

Calidad del agua para consumo humano y protección de la vida acuática en el embalse Los Laureles de Tegucigalpa (2002-2016)

Water quality for uses of human consumption and protection of the aquatic life in the Los Laureles reservoir of Tegucigalpa (2002-2016)

German Onil Rodríguez Cruz¹

[Recibido: 9 de julio 2021, Aceptado: 23 de septiembre 2021, Corregido: 05 de octubre 2021, Publicado: 1 de enero 2022]

Resumen

[**Introducción**]: Del embalse Los Laureles se genera una enorme cantidad de datos de calidad de agua que muchas veces no es analizada e interpretada de manera integral, deficiencia que se observa en otros embalses en el país y de la región centroamericana. Esto provoca un conocimiento limitado que impide tomar acciones preventivas ante escenarios de contaminación, cuando se observan o analizan los parámetros por separado. [**Objetivo**]: El propósito de la investigación fue calcular e interpretar diferentes índices de calidad del agua en el embalse Los Laureles durante el periodo 2002-2016, con datos históricos y generados en este estudio para analizar los posibles factores naturales o antrópicos que han contribuido al deterioro de su calidad. [**Metodología**]: Los índices se calcularon utilizando el software WQI versión 1.2 a partir de información histórica generada por el Laboratorio del SANAA en tres puntos de muestreo (cortina, centro y cola) e incluyendo hasta 23 parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, metales y metaloides. Se utilizaron tres directrices de calidad: una para uso de consumo humano y dos para uso de protección de la vida acuática. [**Resultados**]: Los índices de calidad categorizaron la calidad del agua del embalse Los Laureles para el uso consumo humano de marginal a pobre; mientras que para el uso protección de la vida acuática como regular. Se observó una disminución en los valores de los índices y en la categorización de la calidad del agua cuando se incluyeron más parámetros y muestreos. [**Conclusiones**]: En el estudio integral se observó una disminución histórica de la calidad por el aumento en los valores de los parámetros que sobrepasaron las directrices hasta más de 25 veces, aún cuando solo se tratara de un parámetro que contribuyera a su disminución. Es decir, influyó más la cantidad de veces que un parámetro sobrepasó la norma que el número de parámetros fallidos.

Palabras claves: contaminación; directrices; índice WQI; parámetros.

Abstract

[**Introduction**]: From the Los Laureles reservoir it is generated an enormous amount of water quality data that are often not analysed and interpreted in a comprehensive manner, a limitation that also occurs in other reservoirs in the country and over the Central American region. This situation limits the knowledge for taking preventive actions in the face of contamination scenarios when the parameters are observed or

¹ Graduado de la maestría en Ciencias del Agua del Centro de Investigación para los Recursos Acuáticos (CIRA) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN) Managua, Nicaragua; onilhn@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6598-4923>



analysed separately. **[Objective]:** The purpose of the research was to calculate and use different water quality indices in the Los Laureles reservoir during the time 2002-2016 with historical data, and analyse possible natural or anthropic factors that have contributed to its deterioration. **[Methodology]:** The indices were calculated using WQI software (version 1.2), based on historical information generated by the SANAA Laboratory at three sampling points (curtain, centre and tail), and including up to 23 physicochemical, microbiological, metals and metalloids parameters. Three different guidelines were used: one guideline of water quality for human consumption use and two guidelines for water life protection use. **[Results]:** The quality indices categorized the water quality of the Los Laureles reservoir for the use of human consumption as marginal to poor. The categorisation of use for aquatic life protection was regular. The decrease in the values of the indices and the categorization of water quality was observed when more parameters and samplings were included. **[Conclusion]:** In the comprehensive study, a historical decrease in quality was recorded due to the increase in the values of the parameters that exceeded the guidelines up to more than 25 times, even when it is only a parameter that will contribute to its decrease. In other words, the number of times that a parameter exceeded the guidelines had more influence than the number of failed parameters.

Keywords: *Guidelines; indices WQI; parameters; pollution.*

1. Introducción

La calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua (Diersing, 2009). Comprende el aspecto de disolución y el arrastre de sustancias naturales propias de la geología (contaminación natural). Por otra parte, toma en cuenta la recepción de efluentes urbanos, agrícolas e industriales que llega a los cuerpos agua (contaminación antrópica). También, es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o cualquier necesidad humana o propósito (Johnson *et al.*, 1997). Los factores físicos que influyen en la variación de la calidad del agua y el grado de contaminación son el caudal del río influido por los estiajes y avenidas que producen estos cambios en el cuerpo de agua. El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial con el crecimiento de la población, la expansión de la actividad industrial, agrícola y la amenaza del cambio climático como causa de alteraciones en el ciclo hidrológico (UN, 2013).

Una calidad determinada hace referencia a un uso preestablecido, presentando requerimientos específicos a cada uno de estos (Poch, 1999). Algunos de los usos pueden ser consumo humano, protección de la vida acuática, agricultura, entre otros; aunque el uso del agua debe considerarse desde un punto de vista agregado, ya que para una actividad puede ser una pérdida, pero no lo será para el sistema en su conjunto (Mateos *et al.*, 1996). Mientras que los parámetros son atributos medibles y se pueden utilizar para evaluar o predecir las condiciones de la situación ambiental (USEPA, 2000), de su uso también dependerán los valores de aceptación o rechazo, conocido como indicadores o criterios de calidad, aquellos que cumplan lo establecido serán aptas para la finalidad destinada, sino cumple, entonces, su uso puede ser limitado o deberá someterse a un tratamiento. Un criterio de calidad de agua es una concentración numérica o enunciado descriptivo que ha sido establecido para apoyar y proteger los usos determinados del agua en un sitio o finalidad específica. (Helmar *et al.*, 1997).



En general, en el territorio Centroamericano la calidad de los cuerpos de agua no es adecuada, la mayoría de los países no realiza un monitoreo sistemático que permita conocer y mejorar los avances y conocimientos logrados en la calidad de los cuerpos de agua (GWP, 2011). Lo anterior se debe a los cambios de uso del suelo y el acelerado crecimiento urbanístico, el cual ejerce mayor presión de los recursos hídricos. Por ejemplo, Tegucigalpa es una ciudad que se caracteriza por su vulnerabilidad ambiental que ejercen presión ecológica sobre sus recursos hídricos. También es conocido que ahí se abastece en un 97 % de aguas superficiales, lo cual aumenta su vulnerabilidad. Desde ese contexto los recursos hídricos de la capital son vulnerables a la contaminación directa e inmediata (SANAA, 2011).

La investigación se enfocó en analizar y calcular los índices de la calidad del agua del embalse Los Laureles y medir el deterioro de su calidad espacial y temporal, para los usos de consumo humano y protección de la vida acuática. Se realizó con la información histórica generada por el laboratorio de control de calidad del embalse (2002-2015) y 5 muestreos realizados durante mi investigación (2015-2016), la implementación de tratamientos estadísticos básicos y la aplicación de un software que calcula un número entre 0 y 100 (índice) para luego categorizar su calidad, de acuerdo con los objetivos específicos o directrices. Esto permite que los índices utilizados estimen la calidad relativa del agua, proveyendo su estado deseable y una visión del grado de afectación en ese momento y lugar. Sin embargo, los índices tienen la limitante de que no siempre proveerá información en tiempo real sobre contaminación transitoria, salvo que estas sean frecuentes, duraderas y coincidan con la fase de campo.

Esta investigación fue motivada debido a la actual escasez de agua que sufre Tegucigalpa y a que permitirá a las autoridades dilucidar mejor los problemas de calidad y su origen, permitiendo tomar acciones en manejo de los recursos hídricos. Además de que en el embalse se genera información que no es analizada e impide saber el estado actual de su agua. Para eso, se hizo uso de los monitoreos realizados durante 15 años (2002-2016), donde se tipifican problemas en la calidad del agua como por ejemplo recientes cambios ecológicos como floraciones de algas y otras de origen natural y antrópico. Por esta razón, se planteó como meta permitir reportar los resultados obtenidos de los índices con un enfoque fácil de interpretar para quien no tiene la inclinación, ni la formación para estudiar reportes de calidad de agua a detalle.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El embalse Los Laureles forma parte de la subcuenca del Río Guacerique. Se encuentra al oeste del Distrito Central en el departamento de Francisco Morazán, Honduras entre las coordenadas UTM 474035 N, 1555118 E y 474818 N y 1555244 E a una altura de 1041 msnm (Figura 1). El Embalse fue creado para de abastecer de agua potable a la población de Tegucigalpa (350 000 personas, 30 % aproximadamente), y es administrado por el Servicio Autónomo Nacional



de Acueductos y Alcantarillados (SANAA). Posee una extensión aproximada de 1 km² de espejo de agua y un volumen máximo de 10 millones de metros cúbicos (MMC).



Figura 1. Mapa del embalse Los Laureles.
Figure 1. Map of the Los Laureles reservoir.

2.2 Directrices y parámetros de calidad de agua de acuerdo con el uso

La calidad del agua histórica 2002-2016 se estimó al comparar los resultados de análisis de los parámetros físico-químicos, microbiológicos y metales/metaloides con las normativas o directrices existentes o adoptadas para los dos usos previstos del agua del embalse (consumo humano y protección de la vida acuática). En este estudio se realizaron 5 muestreos para obtener resultados actualizados. Esto ocurrió entre noviembre de 2015 y septiembre de 2016. El resto de muestreos entre 2002 y 2015 son datos históricos generados por el SANAA.

Para el análisis de calidad de agua para consumo humano, se utilizó la “Norma técnica para la calidad del agua potable (NTCAH)” de la República de Honduras (1995), vigente desde el 4 de octubre de 1995. Los parámetros seleccionados fueron aquellos de los que se tuvieron datos confiables y que, a su vez, estuvieran contemplados bajo esta norma técnica. Todos los parámetros y las metodologías analíticas usadas provienen del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW)* y se resumen en el **Apéndice 1** (parámetros microbiológicos, físico-químicos, metales y metaloides, respectivamente con su límite de detección). El uso



ecológico del agua o para la protección de la vida acuática no está regulado en Honduras, por lo que se han adoptado para este estudio las directrices propuestas por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, por sus siglas en inglés) y por la Agencia Estadounidense para la Protección Ambiental (USEPA, por sus siglas en inglés).

2.3. Procedimientos técnicos para la recolección de los muestreos

Las muestras fueron recolectadas en tres puntos seleccionados históricamente por el Laboratorio de Control de Calidad del SANAA para el monitoreo de calidad de agua del embalse: cortina, centro y cola (**Figura 1**). Estos sitios son representativos de tres zonas del embalse: agua que entra superficialmente desde el río Guacerique y sus tributarios (cola), sitio donde se mezcla el agua entre la recarga superficial y la subterránea (centro) y sitio del agua que es bombeada hacia la planta de tratamiento (cortina).

Para la colecta y preservación de las muestras en el campo se tomaron manualmente a 30 cm debajo de la superficie, de acuerdo a los procedimientos de muestreo y control de calidad del SANAA, PTL-08, 2015. Las variables físicas medidas *In situ* fueron temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, usando un medidor multiparamétrico digital portátil marca *Thermo Fisher Scientific*®. La transparencia se midió con el disco de *Secchi* de 8 pulgadas de diámetro, dividido en cuatro cuartos en color blanco y negro atado a una cuerda calibrado en m. La técnica consistió en sumergir el disco en el agua, hasta que desaparece a la vista, se anota la profundidad; y se obtiene el valor de transparencia del disco de *Secchi*, en cm.

Las variables físico-químicas como pH, sólidos totales, color, turbidez, hierro, calcio, magnesio, potasio, cloruro, alcalinidad, fósforo total, nitrato y nitrito, se colectaron en frascos plásticos de polietileno de un litro de capacidad, sin preservación química, manteniendo la muestra en una hielera portátil con hielo debidamente etiquetado. Las variables de metales y metaloides se recolectaron en un frasco de plástico de polietileno esterilizado, se destapó con cuidado de no contaminarlo. Se tomó el frasco por la base y se introdujo a 30 cm de la superficie. Luego se trasvasó el agua de ese frasco a otro de plástico esterilizado con capacidad de un litro, al que previamente se le agregó 3 ml de ácido nítrico como preservante sin haberlo enjuagado. Se rotuló el frasco con fecha y hora y, por último, se colocó el frasco dentro de la hielera para mantenerlo frío. Finalmente, para las variables microbiológicas se utilizaron bolsas plásticas esterilizadas con capacidad de 250 ml. El procedimiento de extracción de la muestra de agua es igual a 30 cm de profundidad con la ayuda de un frasco esterilizado y luego trasvasado a la bolsa estéril. Se rotuló y colocó en la hielera.

2.4. Cálculo de los índices de calidad de agua para ambos usos

Los índices de calidad de agua son una expresión matemática simple, un número que oscila entre 0 y 100, que es el resultado de la comparación de resultados de los parámetros de interés contra valores normados o directrices de calidad de agua. Adicionalmente los índices permiten



clasificar la calidad de agua en términos cualitativos o categorías descriptivas (narrativas), con los cuales puede valorarse el recurso acuático. Esto se hizo por medio del software WQI (*Water Quality Index*) versión 1.2 en ambiente Visual Basic para Microsoft Excel, desarrollado y aprobado por el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME, descargado de: www.ccme.ca). Este índice se basa en tres atributos de la calidad que están relacionados con los objetivos y son: alcance (F1), frecuencia (F2) y amplitud (F3).

El alcance (F1) representa el porcentaje de variables que no cumplieron con los objetivos al menos una vez durante el periodo de tiempo en consideración (variables fallidas), relativo al número total de variables medidas. La frecuencia (F2) representa el porcentaje de pruebas individuales que no cumplieron con los objetivos (pruebas fallidas), dividido entre el número total de pruebas. La amplitud (F3) representa la cantidad por la cual los valores de pruebas fallidas no cumplieron sus objetivos. La escala se divide en 5 diferentes categorías para describir la calidad del agua: excelente, buena, regular, marginal y pobre; sin embargo, la categorización y el puntaje puede ir, de acuerdo con la rigurosidad de las legislaciones de cada país, organismo o el interés del investigador (**Cuadro 1**).

El programa compara el resultado introducido contra el parámetro de referencia, si el resultado introducido incumple o sobrepasa (o está por debajo como en el caso de la alcalinidad) el valor normado, este provee un color que resalta todos los resultados que fallaron y es extremadamente útil para reconocer rápidamente dichos parámetros. Los resultados en gris indican parámetros que sobrepasaron el valor normado menos de 10 veces, los resultados en amarillo sobrepasaron entre 10 y 25 veces y los resultados en rojo indican que sobrepasaron más de 25 veces.

Cuadro 1. Categorización numérica y narrativa del índice de calidad del agua.

Table 1. Numerical and narrative categorization of the water quality index (WQI).

Categorización	Descripción	Puntaje uso consumo humano	Puntaje uso protección de la vida acuática
Excelente (E)	No representa peligros para el ecosistema y existe presencia de una gran biodiversidad de especies acuáticas.	95-100	91-100
Buena (B)	Alta biodiversidad de especies acuáticas. Uno o dos parámetros de calidad pueden estar fuera de rango. Si dichos parámetros no mejoran en un periodo corto, se observará cambios en el número y composición de especies en el ecosistema.	80-94	76-90
Regular (R)	Se observan aumento de contaminación especialmente orgánica que sirve como nutriente para especies resistentes a los nuevos niveles de contaminación, proliferando y dominando el ecosistema. La reducción de la biodiversidad y el desequilibrio comienza a ser evidente.	65-79	61-75



Categorización	Descripción	Puntaje uso consumo humano	Puntaje uso protección de la vida acuática
Marginal (M)	Baja biodiversidad de la vida acuática. Dominio de especies tolerantes a las nuevas condiciones. Se observan fuentes de contaminación puntual de origen antrópico y natural.	45-64	41-60
Pobre (P)	Dominio total de una y hasta tres especies de fitoplancton y por ende un total de desequilibrio de toda la cadena trófica. Los individuos de las especies encontradas presentan una elevada tolerancia a la contaminación.	0-44	0-40

3. Resultados y discusión

3.1 Calidad del agua para consumo humano

Un total de 14 parámetros de 21 realizados en esta investigación se detectaron fuera del rango para la Norma Técnica de Calidad de Agua de Honduras (**Apéndice 2**). Sin embargo, el número de parámetros y la cantidad de veces que sobrepasaron la norma varió en cada muestreo y, por lo tanto, su resultado anual. Así mismo, se notó que a pesar de que el laboratorio del SANAA mantiene al menos dos muestreos anuales, su rigor varía tanto en el número de parámetros como en la cantidad de muestras históricas.

Cabe señalar que los coliformes totales sobrepasaron hasta en 1 000 veces el valor normado en los años 2004, 2011, 2012 y 2013. Por otro lado, el color y turbidez sobrepasaron la norma en más de 25 veces, por lo cual, representaron un problema de calidad para todos los muestreos en todos los años. En cuanto a los metales pesados como el cadmio y el arsénico, sobrepasaron la norma hasta 4 y 6 veces respectivamente. Se menciona que el cadmio tiene como fuentes naturales actividad volcánica, los incendios forestales y el transporte por el viento de partículas del suelo (*Filipič, 2012*), las fuentes antrópicas, el uso de fertilizantes fosfatados, la quema de combustibles fósiles, entre otros (*Pernía et al., 2008*). Es importante monitorear las concentraciones de Cd, puesto que afecta los riñones, pulmones, esqueleto y sistema nervioso central, generando hipocalcemia, diabetes, osteoporosis y cáncer (*Burger, 2008* y *Clemens et al., 2013*). Por esto, se asume que las principales fuentes de Cd en el embalse provienen de los incendios forestales, los cuales son frecuentes en la época seca (febrero-mayo) y los fertilizantes en los cultivos cercanos en las vegas del Río Guacerique.

El arsénico se presentó como un problema solo en el punto cola, como elemento se encuentra en la atmósfera, los suelos, las aguas naturales y en los organismos vivos. Se moviliza en el medio ambiente a través de los niveles tróficos, gracias a la combinación química con otros elementos que sirven para producir actividad biológica. En aguas superficiales, se encuentra en



forma de arseniato (As^{+5}) (Villalobos, 2011). La exposición prolongada al arsénico a través del consumo de agua contaminada puede causar cáncer y lesiones cutáneas. También se ha asociado a problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes (OMS, 2011). Su procedencia principalmente obedece a emisiones volcánicas, así como al desarrollo de actividades antropogénicas específicas como la minería, la combustión, el uso de pesticidas, herbicidas y el curado de maderas (Welch *et al.*, 1994). Siendo las últimas 3 el posible origen en el punto cola del embalse.

Los índices de calidad (CWQI), obtenidos en el periodo de análisis de esta investigación, variaron desde 37 puntos, lo que implicó una categoría de pobre en la cola (2011), hasta 70 que correspondía con una categoría de regular en la cortina (2014). Asimismo, se observó la disminución de los valores de los índices y, por lo tanto, en la categorización de la calidad del agua, cuando se tenía más disponibilidad de datos o cuando se incluyeron más parámetros en el cálculo.

En la cortina, el resultado más bajo de todos los datos históricos de CWQI fue 38 puntos en 2013, mientras que el mejor resultado se obtuvo en 2014 con 70 puntos (ver **Apéndice 2**). En el año 2013, se dieron los resultados más bajos de los 15 años de estudio. En los 4 muestreos, 5 parámetros incumplieron la norma de calidad y fueron: amonio y hierro (calidad fisicoquímica), color y turbidez (calidad organoléptica) y coliformes totales (calidad bacteriológica). En los 4 muestreos históricos del 2014, solo incumplieron 3 parámetros en el sitio cortina: color, turbidez y coliformes totales y fue el año donde se obtuvieron los mejores resultados del estudio. Para ambos años, se realizaron cuatro muestreos y se analizaron un número similar de parámetros (2013 = 14; 2014 = 15). La calidad del agua en el uso para consumo humano en el punto cortina fue afectada principalmente por la cantidad de veces que los parámetros de calidad sobrepasaron la Norma Técnica Hondureña, hasta en más de 25 veces en los 15 años.

En el punto centro ocurre lo mismo para 2013 y 2014, fallando el mismo número de variables, aunque el puntaje de CWQI en 2014 es menor que en la cortina, por lo tanto, en el punto centro las concentraciones de los mismos parámetros fueron mayores. En el año 2002, se observa que entre los puntos cortina y el centro, la categorización cambia de marginal a regular por una diferencia de dos puntos, pero esto se explica por la amplitud, es decir, en este caso el centro sobrepasó las concentraciones de la Norma Técnica Hondureña en menor medida que en el punto cortina.

Los resultados del CWQI en el sector de la cola fueron menores con respecto a los obtenidos en centro y cortina, por lo que tenemos una menor calidad de agua que en el resto de los sectores. Esto debido a que el río Guacerique, el cual es el principal tributario del embalse, arrastra contaminantes a lo largo del cauce (**Cuadro 2**). El resultado más bajo de todos los datos históricos, en el sector de la cola, fue en 2011 con un CWQI de 37 puntos. Los 6 parámetros que incumplieron los objetivos y que disminuyeron la calidad del agua fueron: hierro, manganeso y nitritos (calidad fisicoquímica), color y turbidez (calidad organoléptica) y coliformes totales (calidad bacteriológica). Este resultado puede ser producto de una cantidad de muestreos mayor a



los demás años (17 en total para 2011), lo que permite conocer la realidad de la calidad del agua. Su mejor resultado fue en el año 2005 con un CWQI de 62 puntos, donde el SANAA realizó solo 2 muestreos; además, pudo influir la época del año en que se hizo y como se mencionado anteriormente depende la amplitud o la cantidad de veces que un parámetro sobrepasa la norma. Un muestreo que se realice en época lluviosa, un día después de una tormenta de alta intensidad nos reflejará peores resultados, así como también el número de parámetros muestreados.

En el punto cola, al igual que en la cortina y centro se vio influenciada en mayor medida por la amplitud, donde los parámetros de calidad sobrepasaron más de 25 veces la Norma Técnica de calidad de agua de Honduras. Por lo tanto, da un puntaje final por debajo de 62 puntos y un promedio de 43 puntos de los 15 años de estudio, categorizando su calidad como pobre en la mayoría de los años.

Cuadro 2. Categorización de la calidad del agua en el embalse Los Laureles, uso de consumo humano.

Table 2. Categorization of water quality in the Los Laureles reservoir, human consumption use.

Año, (No. Muestreo)	CORTINA				CENTRO				COLA			
	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.
2002 (2)	15	5	64	M	15	5	66	R	15	7	40	P
2003 (2)	15	4	45	M	15	4	42	P	14	4	38	P
2004 (3)	15	5	40	P	15	5	39	P	15	5	39	P
2005 (2)	16	2	60	M	16	3	62	M	16	4	62	M
2006 (2)	16	4	41	P	16	5	38	P	16	3	41	P
2007 (1)	16	4	47	M	16	5	52	M	16	4	42	P
2008 (2)	16	4	51	M	16	4	51	M	16	3	48	M
2009 (2)	16	4	44	P	16	4	47	M	16	6	42	P
2010 (4)	16	4	53	M	16	3	53	M	15	3	44	P
2011 (17)	15	5	43	P	15	5	43	P	15	6	37	P
2012 (2)	15	4	40	P	15	3	57	M	15	5	39	P
2013 (4)	14	4	38	P	14	5	38	P	14	4	39	P
2014 (4)	15	3	70	R	14	5	65	R	15	5	40	P
2015 (8)	21	7	56	M	21	9	56	M	21	8	53	M
2016 (4)	21	8	46	M	21	8	48	M	21	10	39	P
	Promedio		49	M	Promedio		50	M	Promedio		43	P
	Mediana		46	M	Mediana		51	M	Mediana		40	P

Cat. = Categorización, E= Excelente, B= Bueno, R= Regular, M= Marginal y P= Pobre.



3.2 Calidad del agua para uso de protección de la vida acuática de acuerdo con la directriz canadiense (CCME)

Un total de 9 de 13 parámetros se encontraron fuera de rango de acuerdo con la directriz Canadiense (CCME, consultar directriz en su página web) para uso y protección de la vida acuática (ver **Apéndice 3**). La cantidad de parámetros y la cantidad de veces que sobrepasó la directriz varió según el año y punto de muestreo. De los 9 parámetros que presentaron un problema para la calidad del agua, se debe mencionar especialmente al aluminio y el amonio que sobrepasaron hasta en 500 y 54 veces, respectivamente la norma para los años 2016, 2015 y 2008. Para el amonio son varios los factores que se conocen que afectan su toxicidad en el agua, entre ellos el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto, la salinidad, entre otros. El amonio no ionizado es más tóxico que el ion amonio en los organismos acuáticos, siendo, por lo tanto, capaz de difundirse a través de las membranas biológicas más fácilmente que otras formas. El zinc sobrepasó la norma hasta en más de 20 veces. Aunque el zinc es considerado un elemento esencial para diversas funciones biológicas las altas concentraciones en el agua puede producir efectos adversos crónicos o agudos. Los efectos pueden ser en la reproducción, bioquímicos, fisicoquímicos y en el comportamiento de los organismos acuáticos (OMS, 2001).

En el punto cortina, el resultado más bajo de CWQI fue 39 puntos en 2016, lo cual la categorizó como pobre, y su mejor resultado se obtuvo en 2003 con 89 puntos categorizándola como buena. En los cuatro muestreos de 2016, fueron 7 parámetros que incumplieron, mientras en los dos muestreos realizados en el 2003 solo incumplió un parámetro. Del año 2002 al 2013, el porcentaje de variables (alcance) que no lograron cumplir los objetivos de calidad tuvo mayor incidencia en los cálculos. Mientras que del 2014 al 2016 fue la amplitud que tuvo mayor peso en el cálculo de la calidad del agua, es decir, los parámetros sobrepasaron entre 2 y 25 veces los límites de la directriz. En el punto cortina es donde se da la extracción de agua para alimentar la planta de tratamiento y es posible que existan deterioros temporales de la calidad, debido a la mezcla de toda la columna de agua y la zona intersticial agua-sedimento.

En el punto centro, el menor resultado de CWQI fue 42 puntos en 2016, lo cual la categorizó como marginal, mientras que su mejor resultado se obtuvo en 2009 con 93 puntos categorizándola como excelente. En el sitio centro es la zona en la que se realizan la mayor parte de los procesos metabólicos en el embalse, lo que favorece condiciones redox muy variables, las que a su vez provocan aumento o disminución de algunos parámetros que afectan los objetivos de calidad (p. ej., amonio, oxígeno disuelto). Se observó el aumento en el número de veces que uno o más parámetros sobrepasaron los límites establecidos durante los últimos 4 años por lo que se considera como evidencia de una creciente contaminación en el embalse.

En el punto cola, su menor resultado de CWQI fue 33 puntos en 2016, lo cual la categorizó como pobre, mientras que su mejor resultado se obtuvo en 2012 con 93 puntos categorizándola como excelente. En el sitio cola como se ha explicado antes, la calidad del agua disminuye al recibir los contaminantes arrastrados por la red hídrica a lo largo de la subcuenca, lo que provocó que las diferencias fuesen más notorias. La frecuencia tuvo mayor incidencia en 12 de los 15



años de estudios y la amplitud en los 3 años restantes. Se observó en los años 2003, 2005, 2010, 2012, 2013 y 2015, los CWQI calculados para el sitio cola fue mayor que los calculados para el sitio cortina. Sin embargo, estas fluctuaciones en el sitio cola fueron más notorios, lo que provocó que los promedios históricos fueran menores al sitio cortina. En general, se observó la disminución de los valores de los índices y, por lo tanto, en la categorización de la calidad del agua cuando se incluyeron más parámetros (13= 2015–2016) y cuando se realizaron mayor número de muestreos (17= 2011) (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Categorización de la calidad de agua del embalse Los Laureles para protección de la vida acuática, Directriz Canadiense (CCME).

Table 3. Categorization of water quality of the Los Laureles reservoir for aquatic life protection, Canadian guidelines (CCME).

Año, (No. muestreo)	CORTINA				CENTRO				COLA				
	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	
2002 (2)	10	4	79	B	10	2	85	B	9	3	57	M	
2003 (2)	9	1	89	B	10	2	81	B	9	1	91	E	
2004 (3)	9	3	79	B	9	2	80	B	9	3	79	B	
2005 (2)	10	2	86	B	10	2	87	B	10	2	87	B	
2006 (2)	9	2	86	B	9	2	85	B	9	2	82	B	
2007 (1)	9	2	82	B	9	1	91	E	9	2	78	B	
2008 (2)	10	4	74	R	10	4	51	M	10	3	51	M	
2009 (2)	10	3	79	B	10	1	93	E	10	4	72	R	
2010 (4)	10	2	85	B	10	2	69	R	9	2	86	B	
2011 (17)	9	5	62	R	9	4	67	R	9	6	54	M	
2012 (2)	8	2	80	R	9	1	93	E	9	1	93	E	
2013 (4)	9	5	60	M	9	6	56	M	8	3	74	R	
2014 (4)	9	2	78	B	9	4	62	R	9	4	71	R	
2015 (8)	12	6	52	M	13	7	50	M	13	7	56	M	
2016 (4)	13	7	39	P	13	7	42	M	13	8	33	P	
Promedio			74	R	Promedio		73	R	Promedio			71	R
Mediana			79	B	Mediana		80	B	Mediana			74	R

Cat. = Categorización, E= Excelente, B= Bueno, R= Regular, M= Marginal y P= Pobre.

3.3 Calidad del agua para protección de la vida acuática de acuerdo con la directriz de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA)

Un total de 7 de 11 parámetros fueron detectados fuera del rango, de acuerdo con la directriz estadounidense (USEPA, consultar directriz en su página web) para uso y protección de la



vida acuática (ver **Apéndice 4**). De los siete parámetros que presentaron un problema para la calidad del agua, se debe mencionar especialmente al aluminio y el amonio que sobrepasaron hasta en 500 y 54 veces respectivamente la directriz para los años 2016, 2015 y 2008. Se puede observar que el zinc sobrepasó esta directriz solo 5 veces respecto a las 22 veces de CCME. Es decir, la directriz estadounidense es menos estricta en este parámetro cuando se compara con la directriz canadiense.

El oxígeno disuelto (O.D.) para las directrices estadounidenses el rango óptimo va de mínimo de 3 mg/L hasta un máximo de 9 mg/L, siendo más flexible que las directrices canadienses que van desde un mínimo de 5.5 mg/L hasta un máximo de 9.5 mg/L. Este es un parámetro muy sensible para la vida acuática y se ha demostrado que los niveles reducidos de oxígeno provocan efectos letales y subletales (fisiológicos y de comportamiento) en varios organismos, especialmente peces jóvenes que son más sensibles que los viejos (Alabaster & Lloyd, 1982; Doudoroff & Shumway, 1970). Mientras que los invertebrados acuáticos que pueden soportar condiciones de bajo oxígeno son capaces de alguna forma de metabolismo anaeróbico (Davis, 1975). Las larvas de quironómidos han desarrollado adaptaciones fisiológicas y de comportamiento que tienen la capacidad de aclimatarse, regulando la absorción de oxígeno. Los efectos de niveles bajos de O.D., en presencia de otros factores estresores, pueden resultar en efectos adversos como hipoxia y la hipercapnia combinadas (niveles altos de CO₂) que dan como resultado una acidosis respiratoria (CCME, 1999).

En el punto cortina, su resultado de CWQI fue 40 puntos en 2016, lo cual la categorizó como pobre, mientras que su mejor resultado se obtuvo en 2005 con 93 puntos categorizándola como excelente. Del año 2002 al 2009 y del 2011 al 2013, el alcance tuvo mayor incidencia en los cálculos de calidad. Los años 2010 y 2014 al 2016 fue la amplitud que tuvo mayor peso en el cálculo de la calidad del agua.

En el punto centro, su resultado de CWQI fue 43 puntos en 2016, lo cual la categorizó como marginal, mientras que su mejor resultado se obtuvo en 2009 con 100 puntos categorizándola como excelente. El alcance tuvo mayor incidencia en 8 de los 15 años de estudios y la amplitud tuvo mayor incidencia en los 6 años restantes. En el 2009, el valor del alcance, frecuencia y amplitud fue de 0, es decir, ninguna de las variables falló, de acuerdo con las directrices estadounidense, lo que dio un resultado de WQI de 100 puntos.

En el punto cola, su resultado de CWQI fue 31 puntos en 2016, lo cual la categorizó como pobre, mientras que su mejor resultado se obtuvo en 2005 con 100 puntos categorizándola como excelente. El alcance tuvo mayor incidencia en 10 de los 15 años de estudios y la amplitud en los 4 años restantes. En el año 2005, se dio el mismo resultado que en el punto centro (2009), un puntaje de 100 y una categorización de excelente.

Los índices de calidad (CWQI) variaron, desde 31 que implica una categoría de pobre (cola, 2016) hasta 100 que implica una categoría de excelente (centro 2009 y cola 2005). También, en general, se observó los promedios y medianas históricas calculadas para los sitios centro y cola fueron menores que los calculados para el sitio cortina, aunque se obtuvieran mejores resultados de CWQI en algunos años para estos sitios (**Cuadro 4**).



Cuadro 4. Categorización de la calidad de agua del embalse Los Laureles para protección de la vida acuática, directriz Estadounidense (USEPA).

Table 4. Categorization of the water quality in the Los Laureles reservoir for use of aquatic life protection, American Guidelines (USEPA).

Año, (No. Muestreo)	CORTINA				CENTRO				COLA					
	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.	Total parámetros	Fallaron	WQI	Cat.		
2002 (2)	7	3	72	R	7	2	82	B	7	2	50	M		
2003 (2)	6	2	76	B	7	3	67	R	5	1	87	B		
2004 (3)	6	1	89	B	6	1	78	B	6	1	88	B		
2005 (2)	7	1	91	E	7	1	91	E	7	0	100	E		
2006 (2)	6	1	89	B	6	3	67	R	6	2	74	R		
2007 (1)	6	2	73	R	6	1	86	B	6	2	68	R		
2008 (2)	7	2	81	B	7	2	51	M	7	2	48	M		
2009 (2)	7	1	90	B	7	0	100	E	7	2	80	B		
2010 (4)	7	1	85	B	7	2	62	R	6	2	79	B		
2011 (17)	6	4	57	M	6	4	57	M	6	4	54	M		
2012 (2)	6	2	78	B	6	1	89	B	6	1	89	B		
2013 (4)	6	2	75	R	6	3	65	R	5	2	71	R		
2014 (4)	6	1	76	B	6	2	62	R	6	3	67	R		
2015 (8)	10	3	50	M	11	4	46	M	11	5	56	M		
2016 (4)	11	5	40	P	11	5	43	M	11	7	31	P		
Promedio			75	R	Promedio			70	R	Promedio			69	R
Mediana			76	B	Mediana			67	R	Mediana			71	R

Cat. = Categorización, E= Excelente, B= Bueno, R= Regular, M= Marginal y P= Pobre.

4. Conclusiones

Los índices de calidad históricos 2002-2016 categorizaron la calidad del agua del embalse Los Laureles para el uso consumo humano como marginal en los puntos cortina y centro, y pobre en el punto cola. Siendo la amplitud el atributo que influyó en los parámetros de calidad a lo largo de los años. Por lo tanto, la calidad del agua se ha visto afectada por la cantidad de veces que sobrepasan los límites establecidos, lo cual es evidente con el paso del tiempo, especialmente para parámetros como el aluminio, arsénico, cadmio, hierro, manganeso, nitritos, color, turbidez y coliformes totales, siendo estos en su mayoría por causa de contaminación de origen antrópico; con lo cual su uso para consumo humano solo es posible por medio del tratamiento químico que recibe, de otra forma no se recomienda, ni siquiera para recreación.

Los índices de calidad históricos a través de sus promedios y medianas de acuerdo a las directrices CCME y USEPA categorizaron la calidad del agua del embalse Los Laureles para el



uso protección de la vida acuática como regular. Siendo la frecuencia y, en menor medida, la amplitud los atributos que influyeron en los parámetros de calidad de agua. Es decir, los mismos parámetros en cada muestra, pero con aumento de su concentración respecto a los límites establecidos por las directrices. Se debe prestar especial atención al control de actividades antrópicas en la parte media-baja de la subcuenca y promover su urgente restauración; con lo cual se recomienda ejercer una mayor vigilancia en la subcuenta, la aplicación de leyes ambientales a los infractores, una campaña de concientización, reforestación y realizar una investigación del origen de los contaminantes que más sobrepasaron las normas y directrices.

En general, se observó la disminución de los valores de los índices y, por lo tanto, en la categorización de la calidad del agua, cuando se incluyeron más parámetros en el cálculo (21 parámetros, 2016) y cuando se hicieron más muestreos (17 muestreos, 2011). Por esto, se recomienda al SANAA hacer monitoreos sistemáticos de calidad por lo menos 4 veces al año e incluir sin falta los 21 parámetros recomendados para poder detectar patrones o tendencias de parámetros fisicoquímicos y biológicos de interés identificados en este estudio.

5. Conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

6. Agradecimientos

El Centro de Investigación para los Recursos Acuáticos de la UNAN–Managua quienes proveyeron su visión y experticia en esta investigación a través de la PhD. Katia Montenegro. A la doctora Lourdes Reyes, jefa del Laboratorio de Control de Calidad de la División Metropolitana y al Ing. Roque Andrade Jefe de la Planta de tratamiento de agua del Embalse Los Laureles, del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA), por su apoyo e información suministrada para el buen desempeño de la investigación. A la revista y las personas que dictaminaron el artículo, por sus valiosos aportes.

7. Referencias

Alabaster, J.S. & Lloyd, R. (1982). *Water Quality Criteria for Freshwater Fish*. Second edition. ISBN: 9781483163116

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environmental Federation (WEF). (2016). *Standard methods for the examination of water and wastewater (SMWW)*. <http://www.standardmethods.org/Store/index.cfm>



- Burger, J. (2008). Assessment and management of risk to wildlife from cadmium. *Science of The Total Environment*, 389(1), 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.08.037>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2016). *Canadian environmental quality guidelines*. https://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/
- Canadian Council of Ministers of the Environment (1991, abril). Appendix IX—A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life. En *Canadian water quality guidelines*. Canadian Council of Resource and Environment Ministers.
- CCME. (1999). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Council of Ministers of the Environment. Excerpt from Publication No. 1299.
- Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S. & Verbruggen, N. (2013). Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Sciences*, 18(2), 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003>
- Davis, J. C. (1975). *Waterborne dissolved oxygen requirements and criteria with particular emphasis on the Canadian environment* [NRCC No. 14100, National Research Council of Canada], Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality, Ottawa.
- Diersing, N. (2009). *Water quality: frequently asked question*. Florida Brooks National Marine Sanctuary.
- Doudoroff, O., & Shumway, D.L. (1970). *Dissolved oxygen requirements of freshwater fishes*. (FAO Technical Paper No. 86. Food Agriculture Organization), Naciones Unidas.
- Filipič, M. (2012). Mechanisms of cadmium induced genomic instability. *Mutation Research*, 733(1 -2), 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2011.09.002>
- Global Water Partnership [GWP. (2011). Situación de los recursos hídricos en Centroamerica: Hacia una gestión integrada. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situaciondelosrecursoshidricos.pdf
- Helmar, R. et al. (1997). *Water pollution Control -A Guide to the Use of Water Quality Management Principles-*. WHO/UNEP
- International Research Institute (IRI). (2016). *IRI ENSO Forecast, 2016 december quick look*. <https://www.iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecast/enso/current/>
- Johnson, D. L., Ambrose, S. H., Bassett, T. J., Bowen M. L., Crummey, D. E., Isaacson, J. S., Johnson, D. N., Lamb, P., Saul, M., & Winter-Nelson, A. E. (1997). Meaning of environmental terms. *Journal of Environmental quality*, 26, 581-589. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.263581x>



- Mateos, J., Fereres, E., & Losada, A. (1996). *Eficiencia del riego y modernización de regadíos*. (En actas del XIV Congreso Nacional de riegos. AERYD), pp. 481-488. Almería, España.
- Ministerio de Salud de Honduras. (1995). *Norma Técnica para la calidad el agua potable del 4 de octubre de 1995. Acuerdo No. 084*. Tegucigalpa, Honduras.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2016). *Physical Sciences Division, Boulder Colorado*. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2001). *Environmental health criteria 221: Zinc*. http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_221/en/
- Pernía, B., Sousa A. D. E., Reyes R., & Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en plantas. *Interciencia*, 33(2), 112-119.
- Poch, M. (1999). *Las calidades del agua*. Rubes Editorial S.L.
- República de Honduras (1995). *Norma Técnica para la Calidad del Agua Potable*. <https://docplayer.es/14822515-Norma-tecnica-para-la-calidad-del-agua-potable-acuerdo-no-084-del-31-de-julio-de-1995-vigencia-4-de-octubre-de-1995.html>
- Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados [SANAA]. (2011). *Problemática de la calidad del agua del acueducto de Tegucigalpa*. Ponencia del [XXVII Congreso de Centroamérica y Panamá de ingeniería sanitaria y ambiental].
- United Nations [UN]. (2013). *Water quality*. <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- United States Environmental Protection Agency [USEPA]. (2016). *National recommended water quality criteria - aquatic life criteria table*. <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-life-criteria-table>
- United States Environmental Protection Agency [USEPA]. (2000). Folleto informativo de tecnologías de las aguas residuales. EPA Washington DC: 832-F00-024.
- Villalobos, H., & Hidalgo, J. (2011). *Informe: Arsénico en el Agua Potable*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Informe%20Ars%C3%A9nico%20en%20el%20agua%20potable.pdf>
- Welch, A., Westjohn, D., Helsel, D., & Wanty, R. (1994). Arsenic in ground water of the United States: Occurrence and Geochemistry. *Ground Water*, 38(4), 589-604. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00251.x>

