

ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) EN LA PRESA LA BOQUILLA EN CHIHUAHUA, MÉXICO

Water quality index (WQI) in the dam La Boquilla in Chihuahua, Mexico

¹Héctor Osbaldo Rubio Arias, ^{2*}Roberto Carlos Ortiz Delgado, ¹Rey Manuel Quintana Martínez, ³Rubén Alfonso Saucedo Terán, ²Jesús Manuel Ochoa Rivero, ²Nora Ivet Rey Burciaga

¹Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

²Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Periférico Francisco R. Almada Km. 1 Carretera Chihuahua-Cuauhtémoc C.P. 31453, Chihuahua, Chihuahua, México.

*aguila_ortiz1@hotmail.com

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Artículo científico recibido: 09 de noviembre de 2013, **aceptado:** 02 de enero de 2014

RESUMEN. Un Índice de Calidad de Agua (ICA) es una herramienta estadística para estimar la calidad de un cuerpo de agua. El objetivo fue determinar un ICA para la presa La Boquilla en Chihuahua, México. Seis puntos de muestreo fueron seleccionados aleatoriamente y muestras de agua se colectaron mensualmente, a cuatro profundidades: 0.30 m, 5.0 m, 10.0 m y 15.0 m. Se cuantificó el potencial hidrógeno (pH), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), temperatura (T), cloruros (Cl⁻), dureza total (DT) y turbidez. El análisis estadístico consideró un arreglo de tratamientos factorial 12 × 4 donde el factor A fue el tiempo de muestreo (12 meses) y el factor B la profundidad (cuatro profundidades). El ICA fue calculado para 0.30 m y 15.0 m de profundidad aplicando una ecuación universal. Los rangos de las variables evaluadas fueron como sigue: pH de 7.6 a 9.1; OD de 4.9 a 12.1 mg L⁻¹; T de 11.6 a 25.5°C; CE de 173 a 219 μS cm⁻¹; SDT de 152.9 a 187.08 mg L⁻¹; DT de 295 a 360 mg L⁻¹, turbidez de 1.66 UTN a 4.75 UTN y Cl⁻ de 2.91 a 10.37 mg L⁻¹. El ICA promedio para la profundidad de 0.30 m fue de 2.7 que cataloga al agua como buena y el ICA calculado para la profundidad de 15.0 m fue de 2.45 que describe el agua de regular a buena. Se concluye que el agua de la presa La Boquilla se puede considerar adecuada para la producción agrícola, uso pecuario y producción piscícola.

Palabras clave: Contaminación, índice, atributo, México, embalse.

ABSTRACT. A Water Quality Index (WQI) is a statistic tool that allows the quality of a water body to be estimated. The purpose of this study was to establish a WQI for the dam La Boquilla in Chihuahua, Mexico. Six sampling sites were selected randomly. Water samples were collected monthly from four depths: 0.30 m, 5.0 m, 10.0 m and 15.0 m. The pH, dissolved oxygen (DO), electric conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), temperature (T), chlorides (Cl⁻), total hardness (TH) and turbidity were quantified. The statistical analyses followed a factorial 12 × 4 arrangement of treatments, where factor A was the time of sampling (12 months) and factor B was the depth (four depths). The WQI was calculated for the depths of 0.30 m and 15.0 m applying a universal equation. The ranges of the evaluated variables were as follows: pH from 7.6 to 9.1; DO from 4.9 to 12.1 mg L⁻¹; T from 11.6 to 25.5°C; EC from 173 to 219 μS cm⁻¹; TDS from 152.9 to 187.08 mg L⁻¹; TH from 295 to 360 mg L⁻¹, turbidity from 1.66 UTN to 4.75 UTN and Cl⁻ from 2.91 to 10.37 mg L⁻¹. The average WQI for the 0.30 m depth was 2.7, which indicates the water is good, and the WQI calculated for the 15.0 m depth was 2.45, which describes the water as regular to good. It is concluded that the water in the dam La Boquilla is suitable for agricultural purposes, irrigation and fishing.

Key words: Pollution, index, value, Mexico, dam.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital e insustituible que permite y potencializa la vida en la tierra. Su contaminación es un grave problema que reduce y encarece el suministro de agua potable en la población. Este recurso natural es esencial para la vida humana y es la parte más delicada del ambiente (Das y Acharya 2003). El descontrolado crecimiento de la población, así como el vertiginoso ritmo de la industrialización a nivel mundial, han derivado en una mayor demanda de agua dulce en el mundo (Ramakrishnaiah et al. 2009). Por esta razón, es necesario diseñar herramientas que permitan ponderar la calidad del agua en un tiempo dado. Por ejemplo, un Índice de Calidad de Agua (ICA) es una herramienta que permite diagnosticar la calidad de este recurso natural. Esta metodología fue desarrollada, por primera vez, por la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF-*National Science Foundation*) en los Estados Unidos de Norteamérica (Brown 1970). A la fecha, el uso del ICA es considerado como una de las herramientas más eficaces para la obtención y comparación de resultados (Pradhan et al. 2001, Cadavid et al. 2010, CCME 2012). Diversos estudios han sido desarrollados en todo el mundo como en Canadá (Rosemond et al. 2008), Ghana (Banoeng-Yakubo et al. 2009), Corea (Song y Kim 2009), Brasil (Coletti et al. 2010), Chile (Espejo et al. 2011) y la India (Rajankar et al. 2011) los cuales han identificado el nivel de contaminación en reservorios, lagos, ríos y en agua subterránea. En el caso particular de México se ha cuantificado un ICA para el Lago de Chapala en Jalisco (De la Mora et al. 2005) y para la presa Luis L. León en Chihuahua (Rubio-Arias et al. 2012).

La cuenca hidrológica del Conchos en el norte de México, es considerada como una de las más importantes del país y la más importante para el estado de Chihuahua. Diversos estudios efectuados en esta cuenca han sugerido diversos niveles de contaminación de sus ríos y tributarios (Rubio-Arias et al. 2004, Rubio-Arias et al. 2010) así como de sus áreas ribereñas (Rubio et al. 2005). En otro estudio, Holguín et al. (2006) reportaron altos niveles de contaminación en el agua de la

parte baja de la cuenca y encontraron altas concentraciones de metales como aluminio, cromo, cobre, fierro y plomo. El objetivo de este estudio fue desarrollar un Índice de Calidad de Agua (ICA) para la presa La Boquilla, ubicada en el estado de Chihuahua, México, la cual es la más grande e importante del Estado. Los resultados de este estudio ofrecerán información valiosa para todas las autoridades y usuarios para establecer procesos de planeación sustentable de este escaso recurso en el norte de México. Además, esta metodología será de utilidad para todos los interesados en calcular el nivel de contaminación de los ecosistemas acuáticos que se encuentran a lo largo de nuestro país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y obtención de muestra de agua

El estudio se llevó a cabo en la presa La Boquilla también conocida como Lago Toronto, la cual se ubica entre las coordenadas 27° 32' 14.67" y 27° 30' 56.60" Norte y 105° 23' 21.01" y 105° 43' 25.26" Oeste. Su cortina presenta una altura de 80 m y cuenta con una capacidad de 2 894 hm³, siendo utilizada principalmente para fines de irrigación en el Distrito de Riego 005, el cual es considerado como uno de los más importantes del país y en especial de Chihuahua (INEGI 2003). Este embalse se localiza a dos horas de la capital del Estado en el municipio de San Francisco de Conchos (Figura 1). La presa es la más grande e importante del estado de Chihuahua y es parte de la región hidrológica del Río Bravo dentro de la corriente del Río Conchos. Este embalse presentaba un volumen útil de 2 781 hm³ en octubre de 2009 (CONAGUA 2009). La zona presenta un clima semiárido extremoso con una temperatura máxima extrema de 41 °C. Su temperatura media mínima es de -5.5 °C y la media anual es de 18.7 °C. Se tiene una precipitación media anual de 466.1 mm con alrededor de 65 días de lluvia, principalmente en el periodo de verano (julio-septiembre) así como una humedad relativa de 45 % y los vientos dominantes provienen del suroeste.

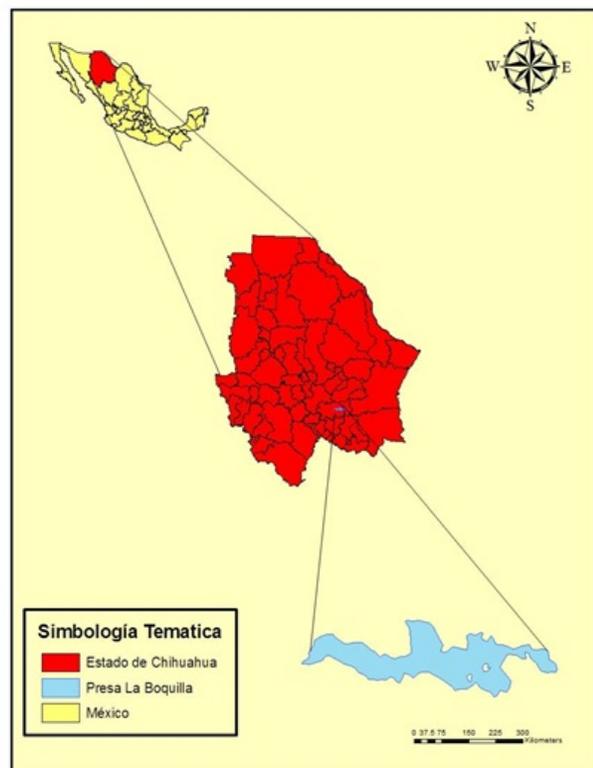


Figura 1. Localización de la presa la Boquilla en el estado de Chihuahua, México.

Figure 1. Location of La Boquilla Dam in the State of Chihuahua, Mexico.

El muestreo de agua se realizó en el período de marzo de 2011 a febrero de 2012 bajo un muestreo sistemático. En el área total de la presa se identificaron cuadrantes de aproximadamente 1 km de largo por 1 km de ancho con ayuda del programa de imágenes satelitales Google EarthTM (Google Earth 2010) y se seleccionaron en forma aleatoria seis cuadrantes, localizando como primer cuadrante el más alejado del embarcadero. Cada cuadrante en el que se tomaron las muestras, quedó separado por al menos 1 km del otro y fue localizado por medio de un sistema de posicionamiento global (GPS) revisando en cada caso las coordenadas para asegurar que el muestreo fuera realizado dentro del cuadrante determinado. En cada sitio de muestreo se obtuvieron cuatro muestras a las siguientes profundidades; 0.30 m, 5.0 m, 10.0 m y 15.0 m. Por tanto, se obtuvieron un total de 24 muestras mensuales y 288 en total en los 12 meses. La toma de muestras se efectuó de acuerdo al criterio establecido en la

norma mexicana NMX-AA-014-1980 (NMX 1980) que especifica los lineamientos y recomendaciones para muestreos en cuerpos receptores de aguas superficiales.

Para la toma de muestras se utilizó un muestreador Rickly Hydrological marca PlanoTM, el cual se compone de un cilindro con capacidad para 2 L de agua por cada inmersión. El muestreador fue preparado para que mediante un mecanismo de pinzas se abrieran las tapas de la parte superior e inferior. El aparato era introducido hasta llegar a la profundidad establecida por medio de una cuerda que fue debidamente graduada. Una vez que el muestreador se encontraba a la profundidad indicada se enviaba por medio de la cuerda una pieza de cobre llamado mensajero, el cual al hacer contacto con el muestreador liberaba las tapas inferior y superior atrapando la muestra y sellándola.

Las variables de potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y temperatura (T) se determinaron *in situ* utilizando un potenciómetro Hanna Instruments 2010 modelo Waterproof pH/EC/Temp. El oxígeno disuelto (OD), los sólidos disueltos totales (SDT) y la turbidez también se cuantificaron *in situ*, con el apoyo de un multiparámetro OD/CE/Temp portable sension 156 de marca Hach para el OD, con un Waterproof TDS Test Low marca OAKTON Instruments los SDT y con un turbidímetro HI93703 marca Hanna Instruments la turbidez. En laboratorio se cuantificaron los parámetros de cloruros (Cl^-) y la dureza total (DT) siguiendo lineamientos oficiales. La concentración de Cl^- fue valorado por titulación con AgNO_3 y el resultado se expresa en mg L^{-1} (NMX 2001a). La DT se llevó a cabo por el método de titulación con etilendinitrilo tetracetato (EDTA) y el resultado se presenta en mg L^{-1} (NMX 2001b).

Análisis estadístico y cálculo del ICA

En una primera etapa, los datos de cada parámetro fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño de tratamientos factorial 12×4 utilizando el programa Minitab 16.1 (Rubio y Jiménez 2012). El factor A fue el tiempo de muestreo (los 12 meses) y el factor B fue la profundidad (0.30 m, 5.0 m, 10.0 m y 15.0 m). De

esta manera se detectó el efecto del tiempo, de la profundidad y de la interacción mes \times profundidad. Además, se realizó un análisis de correlación entre las variables fisicoquímicas bajo estudio.

Para el cálculo del ICA se eligieron los parámetros más comúnmente utilizados en la literatura, así como los de mayor importancia de acuerdo a la utilización que se le da al agua del embalse (Tabla 1). Para computar el ICA se siguieron tres pasos. En un primer paso, a cada parámetro se le asignó un peso específico (W_i) de acuerdo con su importancia en la calidad del agua. Este valor de W_i fue asignado en el rango de uno a cuatro (1-4) siendo utilizado en rango ascendente en nivel de importancia de cada parámetro; es decir, al parámetro más importante se le asignó el número cuatro y al de menor importancia el número 1 (Tabla 1). De esta manera, se consideró que las variables de pH y OD eran las más impactantes en un ecosistema de estas características, por lo cual se les asignó el máximo valor de 4. En un segundo paso, se asignó un valor de P_i , donde el número uno fue para los rangos deseables de calidad y, el número dos, para los parámetros que se encontraban fuera de los rangos deseables o límites establecidos. El valor de W_i y P_i fue de acuerdo a su importancia dentro de los factores de contaminación de agua así como los usos para los cuales se va a destinar este recurso en concordancia con una base de expertos en el tema y literatura citada (SNET 2012).

Una vez establecidos los valores de W_i y P_i se realizó la cuantificación del ICA utilizando la siguiente ecuación reportada por Rubio-Arias *et al.* (2012).

$$ICA = \sum \frac{W_i P_i}{P_i} (K)$$

Dónde:

ICA = Índice de Calidad de Agua

W_i = Peso específico asignado a cada variable (1-4)

P_i = Valor asignado a cada variable de acuerdo con los resultados previos; es decir, si el resultado se encuentra dentro o fuera del rango deseable (1-2)

K = Es una constante

El valor de la constante tomó los valores de 0.5, 0.75 y 1.0 y se asignó de acuerdo a las condiciones de turbiedad que se observaron en el agua al momento de obtener la muestra; es decir, fue un valor para todo el cuerpo de agua. El valor de 1.0 correspondió a un agua clara sin evidencia de problemas de contaminación, el valor de 0.5 en el muestreo cuando se observaron las peores condiciones de contaminación y; el 0.75 se tomó como un valor intermedio.

Para obtener los valores extremos que pudieran ser calculados (rango de ICA), se aplicó la ecuación descrita previamente y los resultados fueron de un máximo de 3.3 (ICA = 3.3) que fue considerado como una excelente calidad de agua y un valor mínimo de 1.3 (ICA = 1.3) para mala calidad de agua. De acuerdo con este rango, se interpretaron los valores de calidad excelente, buena, regular y mala como se observa en la tabla de valores (Tabla 2). Esta sistema de evaluación es similar a la utilizada en otras investigaciones (Rubio-Arias *et al.* 2012). Es importante mencionar que el cálculo del ICA se realizó únicamente para dos profundidades: 0.30 m y 15 m. Estos dos cálculos se realizaron para contrastar profundidades extremas dado que el análisis estadístico no detectó, en general, diferencias entre las profundidades intermedias.

RESULTADOS

Análisis independientes de parámetros evaluados

Para el parámetro de pH se detectó significancia estadística por efecto de mes ($p < 0.05$), profundidad ($p < 0.05$) y en la interacción mes \times profundidad ($p < 0.05$). Este efecto de interacción se observa claramente en cada uno de los meses de muestreo, la cual se intensificó en los meses de junio, agosto, diciembre y enero como se puede apreciar en la Figura 2a. En estos meses, las lecturas de pH superaron las normas de calidad para agua potable establecidas en la norma mexicana (NMX1994) y para agua de uso agrícola. Para la variable de OD también se detectó efecto por el factor de mes ($p < 0.05$), profundidad ($p < 0.05$) y en la interacción ($p < 0.05$) como se puede obser-

Tabla 1. Peso específico (Wi) y rangos deseados para cada parámetro con sus valores de (Pi).

Table 1. Specific weight (Wi) and assigned values for water quality parameters (Pi).

Parámetro	Unidad	Wi	Rango	Pi <R>	Pi >R<	Citas
Potencial de Hidrógeno		4	7 - 8.5	1	2	(Rubio-Arias et al. 2012)
Oxígeno Disuelto	mg L ⁻¹	4	5 - 7	1	2	(Marín, 1995)
Conductividad Eléctrica	μS cm ⁻¹	3	150 - 200	1	2	(ELAW, 2002)
Temperatura	°C	3	20 - 40	1	2	(NOM-001-SEMARNAT-1996)
Sólidos Disueltos Totales	mg L ⁻¹	3	120 - 600	1	2	(ELAW, 2002)
Dureza	mg L ⁻¹	2	100 - 150	1	2	(Contreras, 2012)
Turbidez	UTN	3	1 - 4	1	2	(NOM-127-1994)
Cloruros	mg L ⁻¹	1	4 - 10	1	2	(ELAW, 2002)

var en la Figura 2b. El promedio de OD durante los diez meses de muestreo fue de 7.70 mg L⁻¹. Para la variable de T, el ANOVA detectó diferencias estadísticas para el factor de mes ($p < 0.05$), profundidad ($p < 0.05$) y para la interacción ($p < 0.05$). La Figura 2c muestra la interacción entre los factores y se observa que la mayor variación se presentó en junio. Durante los 12 meses de muestreo, la media de T fue de 18.5 °C y tuvo una variación del mes más frío con 11.6 °C en enero y el mes más cálido que fue agosto con una media de 25.5 °C. Para la variable de CE se encontraron diferencias estadísticas solamente para el factor de mes ($p < 0.05$). Los valores de CE variaron entre 173.3 a 217.9 μS cm⁻¹ y se obtuvo una media general en los doce meses de 202.3 μS cm⁻¹. En la Figura 2d se observa que la concentración de CE mostró una tendencia hacia el incremento durante el periodo de muestreo, con una caída importante en los meses de junio y julio.

Tabla 2. Rangos de resultados para evaluar los resultados del Índice de Calidad de Agua.

Table 2. Value range to evaluate the Water Quality Index results.

Resultados del análisis			Calidad del ICA
1.3	A	1.8	Malo
1.9	A	2.4	Regular
2.5	A	2.8	Bueno
2.9	A	3.3	Excelente

Para la variable de SDT se detectó diferencia estadística únicamente para el factor de mes de muestreo ($p < 0.05$) lo cual se ejemplifica en la Figura 3a. Los valores de esta variable se encontraron en un rango de 152.9 y 187.08 mg L⁻¹ con

una media general de 169.5 mg L⁻¹. Estos valores se encuentran dentro de los límites permisibles de agua para uso agrícola (NMX 1994) y los estándares de calidad para uso agrícola en otros países (ELAW 2002). Para la variable de DT se detectaron diferencias solamente para el factor mes ($p < 0.05$) y los resultados se pueden visualizar en la Figura 3b. La media general fue de 324.4 mg L⁻¹ donde al mes de marzo de 2011 le correspondió el menor registro con 295 mg L⁻¹, y el más elevado en febrero de 2012 con 360 mg L⁻¹. Para la variable de Cl⁻, el ANOVA detectó efecto únicamente por el factor mes ($p < 0.05$) pero no para la profundidad ni su interacción ($p > 0.05$). En la Figura 3c se muestra el comportamiento para esta variable dentro de los meses de muestreo. Se puede observar que en cuanto al factor profundidad no existieron diferencias, mientras que en cuanto al factor mes se observa que va en aumento al considerar los meses de muestreo. La concentración media de Cl⁻ durante los meses de evaluación fue de 6.35 mg L⁻¹ presentándose el mayor nivel en diciembre con una concentración de 10.37 mg L⁻¹ mientras que la concentración más baja se presentó en el mes de abril con 2.91 mg L⁻¹. En la variable de turbidez sólo se detectaron diferencias para el factor mes ($p < 0.05$). Los datos tuvieron una media general de 3.27 UTN, donde el mes con mayor concentración fue mayor con 4.75 UTN y el mes que presentó la menor turbidez fue abril con 1.66 UTN (Figura 3d). Es importante mencionar que las variables de Cl⁻ y turbidez no están incluidas en las normas mexicanas para agua de uso agrícola. En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis de

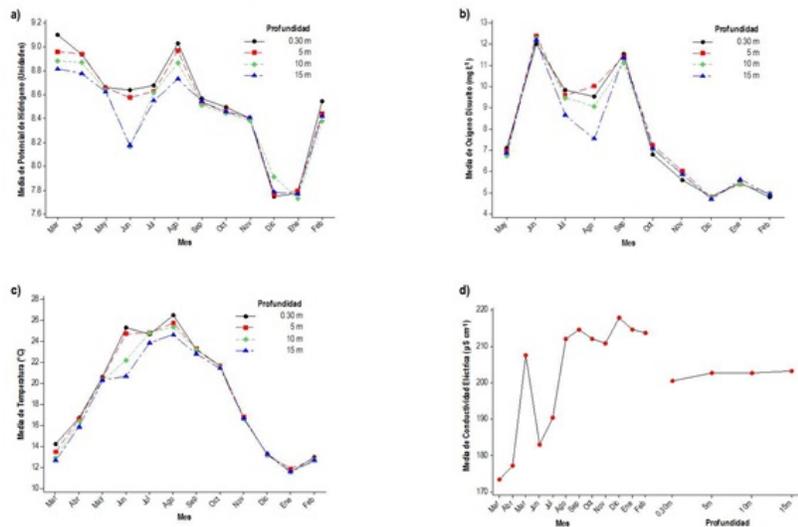


Figura 2. Niveles de concentración de pH (a), OD (b), T (c) y CE (d) en el agua de la presa La Boquilla, en Chihuahua, México

Figure 2. Concentration Level of the parameters pH (a), DO (b), T (c) and EC (d) in the water of La Boquilla Dam in Chihuahua, Mexico.

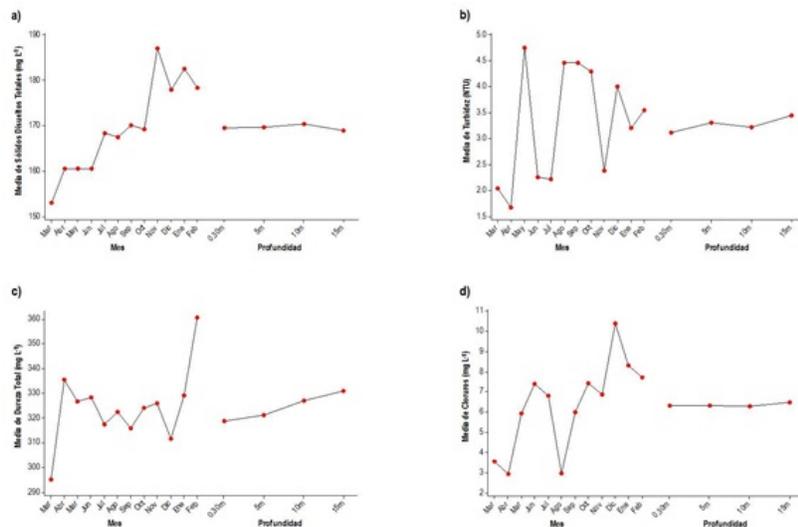


Figura 3. Niveles de concentración de SDT (a), DT (b), Cl- (c) y Turbidez (d) en el agua de la presa La Boquilla en Chihuahua, México.

Figure 3. Concentration level of the parameters TDS (a), TD (b), Cl-(c) and turbidity (d) in the water of La Boquilla Dam in Chihuahua, Mexico.

correlación de Pearson, en la cual se manifiesta la fuerte correlación que existe entre los parámetros pH y CE ($r = 0.000$), OD y T ($r = 0.000$) y CE y SDT ($r = 0.000$).

Valores calculados de ICA

Para la profundidad de 0.30 m el agua pre-

sentó una media de ICA de 2.7 para los doce meses (Figura 4a). Este resultado se encuentra en el rango de bueno, según la clasificación utilizada en esta metodología. Los resultados del ICA se mantuvieron estables durante los meses de noviembre a junio; sin embargo, en la temporada de lluvias los resultados variaron de manera significativa. En

Tabla 3. Análisis de correlación para parámetros fisicoquímicos de agua en la presa la Boquilla en Chihuahua, México.

Table 3. Pearsons correlation matrix for the physicochemical parameters at the La Boquilla Dam in Chihuahua, Mexico.

Parámetro	pH	T	CE	SDT	Turbidez	OD	DT
T	0.000*						
CE	0.000*	0.433					
SDT	0.000*	0.000*	0.000*				
Turbidez	0.007*	0.002*	0.000*	0.788			
OD	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.122		
DT	0.396	0.307	0.141	0.007*	0.837	0.023*	
Cl-	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.146	0.000*	0.243

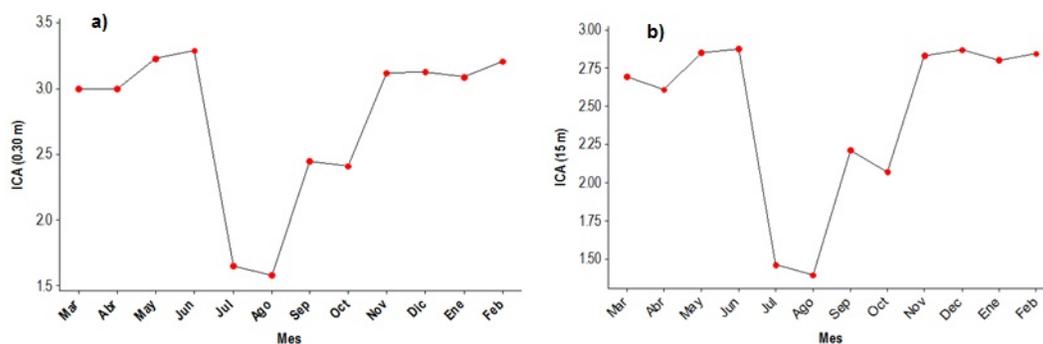


Figura 4. Valores del ICA para la profundidad 0.30 m (a) y 15 m (b) en la presa La Boquilla en Chihuahua, México.

Figure 4. WQI values for depth 0.30 m (a) and 15 m (b) in La Boquilla Dam in Chihuahua, Mexico.

particular, en los meses de julio y agosto la calidad del agua se reportó claramente afectada obteniendo un promedio de 1.65 y 1.58 respectivamente. Los meses posteriores mostraron una tendencia positiva en cuanto a la calidad. En los meses de mayo y junio fue cuando se presentó la mejor calidad de agua con un ICA calculado de 3.22 y 3.23 con una calidad de agua catalogada como excelente. Con respecto a la profundidad máxima de 15 m, los valores del ICA (Figura 4b) se comportaron de manera muy similar a los reportados en la profundidad superficial (0.30 m), en donde la calidad disminuyó en los meses de julio y agosto. Si bien existen algunas diferencias en cuanto a los resultados entre estas dos profundidades, estas son mínimas y el comportamiento de la calidad del agua es el mismo manteniéndose en un valor de ICA de 2.45 con calidad de regular a buena.

DISCUSIÓN

Para el parámetro de pH, los resultados muestran que esta variable tiende a decrecer en la medida en que aumenta la profundidad; esto se debe a que a mayor profundidad existe una menor actividad fotosintética, por lo cual, el pH disminuye (Rosemond *et al.* 2008). El pH para el agua natural se encuentra por lo general entre 6.5 y 8.5, aunque se pueden presentar ligeras variaciones. A valores extremadamente altos o bajos, como por ejemplo, mayor que 9.6 o menor que 4.5, se puede ocasionar estrés a los organismos endémicos o incluso la muerte (Crites y Tchobanoglous 2000). En el caso del OD, Bellingham (2009) señaló que esta variable tiene una alta dependencia con las horas de sol, ya que la actividad fotosintética de algunas plantas acuáticas provoca un aumento en el OD durante el día. Algunos investigadores han reportado que el oxígeno disminuye a una profundidad mayor a 10

metros y que también se ve afectado por las condiciones ambientales en donde a menor temperatura ambiente le corresponde una menor concentración de OD (Beltrán-Álvarez *et al.* 2012). Los resultados aquí reportados son similares a los encontrados por Rubio-Arias *et al.* (2012) quienes reportaron una concentración promedio de 7.07 mg L⁻¹ de OD lo que significa que los cuerpos de agua con esta concentración de oxígeno son capaces de sostener organismos vivos, de acuerdo con lo indicado por Sperling (2001). Además, Los resultados aquí presentados están en contraste con los obtenidos por Sandoval *et al.* (2009) quienes encontraron valores de OD menores de 3.0 mg L⁻¹ en un río de los estados de Puebla y Tlaxcala en México, el cual se encuentra contaminado con descarga de agua residual industrial, y donde, estos valores bajos de OD imposibilitan la supervivencia de la biota. El nivel de OD depende de las actividades físicas, químicas y biológicas que se llevan a cabo en la parte alta de la cuenca y está en función de la temperatura, la composición fisicoquímica, la salinidad y la materia orgánica presente (Mayiri *et al.* 2000).

La temperatura se comportó de acuerdo al clima de la zona, donde los meses de diciembre, enero y febrero se presentan como los meses más fríos. Por esta razón, algunos parámetros como lo es la concentración de OD, se ve afectado por los cambios de temperatura dentro del cuerpo de agua (Bellingham 2009). El efecto por profundidad encontrado en este estudio puede explicarse por el hecho de que los cuerpos de agua se presentan cambios en la temperatura en gradientes verticales debido al efecto calórico del sol. Esto es coincidente con lo reportado por Hill *et al.* (2005) quienes encontraron diferencias entre las temperaturas de las muestras obtenidas del fondo del cuerpo de agua y las muestras de agua superficial. Además de la interacción entre temperatura del agua y la profundidad, se encontraron diferencias entre las temperaturas registradas por efecto de la variación en las condiciones ambientales durante el año. Dichas diferencias han sido reportadas en diferentes estudios (Rajankar 2001, Beltrán-Álvarez *et al.* 2012).

La Figura 2d muestra que la CE se incrementó durante el tiempo de muestreo. Los resulta-

dos aquí reportados son similares a los presentados por Rubio-Arias *et al.* (2010) quienes observaron una media de 208 dSm⁻² en el lago colina que es parte del mismo cuerpo de agua y están por debajo de los reportados Rubio-Arias *et al.* (2012) quien detectó niveles altos en un estudio realizado en la parte baja de la misma cuenca. Este resultado se puede atribuir al arrastre de sales que conllevan los fenómenos de precipitación (Miyamoto *et al.* 1995). Las diferencias entre los meses se deben a que la conductividad del agua depende de la concentración de metales y sales que existen en el agua y estos elementos varían con las estaciones que incluyen fenómenos como las precipitaciones, además de la sedimentación (Das y Achayra 2003). Además, la temperatura tiene un efecto directo sobre el aumento de la CE, ya que cuando la temperatura aumenta, la viscosidad del agua disminuye, lo que provoca una mayor CE (WASC 2002). De acuerdo a las medias obtenidas por mes, los meses de agosto a febrero presentaron concentraciones por arriba de 200 dS m⁻² lo cual rebasa la norma de máximos permisibles para agua de uso agrícola (NMX 1994).

Los valores encontrados para la variable de SDT se encuentran por debajo de los mencionados por Rubio-Arias *et al.* (2012) quienes muestrearon el agua de la presa Luis L. León, en donde se obtuvieron valores de 770.58 mg L⁻¹. La diferencia entre las concentraciones encontradas en estos cuerpos de agua puede ser atribuida a la posición geográfica que ocupan en la cuenca, ya que en el caso de la presa La Boquilla es el primer reservorio que se encuentra en la cuenca del Río Conchos y el arrastre es predominantemente de suelos y otros contenidos de desechos industriales agrícolas y públicos. Por su parte Hill *et al.* (2005) reportaron valores por debajo de los 200 mgL⁻¹ encontrando que los valores más bajos de SDT se registraron en el cuerpo de agua situado en la parte alta de la cuenca mientras que la mayor concentración se reportó en el embalse que se localiza en la parte final de la cuenca. En cuanto al parámetro de DT, al mes de febrero le correspondió la mayor concentración con 295 mg L⁻¹. Este aumento en la dureza del agua puede atribuirse a que en este mes se presentó el nivel más bajo de agua en la presa La Boquilla, lo cual genera

una mayor concentración de sales (Sperling 2001). De acuerdo con estos resultados, la Dureza en la presa La Boquilla es considerada como alta. Esta ponderación se basa en la clasificación de Romero (1999) quien consideró concentraciones mayores a 200 mg L^{-1} como aguas muy duras. Estos resultados también se ubican por arriba de los reportados por Rubio-Arias *et al.* (2012) quienes encontraron valores de 252 mg L^{-1} en una investigación realizada en la parte baja de la cuenca.

La presencia de Cl^- en los cuerpos de agua se presenta de forma natural por efecto de los arrastres provocados por las precipitaciones así como por desechos de plantas de explotación y de curtidoras (Pradhan *et al.* 2001). En el caso de la presa La Boquilla, se tiene conocimiento de la existencia de estas plantas en la parte alta de la cuenca aunque no se encuentran registradas oficialmente. El aumento de esta variable al final del período de muestreo puede ser asociado al hecho de que la concentración del ion cloruro suele estar directamente relacionado con la litología predominante y con el tiempo que el agua permanece dentro del reservorio (Kelly 2001). Estos valores difieren de los reportados por Gutiérrez y Carreón (2008) quienes encontraron una media de 67.0 mg L^{-1} . Esta diferencia puede ser asociada a la posición geográfica de ambos ecosistemas.

La variable de turbidez fue diferente a la encontrada por otros estudios (Rubio-Arias *et al.* 2012) quienes reportaron valores medios de 1.5 UTN. Estas diferencias pueden ser atribuidas a las distintas profundidades de muestreo que se utilizaron para cada embalse ya que los sólidos tienden a sedimentarse; por lo cual, las lecturas son mayores a medida que la toma de la muestra es realizada a mayor profundidad. Sin embargo, los resultados encontrados en este estudio están por debajo de lo reportado por Alatorre *et al.* (2013) quienes observaron un valor medio de turbidez de 11.86 UTN en la presa La Boquilla. Es importante mencionar que el análisis de correlación entre variables reveló una estrecha relación entre la concentración de las sales y CE como ha sido reportado por otros autores (Rubio-Arias *et al.* 2013).

Los resultados reportados durante el periodo de muestreo, para los ICAs a 0.30m y a 15.0 m,

fueron similares entre sí y ambos se encontraron dentro del rango de buenas condiciones. Este resultado se atribuye a que los diferentes factores como las horas de sol, la temperatura y la ausencia de lluvias, así como el tamaño del cuerpo de agua mantienen el equilibrio de los parámetros en buenas condiciones. En la figura 4a y 4b se observa la disminución en la calidad del agua durante los meses de julio y agosto para ambas profundidades, en donde la presencia de precipitaciones, el arrastre y todo lo que conlleva este tipo de fenómenos afecta de forma muy marcada la calidad del agua, la cual descendió hasta valores de 1.65 y 1.58. Como consecuencia, se obtuvo un ICA menor para estos meses. Los meses siguientes de septiembre y octubre presentaron una calidad de agua regular con valores de 2.41 y 2.44 y, se presume que durante estos meses la calidad del agua se ve afectada por la precipitación y los fenómenos que estos provocan. Además, se debe puntualizar que en estos meses, las compuertas de la presa se abren para surtir el agua de riego a los agricultores del Distrito de Riego 005 (CONAGUA 2009). La calidad del agua regresa a la normalidad entrando en el rango de excelente con valores de 3.0 a 3.2 de ICA durante los meses de noviembre a febrero. En general, los resultados obtenidos indican que la presa La Boquilla cuenta con una buena calidad de agua, a pesar de que en previos estudios han reportado una mala calidad de agua y problemas fuertes de contaminación, en especial en la parte baja de la cuenca (Rubio-Arias *et al.* 2004, Holguin *et al.* 2006, Rubio-Arias *et al.* 2012). Los resultados de estudios similares al presente en la búsqueda de un ICA y que fueron conducidos en otros países son contrastantes; por ejemplo, en Irán para el Río Tigres (Alobaidy *et al.* 2010), en Malasia (Ramani *et al.* 2009), en Nigeria para el Río Landzu (Yisa y Jimoh 2010) y en todos los casos el resultado ha dependido de los parámetros utilizados y la significancia que se le asigne a cada parámetro.

La información aportada por este estudio es diferente a lo especificado por Alatorre *et al.* (2013) quienes calcularon valores de ICA de 68.6 para la presa La Boquilla; sin embargo, estos autores únicamente realizaron un solo muestreo y utilizaron seis parámetros. De acuerdo con los resultados de este

estudio se puede asumir que los cambios que sufre la calidad de agua durante el año son mayormente ocasionados por los efectos naturales que se presentan en las diferentes estaciones del año, como lo son los meses de lluvia y los cambios de temperatura los cuales influyen de manera directa en los parámetros evaluados en la calidad del agua.

CONCLUSIONES

En lo general, la calidad del agua de la presa

La Boquilla se mantiene en buen estado, aunque su calidad varía en función de las diferentes condiciones que se presentan a lo largo del año. El comportamiento de los parámetros depende directamente de la variación de factores ambientales, como la precipitación y la temperatura. Estos factores afectan de manera directa la calidad del agua como ocurrió en época de lluvias, durante los meses de verano e invierno. Los valores del ICA reflejan que la calidad del agua es aceptable para fines ambientales y agropecuarios.

LITERATURA CITADA

- Alatorre LC, Amado-Álvarez JP, Ramírez-Valle O (2013) Modelo predictivo de la calidad del agua en reservorios de Chihuahua mediante percepción remota. En *Dinámicas locales del cambio ambiental global Aplicaciones de percepción remota y análisis espacial en la evaluación del territorio*, Eds. Erick Sánchez Flores y Rolando Díaz Caravantes. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Cd. Juárez, Chihuahua, México. pp: 319-337
- Alobaidy AH, Maulood MJ, Kadhem AJ (2010) Evaluating raw and treated water quality of Tigris River within Baghdad by index analysis. *Journal of Water Resource and Protection* 2: 629-635.
- Banoeng-Yakubo B, Yidana SM, Emanuel N, Akabzaa T, Asiedu D (2009) Analysis of groundwater quality using water quality index and conventional graphical methods: the Volta region, Ghana. *Environmental Earth Sciences* 59: 867-879.
- Bellingham K (2009) Physico chemical parameters of natural water. Stevens Water Monitoring Systems, Inc. Disponible en <http://www.stevenswater.com/articles/waterparameters.aspx>. Fecha de consulta 22 de octubre de 2012.
- Beltrán-Álvarez R, Ramírez-Lozano JP, Sánchez-Palacios J (2012) Comportamiento de la temperatura y el oxígeno disuelto en la presa Picachos, Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Hidrobiología* 22: 94-98.
- Brown R (1970) A water quality index-do we dare?. *Water Sewage Works* 11: 339-343.
- Cadavid JC, Echeverri JD, Gómez AE (2010) Modelación Índice de Calidad de Agua (ICA) en las cuencas de la región Cornare. *Gestión y Ambiente*. Disponible en <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=169420002001>. Fecha de consulta 25 de julio de 2012.
- CCME (2012) Canadian Council of Ministers of the Environment. Application and Testing of the Water Quality Index in Atlantic Canada. http://www.ccme.ca/assets/pdf/awi_en_posting.pdf. Fecha de consulta 23 de junio de 2012.
- Coletti C, Testazla R, Ribeiro TAP, de Souza RTG, Peri DA (2010) Waterquality index using multivariate factorial analysis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14: 517-522.
- CONAGUA (2009) Comisión Nacional del Agua. Capacidad de Almacenamiento y Uso de las Principales Presas de México. Disponible en <http://www.conagua.gob.mx/atlas/atlas.html?seccion=2mapa=5>. Fecha de consulta 24 de julio de 2012.
- Crites R, Tchobanoglous G (2000) Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Tomo I. McGraw-Hill Interamericana, Colombia. 1084 p.

- Das J, Achayra BC (2003) Hydrology and assessment of lotic water quality in Cuttack city India. *Water, Air, Soil Pollution* 150: 163-175.
- De la Mora C, Rubio AH, García VJ (2005) Índice de calidad de agua en el Lago de Chapala, Jalisco México. Contribución al estudio de los servicios ambientales. Programa de Investigación en servicios ambientales, Libro Técnico No. 1, Diciembre de 2005. INIFAP, SAGARPA. pp: 33-53
- ELAW (2002) Environmental Law Alliance Worldwide. Ecuador, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua. Disponible en <http://www.elaw.org/node/3736>. Fecha de consulta 18 de octubre de 2012.
- Espejo L, Kretschmer N, Oyarzún J, Meza F, Nuñez J, Maturana H, Soto G, Oyarzo P, Garrido M, Suckel F, Amezaga J, Oyarzún R (2011) Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid north-central Chile. *Environmental Monitoring Assessment* 184: 5571-5588.
- Gutiérrez M, Carreón E (2008) Contenido de As, Ba, y Cu en sedimentos y su asociación con depósitos minerales en el noreste de Chihuahua. *Tecnociencia* 2: 108-117.
- Google Earth V 6.2.2.6613. Febrero 10, 2011. Presa La Boquilla, San Francisco de Conchos, Chihuahua, México. <http://www.earth.google.com>.
- Hill HD, Owens WE, Tchounwou PB (2005) Comparative assessment of the physico-chemical and bacteriological qualities of selected streams in Louisiana. *International Journal of Environmental Resources Public Health* 2(1): 94-100.
- Holguín LC, Rubio AH, Olave ME, Saucedo TR, 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: 51-63.
- INEGI (2003) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 2003. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Chihuahua. 1a.ed. Editorial INEGI. México.
- Kelly M (2001) El Río Conchos: Un Informe Preliminar. Texas Center for Policy Studies. 34 p.
- Mayiri R, Romero E, Espinoza C, Ruiz M (2000) Determinación de oxígeno disuelto en aguas salinas aplicando modelos matemáticos y como censor electrodo de membrana. *Tecnología Agua* 197: 52-56.
- Miyamoto S, Fenn LB, Swetlik D (1995) Flow of salts and trace elements in the Rio Grande System: a review. Texas Agriculture Experimental Station-Texas Water Resources Institute. College Station, TX. E.U.A pp: 1-30.
- NMX (1980) NMX-AA-014-1980, Norma Mexicana. Cuerpos Receptores-Muestreo,.
- NMX (1994) Norma Mexicana NMX-127-SSAI-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 del 18 de enero de 1996 México, D.F.
- NMX (2001a) Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua-determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales, y residuales tratadas-método de prueba. Secretaría de Economía. 18 p.
- NMX (2001b) Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. 2001. Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. 14 p.
- Pradhan SK, Patnaik D, Rout SP (2001) Ground water quality index for groundwater around a phosphatic fertilizers. *Plant Indian Journal Environmental Protection* 21: 355-358.

- Rajankar PN, Tambekar DH, Wate SR (2011) Groundwater quality and water quality index at Bhandara District. *Environmental Monitoring Assessment* 179: 619-625.
- Ramakrishnaiah CR, Sadashivalah C, Ranganna G (2009) Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka state. *Indian Journal_chemistry* 6: 523-530.
- Ramani BV, Bouwmeester R, Mohan S (2009) Fuzzy logic water quality index and importance of water quality parameters. *International Journal of Air, Soil and Water Research* 2: 51-59.
- Romero JA (1999) *Calidad del Agua*. Alfaomega Grupo Editor. México. 273 p.
- Rosemond S, Duro DC, Dubé M (2008) Comparative analysis of regional water quality in Canada using the water quality index. *Environmental Monitoring Assessment* 156: 223-240.
- Rubio-Arias H, Ochoa-Rivero JM, Quintana RM, Saucedo-Teran R, Ortiz-Delgado RC, Rey-Burciaga NI, Espinoza-Prieto JR (2013) Development of a water quality index (WQI) of an artificial aquatic ecosystem in Mexico. *Journal of Environmental Protection* 4: 1296-1306.
- Rubio-Arias H, Contreras-Caraveo M, Quintana RM, Saucedo-Teran RA, Pinales-Munguia A (2012) An overall Water (WQI) for a man-made aquatic reservoir in Mexico. *International Journal of Environmental Resources and Public Health* 9 (5): 1687-1698.
- Rubio-Arias H, Jiménez CJ (2012) *Estadística aplicada y análisis con Minitab*. Universidad Autónoma de Chihuahua. ISBN978-607-8223-14-5. Chihuahua, México. 169 p.
- Rubio-Arias H, Wood K, Alanís HE (2004) Water pollution in the rio Conchos of northern Mexico. *Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies X*. G. Latini, G. Passerini y C.A. Brebbia. Witpress.doi: 10.2495/ENV040171. pp: 167-176.
- Rubio-Arias H, Quintana C, Jiménez-Castro J, Quintana RM, Gutiérrez M (2010) Contamination of the Conchos river in México; does it pose a health risk to local residents. *International Journal of Environmental Resources and Public Health* 7: 2071-2084.
- Rubio AH, Saucedo, RA, Wood K, Nuñez A, Jiménez J (2005) Metal contamination of a riparian area in the Conchos watershed in Chihuahua, Mexico. *Water Resources Management 2005*. Algarve Portugal, April 11-13, Wit Press. pp: 269-275.
- Sandoval VAM, Pulido-Flores G, Monks S, Gordillo AJ, Villegas EC. (2009) Evaluación físico-química, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del Río Atoyac, México. *Inter ciencia* 34: 880-887.
- SNET (2012) Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Índice de Calidad de Agua General ICA. Disponible en <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>. Fecha de consulta 24 de marzo de 2012.
- Song T, Kim K (2009) Korea development of a water quality loading index based on water quality modeling. *Journal Environmental Management* 90: 1534-1543.
- Sperling MV (2001) *Principios Básicos do Tratamento de Esgotos*. 4ª ed. Universidad Federal de Minas Gerais. Brasil. 212 p.
- WASC (2002) Waterwatch Australia Steering Committe. *Water watch Australia National Technical Manual. Physical and Chemical Parameters*. Disponible en <http://www.waterwatch.org.au/publications/module1/index.html>. Fecha de consulta 20 de julio de 2012.
- Yisa J, Jimoh T (2010) Analytical studies on water quality index of River Landzu. *American Journal of Applied Science* 7(4): 453-458.