

Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica

New index for evaluating the surface waters quality in Costa Rica

Guillermo Calvo-Brenes¹

Fecha de recepción: 25 de enero de 2019
Fecha de aceptación: 11 de mayo de 2019

Calvo-Brenes, G. Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-4. Octubre-Diciembre 2019. Pág 104-115.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4796>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gcalvo@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-7021-3509>



Palabras clave

Calidad del agua; índices de calidad del agua; recurso hídrico.

Resumen

El agua es esencial para el mantenimiento de la vida humana, animal y vegetal. En muchos países en desarrollo, existe una permanente degradación de los recursos de agua dulce – en términos de cantidad y calidad – y de los ecosistemas acuáticos. El incremento de agentes contaminantes en las aguas es cada vez mayor debido a actividades antropogénicas. La evaluación de la calidad de un río se puede llevar a cabo por medio del uso de índices, los cuales se caracterizan por sintetizar una gran cantidad de información y que es fácil de entender e interpretar. El objetivo de esta investigación fue establecer el procedimiento para el cálculo de los SI para varios indicadores teniendo en consideración la normativa nacional y las condiciones ambientales del país. Se incluyen fórmulas matemáticas para transformar la concentración de 20 indicadores de calidad a sus respectivos subíndices y poder utilizar el nuevo índice de calidad propuesto. La importancia de esta nueva metodología es que permitirá la creación de nuevos ICAs aplicables a las condiciones ambientales de cada país y adaptada a su propia legislación.

Keywords

Water quality; water quality index; hydric resource.

Abstract

Water is essential for the maintenance of human, animal and plant life. In many developing countries, there is a permanent degradation of freshwater resources - in terms of quantity and quality - and the aquatic ecosystems as well. The increase of pollutants in the water is increasing due to anthropogenic activities. The evaluation of the quality of a river can be carried out using indexes, which are characterized by synthesizing a large amount of information that is easy to understand and interpret. The objective of this investigation was to establish the procedure for the calculation of the SI for several indicators taking into consideration the national regulations and the environmental conditions of the country. Mathematical formulas are included to transform the concentration of 20 quality indicators to their respective sub-indices and to use the new proposed quality index. The importance of this new methodology is that it will allow the creation of new ICAs applicable to the environmental conditions of each country and adapted to its own legislation.

Introducción

El agua es esencial para el mantenimiento de la vida humana, animal y vegetal. Además, forma parte de diversas actividades productivas como la agrícola, la generación de energía hidroeléctrica, la industrial, la pesca, el turismo y el transporte. La insuficiencia de agua o la sequía prolongada puede provocar la muerte generalizada y el deterioro económico. En muchos países en desarrollo, existe una permanente degradación de los recursos de agua dulce – en términos de cantidad y calidad – y de los ecosistemas acuáticos. Esto implica menores beneficios, menor apoyo a la vida y mayores riesgos y peligros relacionados con el agua [1]. La Organización Mundial de la Salud ha dicho que el 80% de las enfermedades del mundo se debe a problemas con el agua [2] [3] [4].

Las causas principales de contaminación del recurso hídrico son tanto naturales como antropogénicas y usualmente estas últimas son las de mayor impacto [5]. La fuente de la contaminación puede ser la local o puntual y la difusa. La local ocurre alrededor de la fuente contaminante, tales como la minería, las instalaciones industriales, aguas residuales domésticas u otras instalaciones. Por otra parte, la contaminación difusa está asociada al transporte de contaminantes a lo largo de amplias zonas frecuentemente alejadas de la fuente de origen, tal como ocurre con la agricultura, la densidad vehicular y la deposición de material particulado transportado a causa de erosión eólica o hídrica [6]. Costa Rica es un país privilegiado con respecto a la cantidad de ríos y mantos acuíferos que posee; desafortunadamente, los niveles de contaminación de los ríos que atraviesan zonas de alta densidad poblacional son altos [7]. El incremento de agentes contaminantes en las aguas es cada vez mayor debido a actividades antropogénicas. Cada año se registran más de 1000 nuevos contaminantes en las aguas producto de la actividad industrial [8] [9].

La determinación de la calidad de un cuerpo de agua usualmente conlleva el análisis de una cantidad grande de indicadores [10]. Si varios indicadores se integran de forma que generan un solo valor, se les denomina índices [11] [12]. Por tanto, un índice es usado para sintetizar una gran cantidad de información de muchas variables o indicadores, que se transforman en una sola variable y que es fácil de entender e interpretar [13] [14]. Para que un índice sea práctico, debe de reducir una cantidad grande de indicadores a una forma más simple, proceso en el cual algo de la información se sacrifica. Sin embargo, un buen diseño del índice conlleva a que el valor suministrado por el índice sea representativo de la calidad del agua y de su tendencia [14] [15].

Un índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color [12]. Estos pueden ser elaborados sobre la base de un uso general del agua o sobre usos específicos [16]. Existen varias expresiones matemáticas para el cálculo del ICA. Durante las últimas tres décadas, se han desarrollado una serie de funciones matemáticas de agregación; sin embargo, varias de ellas producen resultados engañosos bajo ciertas circunstancias [17] [18]. El desarrollo de un nuevo índice involucra usualmente 5 etapas [12] [17] [19]:

- a) selección de los indicadores de calidad
- b) elección de una fórmula de agregación para el cálculo del índice
- c) determinación de un factor de ponderación (W_i) para cada indicador, en el caso que la expresión matemática lo contemple
- d) transformación de cada indicador de calidad a su respectivo subíndice (SI)
- e) agregación de los SI para el cálculo del ICA usando la fórmula de agregación seleccionada en el punto b.

El cálculo de los SI es una de las etapas importantes de todo este proceso. Consiste en la normalización de los distintos indicadores de calidad seleccionados para el cálculo del ICA, por medio de funciones matemáticas [20]. Si bien existen varias fórmulas para el cálculo de los SI, estas fueron desarrolladas en otros países donde la normativa y las condiciones ambientales son diferentes, por lo que su uso genera distorsiones significativas en el cálculo del ICA [16] [18].

La mayoría de los ICAs fueron elaborados empleando una escala de 0-100% pero para efectos de simplificación, la interpretación de la calidad del agua se da en rangos de calidad o clases y sus respectivos colores [21] [16].

La legislación costarricense recomienda el uso de dos índices para evaluar la calidad del agua en ríos: el sistema Holandés para valorar la calidad fisicoquímica y el BMWP-CR (Biological

Monitoring Working Party, modificado para Costa Rica) que evalúa la calidad por medio de fauna bentónica [22]. Estudios comparativos entre ICAs propuestos con respecto al Holandés han demostrado que este último sobrevalora la calidad de las aguas, principalmente por tratarse este de un índice compuesto de tres indicadores de calidad, lo cual no permite una adecuada valoración de la calidad de los ríos [9] [23] [24].

El objetivo de esta investigación fue establecer el procedimiento para el cálculo de los SI para varios indicadores teniendo en consideración la normativa nacional y las condiciones ambientales del país. Además, se incluye un nuevo ICA para valorar la calidad de los ríos en Costa Rica el cual fue elaborado y evaluado anteriormente usando la normativa nacional. La importancia de esta nueva metodología es que permitirá la creación de nuevos ICAs aplicables a las condiciones ambientales de cada país y adaptada a su propia legislación.

Materiales y métodos

Selección de los indicadores

Los distintos indicadores de calidad pueden ser clasificados globalmente en tres categorías [21]: físico, químico y biológico. En general, los indicadores seleccionados deben tener relación con aspectos de la salud (presencia de microorganismos o metales pesados), así como aspectos físicos y químicos, que afecten la calidad del agua [25]. Diferentes indicadores de la calidad del agua tienen diferentes niveles de importancia en distintos tiempos, así como lugares [21] [26].

Se seleccionaron los siguientes indicadores para el estudio por ser de los más importantes [9] [16]: alcalinidad, amoníaco, cloruros, coliformes fecales, conductividad, demanda bioquímica de oxígeno, dureza, fenoles, fosfatos, fósforo de fosfatos, nitratos, nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto, pH, porcentaje de saturación de oxígeno, sólidos suspendidos totales, sólidos totales, sulfatos y turbiedad.

Selección de la fórmula de agregación

Singh y sus colaboradores [17] hicieron un resumen de las distintas ventajas y desventajas que presentan algunas fórmulas de agregación, basado en los trabajos de Ott [15], Smith [27], Cude [26] y Swamee y Tyagi [13]. Calvo-Brenes [16] llevó a cabo una recopilación de esta información.

Se seleccionó la fórmula (1) de Dojlido, Raniszewki and Woyciechowska [28] ya que en estudios anteriores mostró una mayor sensibilidad a los cambios generados por varios indicadores. Además, los resultados de calidad del agua obtenidos con la aplicación de dicha fórmula corresponden a las condiciones de calidad observadas en los ríos durante los muestreos [9] [16].

$$ICA = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI^2}}} \quad (1)$$

donde:

ICA es Índice de Calidad del Agua

SI es el subíndice de cada indicador

n es el número total de indicadores utilizados en el cálculo.

Escalas de calidad del agua

Las categorías, esquemas o escalas de clasificación son un punto de igual o mayor interés que los anteriores, pues es aquí donde finalmente el valor obtenido del índice totalizado por la fórmula de agregación es transformado en un dato cualitativo que define la calidad final del agua [29].

Se utilizó la escala de clasificación propuesta por Landwehr [30] la cual se muestra en el cuadro 1. Se han presentado otras escalas para valorar la calidad del agua por otros autores, similares a la de Landwehr o diferentes a esta; sin embargo, no se reporta que hayan sido tan adecuadamente elaboradas por medio de un panel de expertos de tal magnitud como lo reporta Landwehr [16].

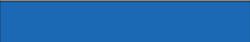
Cuadro 1. Clasificación de la calidad del agua por rangos y calidades

Rango	Cualidad
90-100	Excelente-Muy Buena
75-90	Buena
45-75	Media
20-45	Mala
0-20	Muy Mala

Fuente: Landwehr, 1974.

Conviene ajustar esta escala a la reglamentación nacional [22] por lo que quedaría de la forma en que se expresa en el cuadro 2. Además, se ajustan los límites para evitar ambigüedades en la interpretación. De esta forma, la escala de Landwehr quedó ajustada a la escala por clases que usa nuestra legislación.

Cuadro 2. Clasificación de la calidad del agua por rangos y calidades

Rango	Clase	Nivel de Contaminación	Color
90,0 - 100	1	Ninguno	
75,0 - < 90,0	2	Incipiente	
45,0 - < 75,0	3	Moderado	
20,0 - < 45,0	4	Severa	
0 - < 20,0	5	Muy severa	

Cálculo de subíndices

Una alternativa adecuada y relativamente fácil para desarrollar fórmulas de cálculo para SI ajustados a la normativa nacional, es correlacionando concentraciones de cada indicador con valores específicos prefijados de SI (%), que estén asociados a los ámbitos de permisibilidad

indicados en el reglamento de una región o país. Una vez efectuada la etapa anterior, se procede a definir las funciones matemáticas que integren los puntos seleccionados [16].

Se procedió a asociar cada valor limítrofe, por clase de esta figura con el respectivo valor del SI del cuadro 3 y asociándolo con la información del cuadro 2.

Cuadro 3. Rangos de concentración de algunos indicadores para clasificar las clases y calidades del agua, según la normativa costarricense

Parámetros Complementarios (Unidades)	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Turbiedad (UNT)	<25	25 a <100	100 a 300	(1)	(1)
Temperatura (°C)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Potencial de hidrógeno (pH)	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,0 a 9,0	5,5 a 9,5	5,5 a 9,5
Nitratos, NO ₃ ⁻ (mg N /L)	<5	5 a <10	10 a <15	15 a <20	>20
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	<20	20 a <25	25 a <50	50 a <100	100 a 300
Cloruros (como Cl) (mg/L)	<100	100 a 200	NA	NA	NA
Fluoruros (como F) (mg/L)	<1,0	1 a 1,5	NA	NA	NA
Color (Pt-Co)	2,5 a 10	10 a 100	(1)	(1)	(1)
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	<10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	>300
Sólidos Disueltos (mg/L)	<250	250 a <500	500 a 1000	>1 000	> 1 000

Fuente: MINAE, 2007

Luego se procede de la siguiente forma: el límite inferior de permisibilidad de la Clase 1 se asocia con un valor de SI=100%, al valor inferior de la Clase 2 se le asigna un SI=90, al límite inferior de la Clase 3 le corresponde un SI=75%, al límite inferior de la Clase 4 se relaciona con un SI=45%, y finalmente, al límite inferior de la Clase 5 se asocia con un valor de SI=20. Entonces, en el caso de los sólidos suspendidos totales (cuadro 4), el límite inferior para la Clase 1 corresponde a 0 mg/L en concentración de sólidos suspendidos totales, el límite inferior de la Clase 2 es 10 mg/L, para la Clase 3 el inferior es 25 mg/L, el de la Clase 4 es 100 mg/L y el de la Clase 5 es 300 mg/L.

Cuadro 4. Relación de los valores del ICA en cada límite de permisibilidad de las distintas clases

Parámetros complementarios (Unidades)	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	< 10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	> 300
	↑	↑	↑	↑	↑
	SI = 100 %	90 %	75 %	45 %	20 %

Posteriormente, las curvas de mejor ajuste se generaron con el programa de cómputo CurveExpert Professional 2.2.0.

Cálculo de ICA

El cálculo del ICA se llevó a cabo utilizando la fórmula de agregación 1 en el cual se ingresan cada uno de los SI calculados. Se utilizaron datos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en varios ríos distribuidos en el Gran Área Metropolitana y la Península de Osa. El muestreo se efectuó por un período de 12 meses evaluados mensualmente desde Noviembre del 2010 a Octubre 2011 [9].

Se utilizaron solamente datos promedio de períodos trimestrales de análisis efectuados en la desembocadura de los ríos Torres, María Aguilar, Rincón, Tigre y Agres.

Resultados y discusión

Cálculo de los SI

La figura 1 representa el cálculo en los sólidos suspendidos totales, cuyos valores de SI se asocian a los límites de permisibilidad inferior y superior en cada clase para generar la curva de mejor ajuste, de acuerdo a la metodología anteriormente descrita.

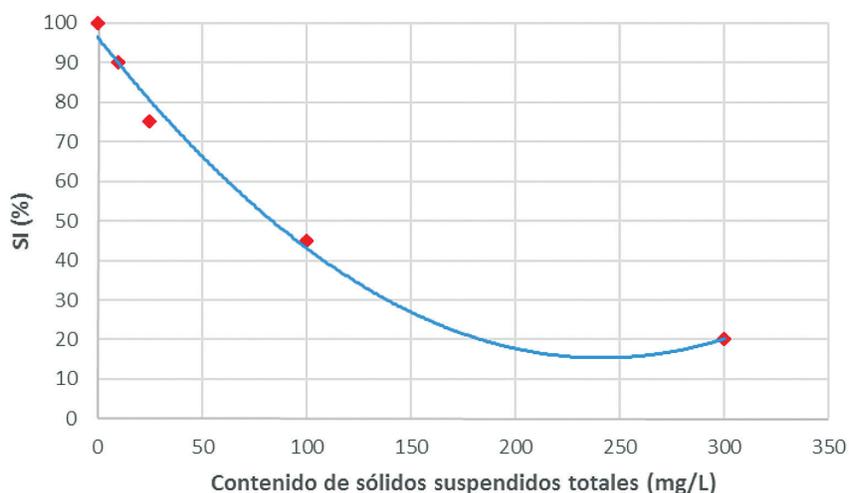


Figura 1. Elaboración de una fórmula para transformar el contenido de SST a SI

El cuadro 5 presenta las transformaciones para el cálculo de los SIs para cada indicador. La mayoría se logró determinar basado en la normativa nacional; en otros casos donde no existe información en nuestra legislación, se utilizaron transformaciones recomendadas por otros investigadores, como fue el caso de Cude [26], Dinius [31] y Stoner [32].

Un indicador importante de mencionar (en el cuadro 5) es la fórmula de cálculo del SI para el contenido de oxígeno disuelto (OD) que presenta Cude [26]. Un contenido de oxígeno disuelto (OD) que represente un SI=100% empleando su fórmula de cálculo corresponde a un OD=11,0 mg de oxígeno/L, pero como el contenido de oxígeno disuelto en el agua depende de la temperatura, este valor se obtendría si la temperatura del agua fuera de 11°C, en un nivel de saturación y una presión atmosférica de 101.3 KPa. La temperatura de las aguas de nuestros ríos usualmente es de (20-25)°C, lo que corresponde a valores de OD=(7,0-7,7) mg/L a nivel de saturación y a 1400 metros de altitud. Nuevamente, se tiene una situación en la que la fórmula de cálculo propuesta por Cude no se aplica a las condiciones ambientales de nuestro país. Otro aspecto importante para considerar es que el valor de 5,0 mg de oxígeno disuelto/L es

crítico, ya que valores por debajo de este dato dificultan la vida de los peces en los ríos. Esta consideración se contempló para la propuesta de una nueva fórmula de cálculo del OD (ver cuadro 5).

Cuadro 5. Fórmulas para el cálculo del subíndice (SI) para varios indicadores de la calidad del agua a través de una estandarización de la concentración de cada indicador

INDICADOR	AUTOR	FORMULA
Alcalinidad	Propuesta nueva	$SI = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ donde $a= 100,125$, $b= -0,7097$, $c=0,012191$, $d = -1,4834 \cdot 10^{-4}$, $e = 4,6307 \cdot 10^{-7}$ $SI = 10$ para $X > 140$
Amoniaco	Propuesta nueva	$SI = ae^{bx}$ donde $a= 102,7848$, $b= -0,2910088$ $SI = 10$ para $x > 8$
Cloruros	Propuesta nueva	$SI = \frac{(a+bx)}{(1+cx+dx^2)}$ donde $a= 100,00$, $b= -0,1000$, $c= -3,333 \cdot 10^{-4}$, $d = 3,333 \cdot 10^{-6}$ $SI = 10$ para $X > 750$
Coliformes fecales	Propuesta nueva	$SI = 100$ para $X \leq 1$ $SI = -3,6298 \ln(x) + 100,32$ para $1 < X \leq 1000$ $SI = 9,3566(\ln(x))^2 - 178,55 \ln(x) + 861,82$ para $1000 < X \leq 15000$ $SI = 10$ para $X > 15000$
Conductividad	Stoner	$SI = +100 - 0,0002X^2$ para $X < 700$ $SI = 0$ para $X \geq 700$
Demanda bioquímica de oxígeno	Propuesta nueva	$SI = \frac{ab+cx^d}{b+cx^d}$ donde $a= 98,84689$, $b= 235,2236$, $c = -4,829346$, $d = 2,470089$ $SI = 10$ para $X > 20$
Dureza	Dinius	$SI = 10^{(1,974-0,00132X)}$
Fenoles	Stoner	$SI = +100 - 100X$ para $X < 1,0$ $SI = 10$ para $X \geq 1$
Fosfatos	Propuesta nueva	$SI = a + bx + cx^2 + dx^3$ donde $a= 99,76275$, $b= -95,18685$, $c=37,73048$, $d = -5,042201$ $SI = 10$ para $X > 3,7$
Fósforo de fosfatos	Propuesta nueva	$SI = a + bx + cx^2 + dx^3$ donde $a= 99,759$, $b= -291,678$, $c=354,29$, $d = -145,089$ $SI = 10$ para $X > 1,2$
Nitratos	Propuesta nueva	$SI = 10$ para $X \geq 23$ $SI = a+bx+cx^2 + dx^3$ donde $a=99,29607$, $b=0,4259834$, $c= -0,4072464$, $d= 9.420290 \cdot 10^{-3}$

continúa...



...Continuación

INDICADOR	AUTOR	FORMULA
Nitrógeno amoniacal	Propuesta nueva	$SI = \frac{1}{a+bx^c}$ donde a= 9,935773 10 ⁻³ , b= 3,681907*10 ⁻³ , c= 1,580439 SI = 10 para X > 9
Oxígeno disuelto	Propuesta nueva	$SI = \frac{ax^b}{c^b+x^b}$ donde a=141,0464 b=2,283152, c= 5,30566 SI = 10 para X < 1,75 SI = 100 si SI >100
pH	Cude	SI = 10 para X < 4 SI = +2,628e ^{+0,5200X} para 4 ≤ X < 7 SI = 100 para 7 ≤ X ≤ 8,0 SI = 100e ^{-0,5188(X-8)} para 8 < X ≤ 11,0 SI = 10 para X > 11
Porcentaje de saturación de oxígeno (0-100%)	Propuesta nueva (0-100%)	$SI = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ donde a=178,5266, b=-13,3111, c=0,3717939, d = -3,908086*10 ⁻³ , e= 1,442735*10 ⁻⁵ SI = 10 para X < 30
Porcentaje de saturación de oxígeno (100 - >130%)	Propuesta nueva (100 - >130%)	$SI = \frac{(a+bx)}{(1+cx+dx^2)}$ donde a= 175,5930, b= -1,339841, c= -1,474162*10 ⁻³ , d = -4,364949*10 ⁻⁵ SI = 10 para X > 130
Sólidos suspendidos totales	Propuesta nueva	$SI = \frac{a+bx}{(1+cx+dx^2)}$ donde a = 100,1271, b = -0,2002545, c = 1,04527*10 ⁻² , d= -2,384969*10 ⁻⁵ SI = 10 para X > 800
Sólidos totales	Propuesta nueva	SI = 10 para X ≥ 1750 SI = 100 para X ≤ 1 $SI = \frac{(a+bx)}{(1+cx+dx^2)}$ donde a= 100,0154, b= -9,740514*10 ⁻³ , c= 1,445411*10 ⁻⁴ , d = 6,835947*10 ⁻⁷
Sulfatos	Propuesta nueva	$SI = \frac{(a+bx)}{(1+cx+dx^2)}$ donde a= 100,00, b= -0,1666, c= -1,444*10 ⁻³ , d = 2,222*10 ⁻⁶ SI = 10 para X > 550
Turbiedad	Propuesta nueva	$SI = \frac{ab+cx^d}{b+x^d}$ donde a= 99,7988, b= 484,5982, c = -283,7007, d = 0,7688 SI = 10 para X > 700

Finalmente, el cuadro 6 muestra el ICA calculado a varios ríos en base a datos de muestreos efectuados en el pasado [9], utilizando fórmulas de transformación para el cálculo de los SI del cuadro 5 y empleando la fórmula de agregación 1.

Cuadro 6. Evaluación del ICA en varios ríos de Costa Rica en su desembocadura

Río	Período Timestral				Promedio
	I	II	III	IV	
Maria Aguilar	22.5	19.7	19.1	17.4	19.7
Torres	17.8	16.4	15.1	15.0	16.1
Segundo	57.0	61.9	60.7	52.3	58.0
Rincon	83.0	84.3	87.9	89.4	86.1
Tigre	34.2	28.5	49.0	50.1	40.4
Agres	59.1	67.1	58.2	53.1	59.4

Fuente: Modificado de Calvo-Brenes, 2013



Conclusiones y recomendaciones

La selección de un ICA adecuado es importante con el fin de evaluar la calidad del recurso hídrico. La evaluación de los niveles de concentración de los indicadores que conforman el índice ayuda en la determinación de las causas que influyen en la calidad del agua y en las posibles soluciones.

Investigaciones anteriores efectuadas por Calvo-Brenes [9] [33] [16] y Calvo-Brenes y Araya-Ulloa [23] han demostrado que el índice Holandés le confiere a los ríos evaluados una calidad superior a la que realmente posee, especialmente por no contar con suficientes indicadores de calidad en su evaluación. Además, este índice muestra poca sensibilidad a los cambios fisicoquímicos y microbiológicos que puede sufrir un río entre un período de evaluación y otro. Este nuevo índice ha demostrado ser más sensitivo y evalúa mejor la calidad de los ríos [9] [16].

La metodología empleada en esta investigación se puede utilizar en otros países para generar ICAs que sean elaborados considerando las condiciones ambientales de un país y su reglamentación.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento al Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). También, agradezco al Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) y al Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) por su gran respaldo a esta investigación.

Referencias

- [1] Global Water Partnership. (2009). Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjvPaw1__fAhUFuVkkHYDgCv0QFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rioc.org%2FIMG%2Fpdf%2FRIOC_GWP_Manual_para_la_gestion_integrada.pdf&usg=AOvVaw2ZYA2UIMfQesaG_3i01qUT
- [2] AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, "VII Congreso Nacional de ingeniería sanitaria y ambiental", Simposio realizado en el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica, 2003.
- [3] OMCO. Estadísticas de enfermedades provocadas por el agua. (2010). Consumer World Organization. Recuperado de www.omco.org/agua/estadisticas_enfermedades_por_agua.htm.
- [4] Organización Mundial de la Salud (OMS). Agua. (2018). Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [5] V. Sánchez, "Antología curso: geodinámica y problemas ambientales", Doctorado en Ciencias Naturales para el desarrollo, 3a promoción 2009. Universidad de Chapingo, México, 2009.
- [6] La contaminación del suelo. Capítulo II. Recuperado de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/11036/Tasm03de16.pdf>
- [7] G. Calvo-Brenes y J. Mora-Molina, "Evaluación y clasificación preliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte III: Calidad de cuerpos receptores de agua, según el Sistema Holandés de Valoración", Tecnología en Marcha, vol. 20, no. 4, pp. 59-67, Nov. 2007.
- [8] S.S. Nas, A. Bayram, E. Nas, and V.N. Bulut, "Effects of some water quality parameters on the dissolved oxygen balance of streams", Polish Journal of Environmental Studies, vol. 17, no. 4, pp. 531-538, 2008.
- [9] G. Calvo-Brenes, "Modelo de predicción de la calidad del agua en ríos basado en índices e indicadores del recurso hídrico y el entorno socio ambiental", tesis para optar al grado de doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, Universidad Estatal a Distancia, Universidad Nacional de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. San José, Costa Rica, 2013.
- [10] S.A. Abbasi, "Water quality indices", Published by INCOH Secretariat, National Institute of Hydrology. University of Roorkee, India, 2002.
- [11] FAO. (2001). Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Recuperado el 15 de Junio, 2009 desde <http://uned.blackboard.com/webct/urw/lc5116001.tp0/cobaltMainFrame.dowebct>
- [12] N. Fernández, A. Ramírez y F. Solano. (2003). "Índices físicoquímicos de calidad del agua: un estudio comparativo", International Water Association. Memorias del evento: Agua 2003. Conferencia internacional usos múltiples del agua para la vida y el desarrollo sostenible. Recuperado el 1 de Julio del 2015 desde <http://www.ingenieroambiental.com/4014/fisic.pdf>
- [13] P.K. Swamee, and A. Tyagi. "Improved method for aggregation of water quality subindices", *Journal of environmental engineering*, vol. 133, no. 2, pp. 220-225, 2007.
- [14] L. León. (1992). Índices de calidad del agua (ICA), forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala. Trabajos presentados en el VIII Congreso Nacional, 1992, acciones para un ambiente limpio. Instituto Mexicano de Teconología del Agua. Recuperado el 1 de Noviembre, 2009 desde <http://www.science.uwaterlooca.ca/~lfleonvi/rtic/art09.pdf>
- [15] W.R. Ott. (1978). Water quality índices: a survey of índices used in the United States. Office of monitoring and technical support. U. S. Environmental Protection Agency. EPA-600/4-78-005. Washington, United States of America
- [16] G. Calvo-Brenes, "Índices e indicadores sobre la calidad del agua", 1 ed. Cartago, CR: Editorial Tecnológica. 2018.
- [17] R.P. Singh, S. Nath, S.C. Prasad and A.K. Nema, "Selection of suitable aggregation function for estimation of aggregate pollution index for river Ganges in India", *Journal of environmental engineering*, vol. 134, no. 8, pp. 689-701, 2008.
- [18] G. Calvo-Brenes, "Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica", Tecnología en Marcha, vol. 26, no. 2, pp. 9-19, 2013b.
- [19] T. Abbasi and S.A. Abbasi, "Water quality índices", 1 ed. Oxford, UK: Elsevier, 2012.
- [20] P. Torres, C. Cruz y P. Patiño, "Índices de calidad en agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: una revisión crítica", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 79-94, 2009.

- [21] D.S. Bhargava, "Use of a wáter quality index for river classification and zoning of Ganga river. Environmental Pollution (Series B)", vol. 6, pp 51-67, 1983.
- [22] MINAE, "Reglamento para la Clasificación y Evaluación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales para la clasificación y la evaluación de la calidad de cuerpos de agua superficiales", no 33903 MINAE-S.. San José, Costa Rica, Gaceta #178, 17 de setiembre del 2007
- [23] G. Calvo-Brenes y A. Araya-Ulloa, "Evaluación de dos índices de calidad del agua en varios sitios de la quebrada La Central, Pacayas de Alvarado, Costa Rica", *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 4, pp. 73-83, 2018.
- [24] K. Salazar-Céspedes, "Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad del agua", tesis de licenciatura, Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica, 2018.
- [25] M. Nasirian, "A new water quality index for environmental contamination contributed by mineral processing: a case study of amang (tin tailing) processing activity", *Journal of applied sciences*, vol. 7, no. 20, pp. 2977-2987, 2007.
- [26] C.G. Cude, "Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, no. 1, pp. 125-137, 2001.
- [27] D.G. Smith, "A better wáter quality indexing system for rivers and streams", *Water Research*, vol. 24, no. 10, pp. 1237-1244, 1990.
- [28] J. Dojlido, J. Raniszewski and J. Woyciechowska, "Water quality index applied to rivers in the vistula river basin in Poland", *Environmental monitoring and assessment*, vol. 33, pp. 33-42, 1994.
- [29] N. Fernández y F. Solano, "Índices de calidad y de contaminación del agua", 2ª edición, Colombia: Universidad de Pamplona, ISBN 958-33-7810-0, 2007.
- [30] J.M. Landwehr, "Water quality indices: construction and analysis", tesis para optar al grado de doctor, University of Michigan. Michigan, Estados Unidos, 1974.
- [31] S.H. Dinius, "Design of an index of wáter quality", American Water Resources Association. *Water Resource Bulletin* # 86088, vo.23, no. 5, pp. 833-842, 1987.
- [32] J.D. Stoner. (1978). Water quality índices for specific wáter uses. U.S Geological Survey Circular 770. Recuperado el 1 de Diciembre, 2014 desde <http://pubs.usgs.gov/circ/1978/0770/report.pdf>
- [33] G. Calvo-Brenes, "Ríos: fundamentos sobre su calidad y la relación con el entorno socioambiental", 1 ed. Cartago, CR: Editorial Tecnológica, 2015.