

Índice de calidad del agua en la cuenca baja del Río San Pedro, Chihuahua, México

L. R. Gutiérrez^{1*}, R. Quintana², H. Rubio^{2,3}, J. Ortega², C. Pinedo²

¹ Estudiante de Maestría de la Facultad de Zootecnia Calle 53ava. No. 1007- A. Col. Centro Chihuahua, Chih. México. CP 31350.

² Catedrático Investigador Universidad Autónoma de Chihuahua Facultad de Zootecnia Periférico Francisco R. Almada. Km.1. Colonia Zootecnia, Chihuahua, Chihuahua. CP 31031.

³ Investigador Titular del INIFAP-CIRNOC- Campo Experimental Lá Campana-Madera. Ave. Homero 3744, Fracc. El Vergel, Chihuahua, Chihuahua. CP. 31100.

Recibido 14 mayo 2007, revisado 25 septiembre 2007, aceptado 21 noviembre 2007

Water quality index in the lower watershed of the San Pedro river in Chihuahua, Mexico

Abstract

A Water Quality Index (WQI) represents a unified model to detect potential tendencies of pollution in water bodies. The objective was to determine a WQI for the San Pedro River in Chihuahua, Mexico using the quantitative variables of metals, physical-chemical properties, and microbiological characteristics. A total of 165 water samples were collected at five locations, three repetitions and monthly samples from October 2005 to August 2006. The locations were: close to the Francisco I. Madero dam (LP); between Rosales and Delicias (RD); Meoqui (M); El Torreón (ET); and Julimes (EG). The levels of arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) were determined using an Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) Perkin Elmer 2100. In addition, the following variables were determined: physical (water temperature, electrical conductivity (EC), total solids (TS), suspended solids (SS) and dissolved solids (DS)); chemical (pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), dissolved oxygen (DO) and hardness) as well as microbiological (total coliforms and fecal coliforms). The ICA model for this study was calculated with the equation $WQI = \sum [\text{Log Nat } P * (Q/P * W_i)] / 100$, where Σ =Summation; Log Nat=Natural Logarithm; P=Parameter; Q P/p=Obtained value of dividing the Log Nat of each variable for the maximum value of the permitted concentration; W_i =Pondered value of each variable in the equation; and 100=Value to normalize the indices to a base of 0 to 100. The maximum value of WQI was detected for EG with 76.1 as an average of all monthly samples in comparison with locations LP with 47.0, RD with 67.3, M with 66.7 and ET with 69.1. Considering monthly samples, the maximum WQI value was detected in November and July both with 73.0. With respect to the other variables the general means were: pH of 7.69 ± 0.405 SD, temperature of $24^\circ \text{C} \pm 23.85$ SD, TS of $1,266.73 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.60$ SD, BOD of $4.51 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.06$ SD, OD of $5.98 \text{ mg l}^{-1} \pm 1.80$ SD, EC of $1.337 \text{ mS cm}^{-2} \pm 0.68$ SD, hardness of $116.06 \text{ mg l}^{-1} \pm 39.93$ SD, total coliforms of $1,729 \text{ NMP} \pm 322.12$ SD and fecal coliforms of $814.18 \text{ NMP} \pm 800.13$ DS. The analysis of metals detected a range for As of 0.0110 mg l^{-1} to 0.587 mg l^{-1} while the general mean for Pb was $0.023 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.01$ SD, and Cd was $0.003 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.0025$ SD. It was possible to establish a WQI for the specific conditions of the San Pedro River in Chihuahua, Mexico.

Keywords: WQI, Chihuahua, México, metals, microbiologic

Resumen

Un Índice de Calidad de Agua (ICA) es un modelo unificado para detectar patrones y tendencias de contaminación en un cuerpo de agua. El objetivo fue determinar un ICA para el río San Pedro en Chihuahua, México con parámetros cuantitativos de metales, físico-químicos y microbiológicos. Se recolectaron un total

* Autor de correspondencia
E-mail: robert2741@hotmail.com

de 165 muestras de agua, producto de cinco sitios, tres repeticiones por sitio y muestras mensuales durante el periodo de octubre 2005 hasta agosto 2006. Los sitios estudiados fueron: cercano a la Presa Francisco I. Madero (LP); entre Rosales y Delicias (RD); cercano a la ciudad de Meoqui (M); El Torreón (ET) y; Julimes (El Gramal) (EG). Se cuantificaron los niveles de As, Be, Ca, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, Ta, Va y Zn en un espectrómetro de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) modelo Perkin Elmer 2100. No obstante, únicamente los elementos As, Pb y Cd fueron incluidos en el cálculo del ICA. En forma adicional se determinaron parámetros físicos (temperatura del agua, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS) y sólidos disueltos (SD), químicos (pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Oxígeno Disuelto (OD) y dureza) y microbiológicos (coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF)). El modelo se estableció con la siguiente ecuación; $ICA = \sum [\text{Log Nat } P * (Q/P/p * W_i)] / 100$. Donde: Σ =Sumatoria; Log Nat=Logaritmo Natural; P= Parámetro; Q/P/p=Valor obtenido de dividir el Log Natural de cada parámetro por el valor máximo de concentración permitida, entre el valor mínimo permitido; W_i =Valor ponderado de peso de cada parámetro en la fórmula; 100=Valor para normalizar los índices de una base 0 a 100. El máximo valor del ICA fue detectado para el sitio EG con 76.1 como promedio de todos los meses, en comparación con los sitios LP con 47.0, RD con 67.3, M con 66.7 y ET con 69.1. Al considerar el mes de muestreo, el máximo valor de ICA se calculó en los meses de noviembre con 73.0 y julio con 65.0. Con respecto a los otros parámetros se encontraron las siguientes medias generales; pH de 7.69 ± 0.405 DS, temperatura de $24^\circ C \pm 23.85$ DS, los ST fueron de $1,266.73 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.60$ DS, DBO de $4.51 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.06$ DS, OD de $5.98 \text{ mg l}^{-1} \pm 1.80$ DS, CE de $1.337 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 0.68$ DS, Dureza de $116.06 \text{ mg l}^{-1} \pm 39.93$ DS, CT de $1,729 \text{ NMP} \pm 322.12$ DS y CF de $814.18 \text{ NMP} \pm 800.13$ DS. Respecto a los metales evaluados se encontró que el As se presentaba en un rango de 0.0110 mg l^{-1} a 0.587 mg l^{-1} , mientras que la media general del Pb fue de $0.023 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.01$ DS y del Cd fue de $0.003 \text{ mg l}^{-1} \pm 0.0025$ DS. Fue posible establecer un ICA para las condiciones específicas del río San Pedro en el estado de Chihuahua, México.

Palabras clave: ICA, Chihuahua, México, Metales, microbiológico

Introducción

Un Índice de Calidad de Agua o ICA, es un modelo unificado para detectar patrones y tendencias de contaminación. Un ICA se puede calcular con la información obtenida de muestreos realizados en diferentes cuerpos de agua. De esta manera, se pueden calcular ICA's para lagos y lagunas (Rendon-Von Osten et al., 2006; De la Mora et al., 2005), ríos (Brown y McClelland, 1973; Bordalo et al., 2006) litorales (Aguilera et al., 2001), o incluso, como criterio para diagnosticar el desarrollo de cierta especie de flora y fauna en un determinado ambiente acuático (Alabaster y Lloyd, 1982; Bagley et al., 1997). Como consecuencia, se han desarrollado varias metodologías, en la búsqueda de un ICA que correlacione los parámetros de calidad de agua con una gran variedad de ambientes y ecosistemas (Gupta et al., 2003; Kilgour et al., 2004) o niveles tróficos (Nelly et al., 1994). En general, un ICA es representado por un número entre 0 y 100. En la medida que el valor del ICA

tienda a un extremo, entonces se puede estimar el nivel de contaminación (De la Mora et al., 2005). Los índices más eficaces utilizan un número limitado de variables; por ejemplo, un Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISCA) combina cinco parámetros (Queralt, 1984) mientras que un Índice de Calidad General (ICG) pondera 23 variables físico-químicas. Con respecto a la agrupación de los parámetros, existen dos técnicas; aritméticas y multiplicativas (Brown, 1970) que pueden ser ponderadas, o no, con pesos específicos para cada parámetro. Landwehr y Denninger (1976) demostraron la superioridad de las técnicas multiplicativas sobre las aritméticas.

La cuenca hidrológica del Conchos es considerada como la más importante para el estado de Chihuahua, México, ya que alrededor de un millón de habitantes dependen de las aguas de esta cuenca (Gutiérrez y Borrego, 1999). Además, el agua del río Conchos aporta a los Estados Unidos de Norteamérica alrededor del 75% del agua que fluye por el Río Bravo/Río Grande (TNRCC, 1994)

cantidad que se entrega según acuerdo de tratados internacionales entre ambos países. Desafortunadamente, estudios recientes demostraron que el agua que fluye en los más importantes tributarios del río Conchos se encuentran en menor o mayor grado contaminada (Gutiérrez, 1998; Gutiérrez y Borrego, 1999; Holguín et al., 2006; Rubio et al., 2004; Rubio et al., 2007). No obstante, no se conoce información sobre el nivel de contaminación del río San Pedro, el cual es otro tributario del río Conchos. El objetivo fue determinar un Índice de Calidad de Agua (ICA) con parámetros físico-químicos, microbiológicos y de metales en muestreos de agua del río San Pedro, Chihuahua, México. Se espera que esta información sea de utilidad como un sistema de comparación entre cuerpos de agua, además de que es sencillo y representativo, por lo que cualquier persona podrá evaluar la calidad del agua en su zona de estudio y/o trabajo. Además, la información servirá de base como medida preventiva en aspectos de salud humana o para los ecosistemas de la región.

Material y métodos

El área de estudio se localiza dentro del Distrito de Riego 005 abarcando parte de los municipios de Rosales, Delicias y Julimes en el estado de Chihuahua, México. La región representa una de las más importantes zonas agrícolas, además de que se desarrollan otras actividades como la ganadería, la industria manufacturera y la industria de transformación. Se recolectaron un total de 165 muestras en el río San Pedro. Este total de muestras fue producto de cinco sitios, tres repeticiones por sitio y 11 meses de muestreo en forma mensual, empezando en octubre del 2005 y terminando en agosto del 2006. Los sitios de muestreo fueron debidamente georeferenciados (GPS) y se localizan en forma específica en los siguientes puntos. En la Presa Francisco I. Madero, a la altura del vertedero principal con coordenadas N 28° 09.898', E 105° 37.541', 458576 mE, 3115633 mN y una altitud de 1,206 msnm (LP). Entre el poblado de Rosales y la ciudad de Delicias con coordenadas N 28° 15.406', E 105° 29.409', 451922 mE, 3125743 mN y una altitud de 1,150 msnm (RD). El tercer sitio se localiza cercano a la ciudad de Meoqui con coordenadas N 28° 16.343', E 105° 27.699', 454723 mE, 3127457 mN y una altitud de 1,132

msnm (M). El cuarto punto se encuentra en el poblado El Torreón con coordenadas N 28° 19.335', E 105° 25.140', 458927 mE, 3132972 mN y una altitud de 1,129 msnm (ET). El quinto sitio se localiza en el poblado de Julimes (El Gramal) donde se juntan las aguas del río San Pedro con las aguas del río Conchos en las coordenadas N 28° 20.998', E 105° 24.882', 459360 mE, 3136039 mN y una altitud de 1,117 msnm (EG).

Se colectaron 3 L de agua en cada sitio utilizando recipientes de polipropileno. Los recipientes fueron previamente lavados con una solución detergente, no iónica, libre de metales, enjuagados y sumergidos en HNO₃ (dilución 1-50) por un periodo de 24 h. Una vez obtenidas las muestras de agua, éstas fueron colocadas en hieleras para su traslado al laboratorio de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua donde se conservaron a una temperatura de 4° C.

Para el análisis de las muestras de agua se siguió el método descrito en los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (APHA, 1992) así como lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas para el control de la calidad de resultados analíticos (NOM, 2001a). Se tomaron submuestras de 100 ml las cuales fueron sometidas a digestión con 5 ml de HNO₃ para luego ser filtradas sobre papel Whatman y, enseguida, se aforaron en 100 ml con agua tridestilada. La determinación cuantitativa de los metales y metaloides (As, Be, Ca, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, Ta, Va y Zn) se realizó mediante un espectrómetro de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) modelo Perkin Elmer 2100 propiedad del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

En forma adicional, se determinaron in situ los parámetros físicos de temperatura del agua (NOM, 2000a) con un termómetro de mercurio, la conductividad eléctrica (NOM 2000b) mediante un conductímetro marca Hanna con intervalo de 0.01-19.99 mS cm⁻¹ y sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos mediante gravimetría (NOM, 2001b). Los parámetros químicos evaluados fueron el pH (NOM 2000c) con un potenciómetro Oaktron Modelo 35624-50, Demanda Química de Oxígeno (DQO) con el método de Hach, Demanda Bioquímica de Oxígeno por incubación, oxígeno disuelto (oxímetro Hanna) y dureza mediante cálculos. Las muestras para el

análisis microbiológico fueron conservadas en recipientes estériles y trasladadas al laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua para el análisis de coliformes totales y coliformes fecales a través de la técnica del número más probable.

El ICA se desarrolló con las siguientes etapas; la primera etapa consistió en crear una escala de calificación de acuerdo con los diferentes usos del agua. La segunda, mediante el desarrollo de una escala de calificación para cada parámetro, de tal forma que se estableciera una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación. Después de que fueron preparadas estas escalas, se formularon los modelos matemáticos para cada parámetro, convirtiendo los datos físicos en los correspondientes índices de calidad por parámetro. Debido a que ciertos parámetros son más significativos que otros en su influencia en la calidad del agua, se procedió a introducir factores de ponderación según su orden de importancia. Finalmente, los índices por parámetro fueron promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua.

Se desarrolló el siguiente modelo para el ICA del agua del río San Pedro en Chihuahua al que se le identificó como CHICA.

$$CHICA = \frac{\sum [\ln P * (Q/P * W_i)]}{100} \quad (1)$$

Donde;

Σ = Sumatoria

Log Nat = Logaritmo natural

P = Parámetro

Q/P = Valor obtenido de dividir el Log. Natural de cada parámetro por el valor máximo de concentración permitida, entre el valor mínimo permitido

W_i = Valor ponderado de peso de cada parámetro en la fórmula

100 = Valor para normalizar los índices a una base 0 a 100

Los parámetros que fueron incluidos en la ecuación anterior fueron; pH, temperatura, sólidos totales, DBO, OD, CE, dureza, coliformes totales, coliformes fecales y los metales As, Pb y Cd.

Resultados y discusión

La media general del pH fue de 7.69±0.405 DS donde todos los valores para sitios y meses estuvieron dentro de una condición de neutra a ligeramente alcalina. El máximo valor de pH fue en el mes de julio en LP con 8.8 mientras que el menor valor fue de 6.8 en el mes enero en el mismo sitio. El parámetro de temperatura varió principalmente por efecto de mes de muestreo. El promedio general fue de 24° C±23.85 DS pero en los meses de la temporada invernal (diciembre, enero y febrero) se notó una temperatura menor de 25° C mientras que para los meses de verano (junio, julio y agosto) la temperatura fue superior a 25° C.

La media general de ST fue de 1,266.73 mg·l⁻¹ ±0.603 DS y no se observaron cambios drásticos de esta variable entre sitios, pero si entre meses de muestreo. El menor valor se encontró en el sitio LP en el mes de mayo con 0.0157 mg·l⁻¹ mientras que el valor mayor fue en el ET en noviembre con 0.3216 mg·l⁻¹. La media general de DBO fue de 4.51 mg·l⁻¹±0.0637 donde el máximo valor se observó en EG en el mes de julio con 13.21 mg·l⁻¹ mientras que el valor más bajo fue en LP en el mes de octubre con 1.24 mg·l⁻¹.

Con respecto al parámetro OD se observó una media de 5.98 mg·l⁻¹±1.80 DS, donde el mayor valor se notó en junio en LP con 13.3 mg·l⁻¹ y el menor valor también en LP con 3.75 mg·l⁻¹ pero en el mes de octubre. El análisis de las medias de los datos por meses y puntos de muestreo indicó que las concentraciones de OD se mantuvieron con poca variación y la tendencia mostró que los factores urbanos o antropogénicos no estaban teniendo un efecto muy marcado. Para la variable de CE se encontró un promedio general de 1.337 mS·cm⁻² ±0.68 DS; no obstante, en la Tabla 1 se puede observar que los niveles de CE se fueron incrementando en la medida que el agua fluía. En todos los sitios así como en todos los meses se observaron menores valores de CE en el punto más alto (LP) y mayores en el punto más bajo (EG). La dureza total detectada a partir de los carbonatos de calcio y magnesio fue de 116.06 mg±39.93 DS.

Tabla 1. Valores de medios para el parámetro de conductividad eléctrica por mes y puntos de muestreo (mS·cm²).

Mes	Localidad del muestreo				
	LP	R-D	M	ET	EG
Oct	0.28	0.99	1.83	1.94	1.79
Nov	0.38	1.27	1.71	2.09	1.87
Dic	0.31	0.95	0.77	1.11	1.11
Ene	0.32	0.42	0.61	0.91	1.12
Feb	0.27	0.91	1.23	1.51	1.87
Mar	0.30	1.56	1.86	2.00	2.10
Abr	0.31	1.59	1.92	2.07	2.15
May	0.36	1.84	1.96	2.08	2.22
Jun	0.30	1.73	1.99	2.14	2.28
Jul	0.28	1.44	1.65	1.26	2.33
Ago	0.35	0.94	1.31	1.58	1.15

En la Tabla 2 se presentan los valores de dureza donde se observa el valor más alto en junio en EG mientras que el valor más bajo fue en LP con 19.15 mg.

Tabla 2. Valores medios para dureza por mes y puntos de muestreo (mg).

Mes	Localidad del muestreo				
	LP	R-D	M	ET	EG
Oct	22.67	90.07	119.9	153.2	139.3
Nov	19.16	68.83	83.55	126.2	71.0
Dic	23.91	128.5	165.7	140.4	147.6
Ene	26.53	147.4	186.8	177.5	203.7
Feb	21.32	59.73	49.4	135.5	120.0
Mar	27.00	126.4	140.4	143.9	211.9
Abr	31.85	149.1	167.4	179.3	158.2
May	36.96	176.6	164.7	170.9	177.2
Jun	39.86	226.4	197.4	197.2	204.4
Jul	45.64	120.9	129.9	163.2	49.8
Ago	28.36	55.07	74.74	74.5	76.1

Se encontró una media de 1,729.99 NMP±3,221.25 para la variable de coliformes totales (Tabla 3) mientras que para coliformes fecales se encontró una media general de 814.18 NMP±800.13 DS (Tabla 4).

Tabla 3. Valores medios para coniformes totales por mes y puntos de muestreo (NMP).

Mes de muestreo	Localidad de muestreo				
	LP	R-D	M	ET	EG
Octubre	930.000	1100.00	513.000	1100.0	1000.0
Noviembre	674.000	968.00	456.000	989.0	856.0
Diciembre	612.000	834.00	369.000	1100.0	765.0
Enero	437.000	756.00	212.000	857.0	563.0
Febrero	513.000	852.00	189.000	895.0	359.0
Marzo	408.000	654.00	110.000	954.0	127.0
Abril	595.667	860.67	308.167	982.5	611.7
Mayo	654.000	732.00	359.000	867.0	875.0
Junio	602.958	844.58	314.521	968.1	644.6
Julio	756.000	915.00	456.000	11000.0	43000.0
Agosto	618.263	851.63	328.669	1971.3	4880.1

Tabla 4. Valores medios para coniformes decales por mes y puntos de muestreo (NMP).

Mes	Localidad del muestreo				
	LP	R-D	M	ET	EG
Oct	124	287	980	1560	1100
Nov	98	185	634	1498	1091
Dic	92	179	456	953	867
Ene	75	94	35	745	631
Feb	59	68	217	563	594
Mar	57	34	162	346	540
Abr	87	96	129	830	650
May	150	460	93	1100	1100
Jun	75	93	1100	1100	1100
Jul	1100	1400	4000	400	11000
Ago	192	290	813	910	1868

Las concentraciones de las comunidades bacterianas obtenidas en éste estudio fueron altas en especial después de eventos de lluvia, posiblemente por el arrastre de desechos fecales de animales domésticos y silvestres.

Los niveles de As detectados excedieron en algunos casos hasta un 100% las concentraciones para agua potable Se detectaron valores en un rango de 0.0110 mg·l⁻¹ a 0.587 mg l⁻¹. El promedio general fue de 0.104 mg·l⁻¹±0.234 DS. En referencia al Pb, la media general fue de 0.023 mg·l⁻¹±0.01 SD notándose que algunos puntos excedieron los límites internacionales y, como consecuencia, se puede poner en riesgo la vida acuática, animal y la salud humana. Los valores observados para el Cd fueron de 0.003 mg·l⁻¹±0.0025 DS.

En el cuadro 5 se presentan los valores de ICA que fueron calculados en el presente estudio. Es notorio que en el sitio LP se encontró una media de 47.0 y que el máximo valor en esta localidad se presentó en el mes de julio con 60.8 mientras que el menor valor fue en abril con 34.2. Con respecto a la localidad RD la media fue de 67.3 notándose el máximo valor en el mes de mayo con 83.9 y el menor valor fue de 55.3 en agosto. Para el caso específico de la localidad M se encontró que el máximo valor del ICA fue en noviembre con 78.5 mientras que el menor valor se detectó en abril con 49.9. En la localidad ET se calculó una media de 69.1 con el máximo valor en noviembre (79.4) y el menor en marzo (43.5). Puede observarse que en EG se obtuvo el ICA de mayor valor (76.1) en comparación con la media de los otros sitios. En esta localidad el máximo valor fue en julio con 95.1 mientras que el menor se detectó en marzo (60.6). Además, en la Tabla 5 se observa la media de los ICA calculados por mes de muestreo. Se nota que el

mayor nivel de ICA se obtuvo en los meses de noviembre y julio con 73, mientras que el menor valor se detectó en marzo con un ICA de 51.

Tabla 5. Valores finales obtenidos de los ICAs por mes y sitio (TA= total por año).

Mes	Localidad de muestreo					ICA
	LP	R-D	M	ET	EG	
Oct	51.6	69.7	66.9	74.0	75.8	68
Nov	46.6	78.1	78.5	79.4	82.3	73
Dic	45.6	68.5	74.8	74.4	75.7	68
Ene	50.8	71.1	72.9	70.6	81.0	69
Feb	45.5	61.7	71.3	70.1	74.5	65
Mar	37.6	61.2	52.9	43.5	60.0	51
Abr	34.2	63.2	49.9	69.3	74.1	58
May	51.2	83.9	61.0	73.1	74.5	69
Jun	39.6	63.7	73.8	71.0	69.1	63
Jul	60.8	64.3	75.9	69.8	95.1	73
Ago	54.2	55.3	56.0	64.5	74.5	61
TA	47	67.3	66.7	69.1	76.1	65

En la Tabla 6 se muestran los valores de ICA calculados por estación. Es evidente que el máximo valor se detectó en la localidad EG y en la temporada de verano con un ICA de 93.9. El valor medio del verano fue superior a los valores medios de las otras estaciones. Asimismo, se observa que el menor ICA fue detectado en la temporada invernal donde se calculó un valor medio de 57.6

Tabla 6. Valores finales de los ICA's por puntos de muestreo y temporada (Oto= otoño, Inv=invierno, Pri=primavera, Ver=verano, TA= total año).

Sitio	Temporada				ICA
	Oto	Inv	Pri	Ver	
LP	54.4	43.7	42.5	56.5	49
R-D	75	63.6	71.8	58.6	67
M	80.7	59.3	59.3	67.2	67
ET	79.1	52.7	70.7	59.7	66
EG	81.1	68.5	71.7	93.9	79
TA	74.1	57.6	63.2	67.2	66

Los valores de pH estuvieron dentro un rango permisible de 6.5 a 8.5 y coinciden con lo reportado en forma previa por Gutiérrez y Borrego (1999) para la misma zona, así como por lo reportado por Rubio et al., (2004) para otros tributarios de la cuenca del Conchos. Los valores de temperatura variaron por efecto de estación y los índices para el incremento de temperatura, en general, estuvieron en la categoría de bueno a excelente. El análisis de medias indicó que las concentraciones de OD se mantienen más o menos estables, por lo que se podría hipotetizar que los factores urbanos o antropogénicos no están teniendo un efecto muy

marcado en esta variable. No obstante, debido a la reducción y/o disponibilidad mínima de oxígeno en algunos puntos, se podría establecer que el río San Pedro se encuentra en proceso de deterioro, por lo menos para la época de estiaje, y que, en estas condiciones desfavorables se podría ocasionar una pérdida irreversible de especies de flora y fauna.

La mayor CE se registró en el último punto de muestreo (EG) seguido del ante penúltimo punto (ET) en los cuales se evidencia un incremento en comparación con los valores reportados por Gutiérrez y Borrego (1999) y Rubio et al., (2004). La tendencia observada es un incremento aguas abajo a partir del tercer punto (M). Los niveles más bajos de sólidos totales se detectaron en LP, al igual que la salinidad y dureza, lo cual fue corroborado por los niveles más altos en el parámetro de alcalinidad. Las cantidades de sólidos registrados presentaron una fluctuación ascendente a partir de la segunda estación de muestreo. Esto posiblemente se deba al ingreso de aguas ácidas provenientes de los colectores urbanos así como la descomposición de desechos orgánicos de las actividades ganaderas y/o la presencia de contaminantes de origen industrial.

El parámetro de dureza a partir de carbonatos de calcio y magnesio fue de 920.97 mg; sin embargo, debería de considerarse agregar los valores de metales alcalinotérreos como el litio y el estroncio que, en el caso de esta zona, indican valores altos. Las concentraciones de coliformes totales y coliformes fecales fueron altas; sobre todo, después de eventos de lluvia. Esto se podría explicar por el arrastre de desechos fecales de animales domésticos, silvestres por desechos aportados por las aguas residuales de las poblaciones, así como por diversos tipos de desechos orgánicos. Los resultados sobrepasan algunos límites establecidos en diversas normas, tanto nacionales como internacionales, por lo que potencialmente colocan en riesgo la salud de los pobladores que utilizan esas aguas en forma directa.

Con respecto a los metales evaluados, los resultados indicaron que estos tres metales excedieron en algunos puntos los límites establecidas para agua potable, vida acuática, recreación y actividades agropecuarias. Los niveles de arsénico detectados en este estudio se pueden consultar en Gutiérrez et al., (2007). Con respecto al Pb se encontró que la media general de las 165 determinaciones fue de 0.023 mg l⁻¹±0,0106 SD y que supera los límites

máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM, 1981 modificada en el 2005) la cual señala una concentración de 0.01 mg·l⁻¹. El Cd se considera uno de los metales más peligrosos para la salud humana (Montague, 1987). En este estudio se detectaron niveles ligeramente superiores a los mencionados en las normas nacionales e internacionales. Los valores observados fueron de 0.003 mg·l⁻¹±0.0025 DS cuando los límites máximos indican 0.005 mg l⁻¹.

En resumen, de acuerdo a los resultados obtenidos los parámetros de pH, temperatura y sólidos totales se consideran de buena calidad; el DBO y OD de regular calidad; CE, dureza, coliformes totales, coliformes fecales, As, Pb y Cd se podrían considerar como de mala calidad.

Los índices de calidad de agua obtenidos a partir de los ensayos y estudios propuestos por Brown (1970), Landwehr y Denninger (1976), Ott (1978), León (1991) y De La Mora (2005) sirvieron de base para la elaboración del ICA, el cual fue adaptado a las condiciones de Chihuahua y calculado con los parámetros obtenidos en el agua del río San Pedro. Los valores más bajos del ICA se observaron en LP durante marzo (37.6), abril (34.2) y junio (39.6). Estos resultados se pueden explicar debido a la disminución del caudal, por ser época de estiaje y precipitaciones pluviales escasas. Los valores más altos se detectaron en mayo en el punto RD (83.9) así como en noviembre en EG (95.1). Estas épocas coinciden con la apertura de la presa así como con la presencia de lluvias que ocasiona un lavado de contaminantes por las fuertes avenidas. De acuerdo a criterios internacionales, y con la información de los ICA's calculados, el agua del río San Pedro no debería consumirse en forma directa, no es apta para actividades de recreación y no es apta para la vida acuática; sin embargo, es aceptable para la industria y la agricultura. Los ICA's obtenidos son razonables si se considera que, para su cálculo, se utilizaron algunos parámetros que exceden los valores máximos permitidos por las normas nacionales e internacionales. Por ello, es necesario implementar una red de monitoreo constante y permanente que permita detectar variaciones o fluctuaciones de los valores normales que puedan poner en riesgo la salud de las personas, la fortaleza de los ecosistemas y las actividades económicas relacionadas con el uso del agua.

Es importante mencionar que el ICA no tiene la capacidad de mostrar los efectos acumulativos que

provocan los tóxicos u otros parámetros en el tiempo y, mucho menos, los efectos sinérgicos o antagónicos provocados sobre los organismos que ahí habitan o alguna otra condición. Se pueden tener valores adecuados de un ICA y, sin embargo, ser un sistema severamente alterado, por no permitir el desarrollo de una comunidad de organismos sana y diversa.

Para las características hidrológicas, físico-químicas y biológicas se registraron valores que evidencian un claro deterioro del ecosistema del río San Pedro siendo los coliformes fecales y totales, así como los metales As, Pb y Cd los de mayor significancia por las cantidades encontradas en el agua. Especialmente, las concentraciones y cantidades de los diferentes parámetros de calidad del agua, muestran una tendencia a incrementarse. Por otro lado, los niveles de escorrentías naturales se están viendo seriamente afectados y disminuidos por las actividades de los pobladores de la región lo que está alterando los ciclos naturales del río y que esta afectando a los ecosistemas existentes así como la salud de los habitantes de las áreas ribereñas.

Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten concluir que es posible diseñar un ICA de acuerdo a las necesidades e infraestructura que se tiene en diferentes Instituciones. Además, este estudio servirá de base para futuras investigaciones que involucren el desarrollo de ICA específicos para diferentes cuerpos de agua

Bibliografía

- Aguilera, P.A., Castro, H., Rescia, A., Schmitz, M.F. 2001. Methodological development of an index of coastal water quality: application in a tourist area. *Environ Manage* 27(2):295-301
- Alabaster, J.S. and Lloyd, R. 1982. *Water Quality Criteria for Freshwater Fish*. FAO and Butterworth's, London. 361 p
- APHA, 1992. *American Public Health Association*. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, 1,294 p
- Bagley, V.C., Amacher, K.J. y K.F.Poe. 1997. *Analysis of water quality for livestock*. Utah State University, Logan UT 84322-5600.
- Biological Monitoring for Environmental Effects. Ed. D. L. Worf. Heath, Lexington, MA. :97-112.
- Bordalo, A.A., Teixeira, R., Wiebe, W.J. 2006. A water quality Index applied to an international shared river basin: the case of the Douro River. *Environ Manage* 38(6):910-920
- Brown, R., 1970. A Water Quality Index - Do We Dare? *Water Sewage Works* 11, pp. 339-343.

- Brown, R., McClelland, N. 1973. Water Quality Index. Application in the Kansas River Basin. 46th. Conf., Water Poll. Fed., Cleveland, Ohio.
- De la Mora, O.C., Rubio Arias, H., García Velasco, J. 2005. Índice de Calidad de Agua en el Lago de Chapala, Jalisco, México. Capítulo II. Libro Técnico No. 1, INIFAP-SAGARPA. Contribución al estudio de los Servicios Ambientales, 33-54
- Gupta, A.K., Gupta, S.K., Patil, R.S. 2003. A comparison of water quality indices for coastal water. *Journal of Environmental Science and Health* 38(11): 2711-2725
- Gutiérrez, M. 1998. Water Quality of the Rio Conchos, Chihuahua: A Reconnaissance Study. Uniting the Basin Biannual Conference of the Rio Grande/Rio Bravo Basin Coalition. El Paso, TX,
- Gutiérrez, M. and Borrego. P. 1999. Water quality assessment of the Rio Conchos, Chihuahua, Mexico. *Journal of Environment International*, 25, (5):573-583
- Gutiérrez, R., Rubio, A.H., Quintana, R.M., Ortega, J.A., Pinedo, C. 2007. Arsenic concentration in the San Pedro River in Delicias, Chihuahua, Mexico. *International Health Risk Conference 2007*, República de Malta, Junio 25-28 del 2007; 210-219
- Holguín, C., Rubio, H., Olave, M.E., Saucedo, T.R., Gutierrez, M., Bautista, M.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
- Landwehr, J., Denninger, R. (1976). Comparison of several water quality indices. *Water Pollution Control Fed* 48(5), pp. 954-958.
- León, L.F., 1991. Índice de Calidad del Agua, ICA, Inf. # SH-9101/01, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 36 p.
- Montague, P..1987. Toxic Pollutants Increasing in the Nation's Rivers; Study says coal and fertilizer are causes. *Science News* April 4, 214
- NOM, 1981. Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-1981. Determinación de metales, método espectrofotométrico de Absorción Atómica, Diario Oficial de la Federación del 22 de febrero de 1982.
- NOM, 2000a. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación 23 de julio de 1980.
- NOM, 2000b. Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación de la conductividad eléctrica Método de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 27 p.
- NOM, 2000c. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación del pH. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación del 25 de marzo de 1980
- NOM, 2001a. Norma Mexicana NMX-AA-115-SCFI-2001. Análisis de agua-Criterios generales para el control de la calidad de resultados analíticos. Secretaría de Economía. 37 p.
- NOM, 2001b. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de julio de 1981.
- Ott, W.R. (1978). *Environmental Indices, Theory and Practice*, AA Science, Ann Arbor, Michigan.
- Queralt, 1984. Use of benthic macroinvertebrates as indicators of environmental quality. In
- Rendon-Von Osten, J., Memije, M.G., Ortiz, A., Soares, A.M., Guilhermino, L. 2006. An integrated approach to assess water quality and environmental contamination in the fluvial-lagoon system of the palizada river, Mexico. *Environ Toxicol Chem* 2006(11):3024-3034
- Rubio, A.H., Quintana, C.E., Wood, K., Saucedo, T.R., Bautista, M.R. 2007. Vanadium and lithium contamination in freshwaters of the Conchos river in Chihuahua, Mexico. Aceptado para publicación en la conferencia internacional titulada *Environmental Health Risk 2007* que se llevará a cabo en la República de Malta en el periodo de junio 27-29.
- Rubio, A.H., Word, K., Alanis, H.E. 2004. Water pollution in the rio Conchos of northern Mexico. Development and application of computer techniques to Environmental studies X. Ed. G. Lationi, G. Passerini, C.A. Brebbia. 167-176
- TNRCC, 1994. Texas Natural Resources Conservation Comisión. The state of Texas water quality inventory 12 th ed. Report No. SFR-11 Austin, Texas, p. 283