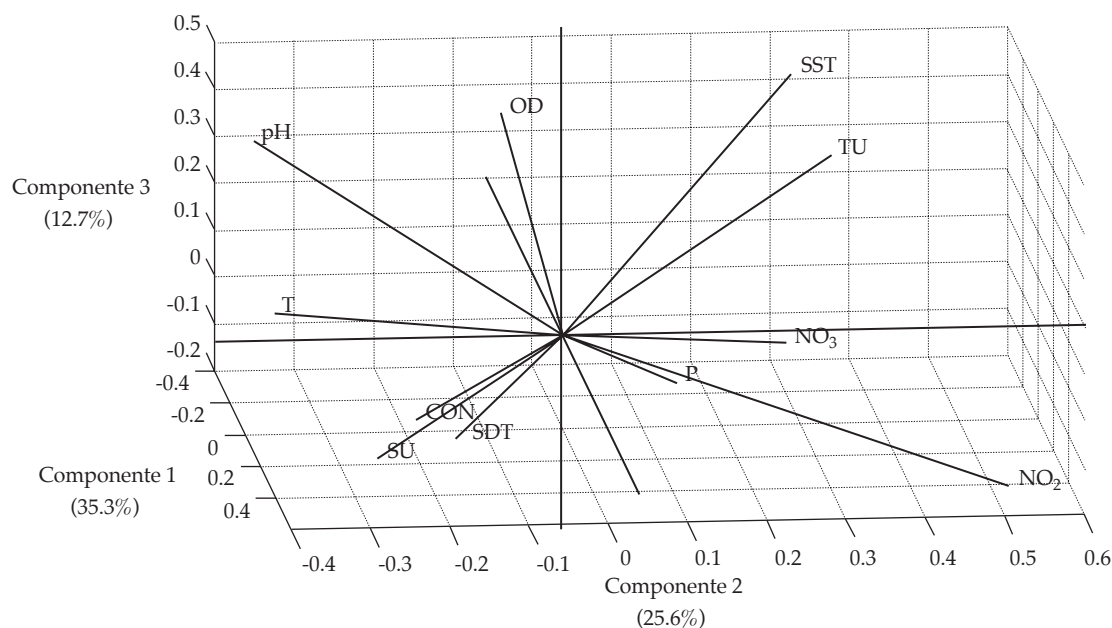


Figura 4. Análisis de componentes principales y parámetros determinantes en la subcuenca del río San Juan.

por descargas residuales existe una conversión autótrofa de amoníaco a nitritos y nitratos que actúa en forma continua (Chapman, 1992), por lo que los nitritos son rápidamente oxidados a nitratos en el río y en los embalses del sistema de embalses en cascada.

En lo que concierne a los fosfatos, que son indicadores del grado de productividad biológica de las aguas superficiales y que junto con el nitrógeno son los factores limitantes para el crecimiento fitoplanctónico, en el sistema del río San Juan, las concentraciones oscilaron en promedio de 0.675 a 3.176 mg l⁻¹ (estaciones 1SS y 4CEN, respectivamente), aunque para este parámetro no existe criterio ecológico para uso agrícola.

Los sulfatos, en promedio, oscilaron de 24.38 a 108.60 mg/l (1SS y 6PT, respectivamente); el incremento denota la influencia de efluentes industriales y municipales de la zona, y al igual que para los nutrientes no existe criterio establecido.

De acuerdo con los resultados obtenidos y el análisis de calidad del agua para el uso

en riego agrícola, el río San Juan no cumple con los criterios ecológicos establecidos para sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y conductividad, y mucho menos para la conservación de la biota acuática o para tratar de establecer cultivos de peces comestibles en los embalses del río San Juan.

El análisis integral de todos los parámetros determinados se muestra en la figura 5, que contiene un perfil de calidad del agua, donde el tono de gris oscuro denota una mayor concentración y por lo tanto deterioro de la calidad por el continuo aporte de aguas residuales que recibe el río San Juan, pues desde el inicio del tramo de estudio existen concentraciones altas de nutrientes, mismas que se mantienen a lo largo de los 86 km.

En el análisis de agrupamiento (figura 6), los sitios siguen el mismo orden en que se encuentran a lo largo del río, lo que corrobora que no existen diferencias significativas en las características de calidad del agua entre los correspondientes a los embalses con los tramos lóticos del cauce del río, ya que en todo el

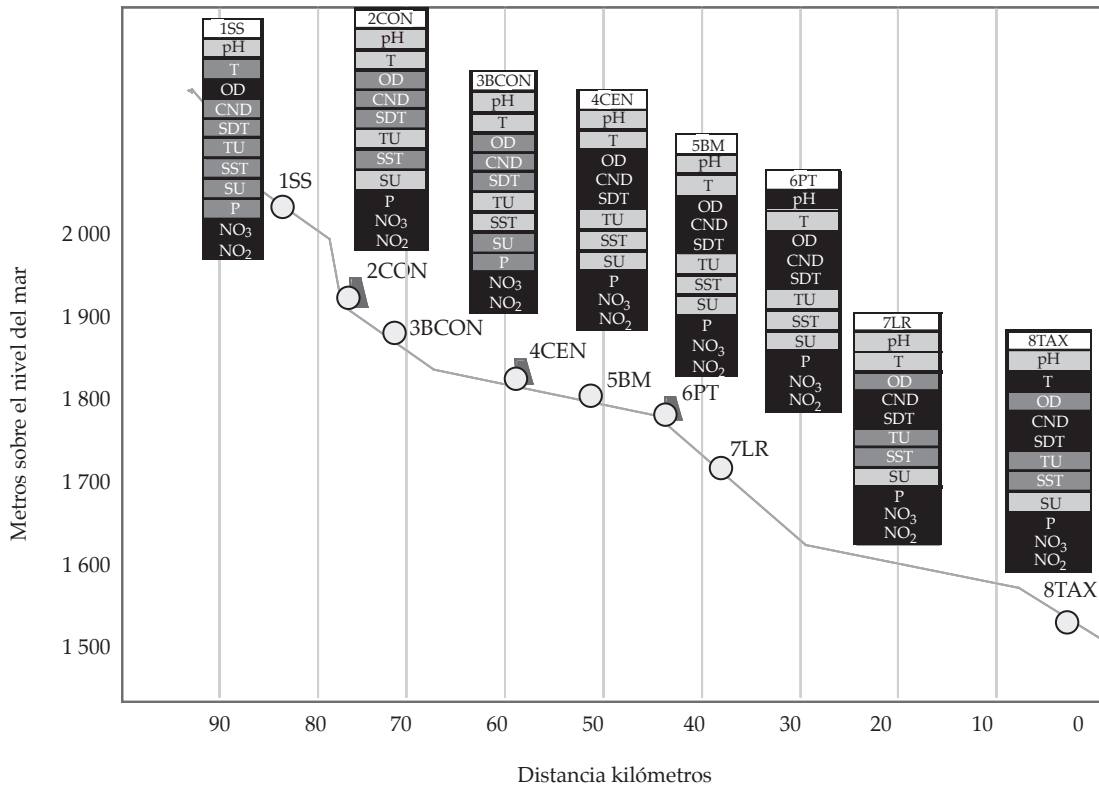


Figura 5. Integración de los parámetros en un perfil de calidad del agua del río San Juan; la tonalidad más oscura denota concentraciones que sobrepasan los criterios para riego agrícola, o no se cumplen para uso en protección de vida acuática.

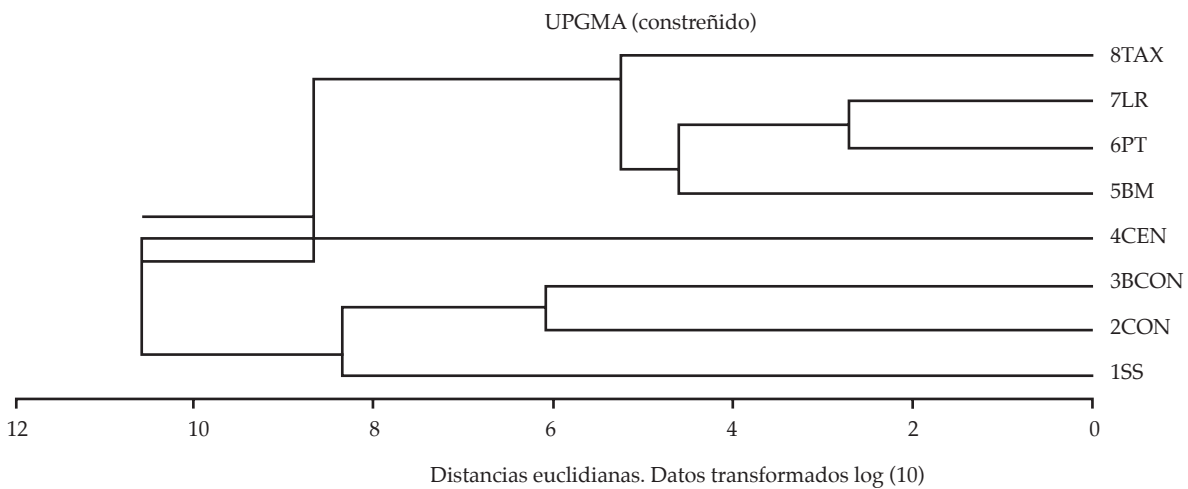


Figura 6. Agrupamiento de los sitios en función de las variables fisicoquímicas.

sistema, la entrada de descargas es constante y continua. Además, el acelerado enriquecimiento de nutrientes y azolvamiento de

los embalses artificiales es característico de aquellos que tienen una vida útil de 10 a 100 años (López y Serna, 1999), periodo que los del

río San Juan están próximos a cumplir, ya que la presa Centenario se construyó en 1910.

Conclusiones

Los parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad del agua del sistema de embalses en cascada del río San Juan fueron la conductividad, sólidos disueltos totales, sulfatos, nitritos y sólidos suspendidos totales, los cuales se correlacionaron significativamente al 95% de confianza; por las concentraciones registradas, el sistema se considera eutrófico. No existen diferencias significativas entre las estaciones ubicadas en los embalses y las situadas en el río debido a que el sistema recibe continuamente descargas de aguas residuales tanto municipales e industriales como agrícolas, y el incremento de los nutrientes en todo el sistema indica la entrada continua de dichas aportaciones, lo que provoca que el sistema no pueda recuperarse y degradar la materia orgánica, afectando su calidad, por lo que se limita el uso para riego agrícola.

Se observó una marcada estacionalidad en los factores ambientales, asociada con periodos de lluvias y estiaje. Las altas concentraciones se presentaron en un tramo de 20 km desde el embalse de la presa Centenario (4CEN) hasta la estación 7LR. Las condiciones de calidad del agua de los embalses en cascada del río San Juan identifican al sistema como eutrófico y en proceso de azolvamiento, no sólo por la entrada de nutrientes sino también por el tiempo de vida útil para el que fueron construidos.

Las concentraciones de los parámetros estudiados y el manejo hidráulico denotan el grave estado de salud del río San Juan, y la urgencia de un programa de saneamiento en la subcuenca a través de mejoras en los procesos de tratamiento tanto industriales como municipales, para controlar y revertir el deterioro de la calidad del agua del río.

Recibido: 19/10/09
Aprobado: 02/12/10

Referencias

- ARROYO-BUSTOS, G., LÓPEZ-LÓPEZ, E., and VOLTOLINA, D. Planktonic crustacean assemblages of three reservoirs from the Mexican central plateau: relationships with biotic and abiotic factors. *Hydrobiología*. Vol. 18, No. 001, 2008. pp. 75-83.
- BARRAGÁN-SEVERO, J., LÓPEZ-LÓPEZ, E., and STANLEY-BABB, K.A. Spatial and temporal variation patterns of a waterfowl community in a reservoir system of the Central Plateau, México. *Hydrobiología*. No. 467, 2002, pp. 123-131.
- BRISMAR, A. River systems as providers of goods and services: A basis for comparing desired and undesired effects of large dam projects. *Environmental Management*. Vol. 29, No. 5, 2002, pp. 598-609.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2008.
- CHAPMAN, D. *Water Quality Assessments. A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Cambridge, U.K.: UNESCO, WHO, UNEP, Ed. Chapman & Hall, University Press, 1992, 585 pp.
- DRASTIK, J., KUBECKA, T., CHECH, M.J., FROUZOVÁ, J., and PRCHALOVÁ, M. The effect of hydropower on fish stocks: comparison between cascade and non-cascade reservoirs. *Hydrobiología*. No. 609, 2008, pp. 25-36.
- GACETA ECOLÓGICA. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. CE-CCA-001/89. *Gaceta Ecológica*. Vol. II, núm. 6, enero de 1990, 64 pp.
- GARCÍA, E. *Apuntes de climatología*. México, D.F.: UNAM, 1980 pp. 103-110.
- GOMES-NOGUEIRA, M. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Paranapanema River), Sao Paulo, Brazil. *Hydrobiología*. No. 431, 2002, pp. 115-128.
- HEMOND, H. and FECHNER, J.E. *Chemical fate and transport in the environment*. New York: Academic Press, 1994, pp. 338.
- INEGI. *II Censo de población y vivienda 2005*. Principales resultados por localidad 2005. CD. México, D.F.: INEGI, 2006.
- KARR, J.R. Biological Integrity: A long-neglected aspect of water resources management, *Ecological Applications*. Vol. 1, No. 1, 1991, pp. 66-84.
- LÓPEZ-LÓPEZ, E. y SERNA-HERNÁNDEZ, J.A. Variación estacional del zooplancton del embalse Ignacio Allende, Guanajuato, México, y su relación con el fitoplancton y factores ambientales. *Rev. Biol. Trop.* Vol. 47, núm. 4, 1999, pp. 643-657.
- MERINO-IBARRA, M., MONROY-RÍOS, E., VILA CLARA, G., CASTILLO, F., GALLEGOS, M., and RAMÍREZ-ZIEROLD, J. Physical and chemical limnology of a wind-

- swept tropical highland reservoir. *Aquat. Ecol.* Vol. 42, 2008, pp. 335-345.
- PROFEPA. *Sinopsis geográfica del estado de Querétaro e Hidalgo*. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2002. Disponible para World Wide Web: <http://www.profepa.gob.mx/deleg/sinngo.htm>.
- RAPPORT, D. On the transformation from healthy to degraded aquatic ecosystems. *Aquatic Ecosystem Health & Management*. Vol. 2, No. 2, 1999, pp. 97-103.
- RITCHER, B.D., RUTH, M., DAVID, L.H., and WIGNIGTON, R. Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity. *Ecological Applications*. Vol. 13, No. 1, 2003, pp. 206-224.
- ROBINSON, C., UEHLINGER, U., and MONAGHAN, M. Effects of a multi-year experimental flood regime on macroinvertebrates downstream of a reservoir. *Aquatic Sciences*. Vol. 65, 2003, pp. 210-222.
- SARH. *Boletín Hidrológico No. 44. Región Hidrológica Núm. 26 Parcial (Alto Pánuco). Cuenca del Río San Juan*. Tomo I. México, D.F.: Dirección General de Estudios, Subsecretaría de Planeación, 1970, pp. 1-21.
- SILVA, E.I.L. and SCHIEMER, F. Human factor: the fourth dimension of reservoir limnology in the tropics. *Reservoir and culture-based fisheries*. De Silva, S.S. (editor). Biology and Management, ACIAR Proceed, Vol. 98, 2002, pp. 111-125.
- STEINBERG, CH., and SCHIEFELE, S., Biological indication of trophy and pollution of running waters. *Z. Wasser-Abwasser-Forsch.* Vol. 21, 1988, pp. 227-234.

Abstract

SALDAÑA-FABELA, M.P., DÍAZ-PARDO, E. & GUTIÉRREZ-HERNÁNDEZ, A. *Diagnosis of water quality in a cascade system of dam reservoirs in the San Juan river, Querétaro, Mexico. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 115-126.*

In recent years, the number of man-made dam reservoirs has increased dramatically due to the urgent need to supply water, food and energy to the population. When in a fluvial system several reservoirs are located in the same basin, a cascade effect is produced due to the water release downstream, producing changes in water quality. This paper contributes information to identify water quality variations in a cascade system where three dam reservoirs regulate the quantity of water and, subsequently, its quality. Eight monitoring sites were located along 86 km of the main river channel, three to represent the conditions in the reservoirs and five those in the river segment before the Zimapán dam. At each site, measurements were made for 11 physiochemical parameters, five determined in-situ using multi-parametric equipment and six ex-situ using spectrophotometric methods. Bimonthly water collection samples were conducted from October 2004 to June 2006. Statistical analyses (ANOVA, MANOVA, principal components and cluster) were carried out to determine temporal and spatial variations in the water quality of the system. The ANOVA analysis resulted in a significant positive correlation ($p < 0.05$) among conductivity, total dissolved solids, sulphates and phosphates. The MANOVA analysis determined that no significant differences existed between water quality in the river among dams and that in the reservoir sites. Five of the 11 parameters determined 73% of the variation. According to water quality criteria, its use is restricted to agricultural irrigation. The system presented enrichment identified as eutrophic and in the process of sedimentation, not only due to the entrance of nutrients but also because of the lifespan for which the dam reservoirs in the San Juan river, Querétaro were built.

Keywords: dam reservoirs, water quality, nutrients, wastewater discharges.

Dirección institucional de los autores

Dra. María del Pilar Saldaña-Fabela

Subcoordinadora de Hidrobiología y Evaluación Ambiental
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfonos: +52 (777) 3 29 3665 y 3293 600, extensión 227
Fax: +52 (777) 3293 675
psaldana@tlaloc.imta.mx

Dr. Edmundo Díaz-Pardo

Profesor-investigador
Universidad Autónoma de Querétaro
Centro Universitario
Cerro de las Campanas
76010 Querétaro, Querétaro, MÉXICO
Teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 5316
diazpardo@yahoo.com.mx

Dra. Altagracia Gutiérrez-Hernández

Investigadora
Laboratorio de Conservación de Peces y Hábitats Acuáticos
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales - Biología
Avenida de las Ciencias sin número
76230 Juriquilla, Querétaro, MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (442) 1921 200, extensión 5316
altagraciagh@yahoo.com.mx