

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de Proyectos
Informe final de proyectos de investigación y extensión

**Elaboración de un índice de calidad para el monitoreo de
los ríos en Guatemala que apoyen los programas de
gestión ambiental**

Guillermo Calvo Brenes

Diciembre 15, 2023

Tabla de Contenidos

Resumen.....	3
Abstract	3
Introducción	4
Marco Teórico	4
Materiales y métodos:	5
Descripción del lugar:.....	5
Selección de los puntos de muestreo	6
Evaluación de indicadores fisicoquímicos y microbiológicos.....	7
Índice de calidad de El Salvador	8
Escala de clasificación del agua	8
Cálculo de subíndices	8
Cálculo de un ICA.....	9
Reducción de variables.....	9
Medición del RBP	9
Selección de un ICA	9
Resultados y discusión	10
Normativa de calidad del agua para Guatemala.....	10
Cálculo de los SI.....	11
Desarrollo de un Nuevo ICA fisicoquímico	13
Conclusiones	18
Referencias.....	18

**Elaboración de un índice de calidad para el monitoreo de los ríos en Guatemala que apoyen los programas de gestión ambiental
(Código Proyecto NA)**

Dr. Guillermo Calvo Brenes, coordinador del proyecto, gcalvo@itcr.ac.cr.

Resumen

Guatemala es el país más poblado de Centroamérica con 17 millones de habitantes, la actividad agrícola en esa zona viene creciendo, principalmente con monocultivos que demandan una gran cantidad de agua. Las densidades poblacionales altas y un uso agrícola intensivo del suelo tienen impactos negativos en el ambiente. Además, Guatemala no tiene un reglamento de calidad de agua que permita el monitoreo de la calidad de sus ríos y su efecto sobre los océanos que apoyen programas de gestión ambiental. El objetivo del proyecto fue elaborar un índice de calidad (ICA) de tipo fisicoquímico y microbiológico para el monitoreo de la calidad de sus ríos. Durante el 2020 se llevaron a cabo muestreos en diferentes ríos ubicados en la Vertiente Pacífica del país, se caracterizó fisicoquímicamente el agua y se elaboró un nuevo índice (ICA-GT). La evaluación mostró los siguientes resultados en los puntos muestreados: el 1.67 % resultó con ninguna contaminación, el 23.33 % mostró contaminación incipiente, el 43.33 % una contaminación moderada, el 30 % fue contaminación severa y el 1.67 % con contaminación muy severa. Es necesario continuar realizando estudios de calidad tratando de abarcar más ríos de todo Guatemala. Esta evaluación permitirá conocer la calidad actual de los ríos y se podrán proponer programas de gestión que ayuden a mejorar su calidad.

Palabras claves: Calidad de agua, índices de calidad, indicadores de calidad

Abstract

Guatemala is the most populated country in Central America with 17 million people, agricultural activity in that area has been growing, mainly with monocultures that demand a large amount of water. High population densities and intensive agricultural use of land have negative impacts on the environment. Additionally, Guatemala does not have water quality regulations that allow monitoring of the quality of its rivers and their effect on the oceans that support environmental management programs. The objective of the project was to develop a physicochemical and microbiological quality index (QI) for monitoring the quality of the rivers of Guatemala that affect the quality of the seas of the Pacific zone. During 2020, sampling was carried out in different rivers located on the Pacific Slope of the country, the water was physicochemically characterized and a new index (ICA-GT) was developed. The evaluation showed the following results in the sampled points: 1.67% had no contamination, 23.33% showed incipient contamination, 43.33% had moderate contamination, 30% had severe contamination and 1.67% had very severe contamination. It is necessary to continue carrying out quality studies trying to cover more rivers throughout Guatemala. This evaluation will allow us to know the current quality of the rivers and management programs can be proposed that help improve their quality.

Keywords: Water quality, quality indices, quality indicators

Introducción

Guatemala ostenta el título de la nación más habitada en Centroamérica, al albergar a una población de 17 millones de habitantes. En esta región, la práctica agrícola ha experimentado un notable incremento, destacándose principalmente por la adopción de monocultivos que requieren una considerable cantidad de agua. Las elevadas densidades poblacionales y el uso intensivo del suelo con fines agrícolas generan efectos adversos en el entorno ambiental. El país tiene 35 ríos principales divididos en tres vertientes: del Pacífico, del Golfo de México y del Atlántico. En la vertiente del Pacífico se encuentran 18 de estos ríos que desembocan en el océano de esa vertiente; además, el 58 % de su población, llevan a cabo actividades agrícolas relacionadas con monocultivos como caña de azúcar y la palma africana. Debido a lo anterior, se considera la vertiente del Pacífico, como la más desarrollada agroindustrialmente en Guatemala (Yax-López et al., 2021). La agricultura utiliza el 59.5 % de los recursos hídricos del país y de éstos se estima que el 90 % son devueltos a los ríos con altos niveles de contaminación (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (FAO, 2021). Es importante conocer la calidad del agua de los ríos, debido a que la misma es utilizada para diferentes usos en las poblaciones que habitan las áreas donde pasan los mismos.

En el pasado los ríos de la vertiente del Pacífico han sido muestreados utilizando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, pero debido a la falta de una normativa nacional que evalúe su calidad en función de los usos, no se puede valorar la calidad del agua (Gil-Rodas et al., 2021).

Durante la presente investigación se desarrolló un índice de calidad fisicoquímico y microbiológico. Primeramente, se caracterizó la calidad de varios ríos ubicados en la vertiente del Pacífico. También se evaluaron diferentes normativas de calidad de ríos existentes en otros países; sin embargo, ninguno de ellos se ajustó adecuadamente a las condiciones ambientales que existen en los ríos guatemaltecos. Se propuso una normativa para el país y sobre esta base, se propusieron fórmulas matemáticas para el cálculo de los subíndices, los cuales son necesarios para el cálculo de un índice de calidad del agua (ICA). El nuevo índice obtenido representa una herramienta de fácil utilización para comprender los cambios que se presenten en la calidad del agua de los ríos de esta vertiente y se puede aplicar para toda la república de Guatemala

Marco Teórico

En el 2015, las Naciones Unidas adoptaron 17 objetivos globales (ODS) basados en varios temas: pobreza, salud, educación, desigualdad social, medio ambiente y crecimiento económico. Dos de ellos se centran en llevar agua potable y saneamiento (ODS6) y proteger la vida bajo el agua (ODS14) (*La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*, 2018). El agua es vital para la vida: el agua dulce limpia es necesaria para beber y para el saneamiento, para nuestros cultivos, ganado e industria, así como para crear y sostener los ecosistemas de los que depende toda la vida. Desafortunadamente, muchas actividades antropogénicas causan efectos adversos en el medio ambiente, como las aguas residuales de los vertidos industriales y domésticos; así como las actividades agrícolas y urbanas, que afectan la sostenibilidad de la vida (Calvo-Brenes, 2015; Calvo-Brenes & Salazar-Céspedes, 2023). El cambio de uso del suelo, como la ampliación de pastos, agricultura o áreas de asentamientos humanos; destruye el hábitat primario y provoca una severa fragmentación de los bosques y, por tanto, degradación y destrucción de la biodiversidad acuática (Ahmad et al., 2021). Por lo tanto, el agua de los ríos debe ser monitoreados con frecuencia ya que los ríos contaminados afectarán a los océanos y su medio ambiente, así como a las comunidades

que dependen de la pesca. Además, el 80% de las enfermedades de salud en todo el mundo están relacionadas con el agua (Lin et al., 2022).

La evaluación de la calidad del agua requiere el uso de datos extensos basados en diferentes indicadores de calidad de vida. Afortunadamente, cuando se utilizan ICAs, los datos se pueden simplificar a un número menor de indicadores necesarios para su cálculo, y este índice se expresa como un solo número (Calvo-Brenes, 2018; Gupta & Gupta, 2021; M. M. Uddin et al., 2021). Hay varios índices disponibles; sin embargo, su principal diferencia radica en la forma de evaluar la contaminación en términos de niveles de calidad, números, colores, fórmulas de cálculo y número de indicadores utilizados; además, cada uno de los muchos resultados posibles mostrará resultados de calidad diferentes; por lo tanto, la selección de un ICA confiable es una tarea importante (Gil-Rodas et al., 2023). Los ICA físicoquímicos proporcionan una evaluación confiable de la calidad del agua para un espacio y tiempo de muestreo específicos, como el ICA de Calvo-TEC, desarrollado para Costa Rica (Calvo-Brenes, 2019; Gil-Rodas et al., 2023), pero que sigue siendo útil para otros países.

Diferentes ICAs requieren de distintos indicadores para su cálculo; por lo tanto, no sorprende que los resultados entre los diferentes índices muestren diferencias entre sí (Calvo-Brenes, 2018). En la literatura se encuentra información sobre diferentes índices físicoquímicos para medir la calidad de vida causada por cambios físicoquímicos ambientales (Md. G. Uddin et al., 2021). Se han propuesto varias fórmulas de agregación y fórmulas de cálculo de subíndices para cada indicador de calidad; así como escalas de clasificación de número, color y contaminación (Chidiac et al., 2023); por lo tanto, las variaciones en los índices físicoquímicos son esperadas, normales y no deben causar sorpresa alguna. Se está reconociendo que es difícil lograr un ICA único y universal (Calvo-Brenes, 2018). Además, los comentarios de Cude (Cude, 2005) sobre este tema fueron: "A pesar de los numerosos índices de calidad del agua desarrollados en los Estados Unidos, no existe un "Índice Nacional de Calidad del Agua de los EE. UU." reconocido. Esto puede ser un reflejo de la variedad de propósitos y programas de monitoreo para los cuales se han desarrollado índices de calidad del agua" Además, se dice que se debe seleccionar un ICA específico de acuerdo con necesidades específicas de monitoreo y evaluación (Saad Abdelkarim, 2020).

Con el fin de tener un índice de referencia para seleccionar el mejor ICA, se utilizará el protocolo de Bioevaluación Rápida (RBP, por sus siglas en inglés) el cual consiste en la caracterización del hábitat. Se evalúan aspectos físicos del cauce relacionados con la heterogeneidad del hábitat, que es una síntesis de los métodos existentes ya utilizados por algunas agencias estatales de recursos hídricos en los Estados Unidos de América (Barbour et al., 1999). El RBP es una técnica muy práctica, útil y rentable. Este Protocolo fue desarrollado a través de una comparación entre hábitats, parámetros físicoquímicos y biológicos. Una vez que se entiende esta relación, los impactos de la calidad del agua se pueden inferir objetivamente, solamente por las evaluaciones del hábitat, a través de esta metodología validada. Debido a que el hábitat y la diversidad biológica están estrechamente vinculados, se puede considerar que esta metodología es altamente confiable y de fácil aplicación para determinar la calidad del agua de un ecosistema.

Materiales y métodos:

Descripción del lugar:

Guatemala está dividida en tres sitios principales: el Caribe, el Pacífico y el Golfo de México; El 58% de la población vive en la vertiente del Pacífico, donde se ubican 18 ríos diferentes

que desembocan en el Océano Pacífico. Las zonas alta, media y baja de cada río mostraron diferentes condiciones ambientales que afectan la calidad del agua. Las densidades poblacionales suelen ser inferiores a los 3.000 habitantes por kilómetro cuadrado, aunque algunas zonas podrían tener densidades superiores, como la zona media del Acomé (3.000-6.500 habitantes por kilómetro cuadrado) o la zona alta del río María Linda con densidades superiores a los 12.000. Es importante considerar esta variable en la selección de los sitios de muestreo, ya que existe una relación entre la población y la calidad del agua: una mayor densidad de población significa una menor calidad del río (Calvo-Brenes, 2015). Los habitantes del lado Pacífico se dedican principalmente a actividades agrícolas, lo que significa una alta demanda de agua (Gil-Rodas et al., 2021). Monocultivos como maíz, cardamomo, trigo, caña de azúcar, café, caucho, palma africana, plátano y frutas son los cultivos más importantes que se encuentran en este sitio, actividades que siguen creciendo y demandando el 59,5% de los recursos hídricos sólo para el riego de cultivos. En Guatemala, el 65% de la población requiere leña para cocinar, actividad que contribuye a una reducción del 2-5% en la cobertura forestal, lo que de alguna manera reduce las barreras naturales de escorrentía y también la recarga de los acuíferos (Gil-Rodas et al., 2023). Algunos de estos monocultivos son responsables de una mayor erosión del suelo y, en asociación con la escorrentía, ambas variables contribuyen al transporte de diferentes contaminantes a los ríos (Calvo-Brenes 2015).

Selección de los puntos de muestreo

Los criterios de selección de los sitios de muestreo fue la densidad poblacional, tratando de abarcar áreas de poca, regular y alta densidad de población. Esto es importante ya que se ha evaluado el efecto directo que tiene la densidad poblacional sobre la calidad de las aguas (Calvo-Brenes, 2013 y 2018). También se consideró la actividad agrícola en esas zonas.

Los puntos elegidos fueron los siguientes (figura 1):

- Río Acomé: zona alta, media y baja
- Río Los Esclavos: zona alta, media y baja.
- Río María Linda: zona baja, media y dos zonas altas.

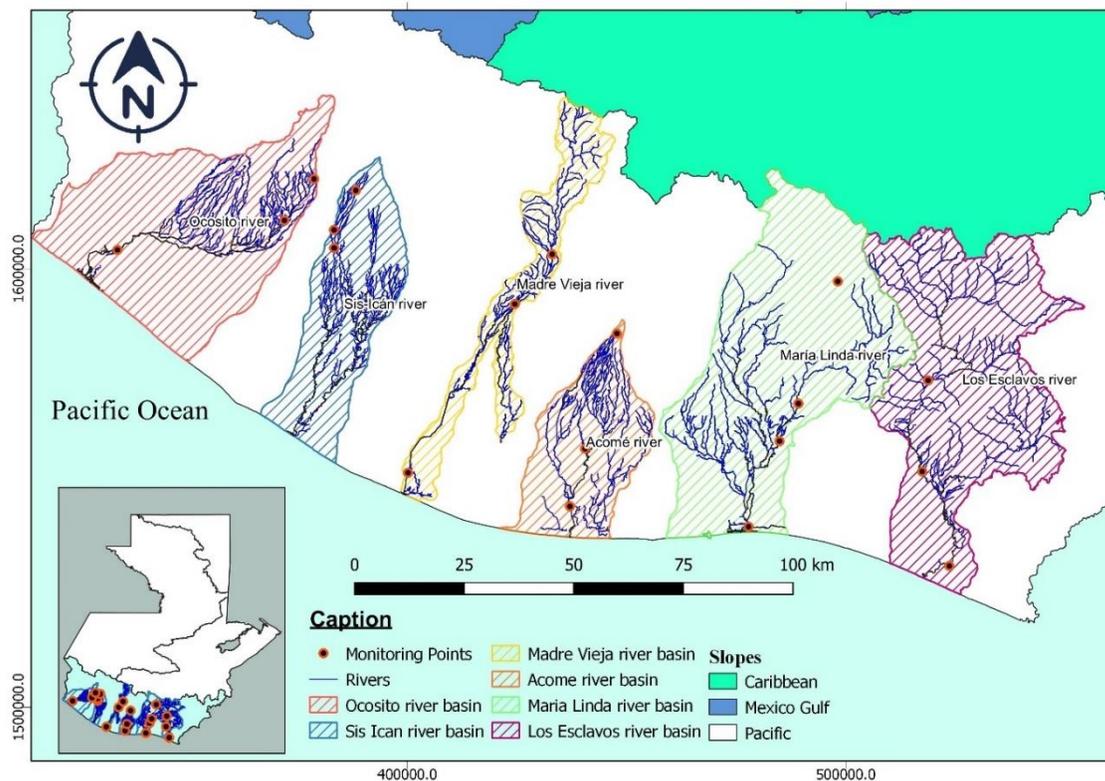


Figura 1. Ríos muestreados de la vertiente del Pacífico de Guatemala
Fuente: Gil-Rodas, et.al., (2023)

Evaluación de indicadores fisicoquímicos y microbiológicos

Los indicadores fisicoquímicos evaluados durante el segundo muestreo en el año 2020, fueron los siguientes: conductividad eléctrica, salinidad, turbidez, potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, la temperatura del agua, dióxido de carbono, sólidos totales disueltos, sólidos totales suspendidos, fosfatos, fósforo total, nitritos, nitratos, nitrógeno total, amonio, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes fecales, alcalinidad, dureza, cloruros, sólidos sedimentables, sulfatos y coliformes totales.

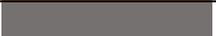
Los parámetros evaluados en el campo, utilizando la sonda multiparamétrica marca HANNA 3210i, fueron los siguientes: conductividad eléctrica, salinidad, turbidez, pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, la temperatura del agua.

Los indicadores de calidad analizados en el laboratorio fueron evaluados utilizando la metodología propuesta por el Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewaters (APHA, 2017) para el dióxido de carbono, sólidos totales disueltos, sólidos totales suspendidos, fosfatos, fósforo total, nitritos, nitratos, nitrógeno total, amonio, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes fecales, alcalinidad, dureza, cloruros, sólidos sedimentables, sulfatos y coliformes totales.

Índice de calidad de El Salvador

El Índice de calidad del agua de El Salvador (ICA-ES) se evaluó utilizando la metodología indicada por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET, 2023) y la escala de calidad del agua se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Escala para la clasificación de ICA-ES

Calidad del agua	Color	Valor
Excelente		91 a 100
Buena		71 a 90
Regular		51 a 70
Mala		26 a 50
Pésima		0 a 25

Fuente: SNET (2023)

Escala de clasificación del agua

Diferentes autores han presentado escalas, tanto similares como diferentes a la de Landwehr (Calvo-Brenes, 2018), para valorar la calidad del agua. Sin embargo, no se reportan que hayan sido elaboradas de manera tan adecuada por medio de un panel de expertos como la de Landwehr; es por esta razón que la evaluación de calidad se hizo empleando esta escala. El cuadro 2 presenta esta escala modificada por Calvo-Brenes (2018) para evitar ambigüedades entre límites en cada cambio de rango.

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

Rango (%)	Clase	Nivel de contaminación	Color
90 - 100	1	Ninguna	
75 - < 90	2	Incipiente	
45 - < 75	3	Moderada	
20 - < 45	4	Severa	
0 a < 20	5	Muy severa	

Cálculo de subíndices

Este cálculo de subíndices (SI) transforma la medición absoluta de cada indicador, que presentan magnitudes y unidades diversas, a un valor adimensional en una escala de 0 a 100. Los distintos SI generados deberían mostrar un comportamiento que varíen dentro de esa escala. En general, a mayor concentración de un indicador en particular, mayor es la contaminación en un río y mayor la tendencia del SI hacia 0.

Existen varias fórmulas de cálculo para dicha transformación; sin embargo, estas han sido desarrolladas de acuerdo con normativas y condiciones ambientales propias de otros países por lo que su aplicación en un país en particular genera distorsiones en las evaluaciones de la calidad del agua. Por lo tanto, se utilizó el procedimiento establecido por Calvo-Brenes (2018 y 2019) y además, se necesitó usar una escala de clasificación y la normativa nacional de clasificación de la calidad del agua con 5 clases o categorías diferentes.

Guatemala no cuenta con una normativa para clasificar la calidad del agua de los ríos; en tal caso, fue necesario considerar varias normativas internacionales que fueran aplicables para las condiciones ambientales de Guatemala. Para ello se evaluaron varias de esas normativas internacionales y se compararon con las evaluaciones fisicoquímicas y microbiológicas efectuadas en los diferentes puntos de muestreo.

Cálculo de un ICA

El cálculo del ICA se efectuó utilizando una fórmula de agregación que suma en un solo valor los distintos subíndices calculados anteriormente. Calvo-Brenes (2018) hizo una recopilación de las más usadas indicando sus ventajas y desventajas. Se utilizaron varias de ellas pues los resultados obtenidos varían de acuerdo con la fórmula utilizada. Se requiere criterio de experto y tomar en consideración la normativa de calidad que se use para determinar cuáles de esos ICAs muestran evaluaciones que sean veraces al momento de evaluar la calidad de los ríos.

Reducción de variables

Aquellos ICAs que muestren veracidad en la evaluación de la calidad de las aguas se sometieron a un proceso estadístico para la reducción de variables utilizando el programa estadístico Statistical Package for Social Science (SPSS) y la herramienta estadística Regresión Lineal Multivariable para establecer correlaciones parciales de Pearson y el procedimiento “Stepwise” para la reducción de variables.

Medición del RBP

La metodología seguida fue la descrita por Barbour et al. (1999). El método original considera 4 categorías diferentes, pero debido que la mayoría de los otros índices tienen 5 categorías, se propuso una modificación a la escala original del RBP la cual se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Escalas según el RBP

Categoría	Rango	Calificación
Excelente	17 a 20	170 a 200
Buena	13 a 16	130 a 169
Regular	9 a 12	90 a 129
Mala	5 a 8	50 a 89
Pésima	0 a 4	0 a 49

Fuente: Modificada de Barbour *et al.*, 1999.

Selección de un ICA

Finalmente se seleccionó un solo ICA que efectúe la mejor evaluación de la calidad del agua tomando en consideración criterios de experto y la normativa utilizada. Esta selección se pudo efectuar considerando como control el índice RBP.

Resultados y discusión

Normativa de calidad del agua para Guatemala

Al estudiar los distintos reglamentos utilizados en diferentes países, se observó lo siguiente: hay reglamentos que contienen varias clases, pero la mayoría sólo implican 3 clases y en otros casos, se considera una clase. Los reglamentos estudiados fueron, el de: Oregón; Cuba; Chile; Ecuador; Perú; Bolivia; Costa Rica; República Dominicana; Moldova; Europa y Asia Central; Alabama, California, Florida y Arizona en Estados Unidos; British Columbia y Manitoba en Canadá; Taiwán; Japón y la India.

Se comparó la información de cada reglamento con la realidad ambiental de Guatemala y se decidió utilizar como referencia el esquema de Costa Rica que tiene 5 clases y diferentes usos del agua para cada clase, por considerarse el más completo que existe y su conveniencia para la región. Costa Rica cuenta con una normativa conocida como el “Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua” (MINAE, 2007) en el cual se establecen 5 categorías en la clasificación de la calidad del agua: la clase 1 corresponde al agua no contaminada y la 5 corresponde al agua más contaminada. Además, varios usos de los ríos pueden aparecer en una sola clase (cuadro 3 del reglamento costarricense).

Entonces, se propuso un sistema de calidad del agua para Guatemala basado en 5 clases o categorías que se relacionan con el posible uso del agua (cuadro 3 del reglamento costarricense) y que, a su vez, se relaciona con la calidad del agua (cuadro 4 del reglamento costarricense).

La propuesta de reglamento que se muestra en el cuadro 4 está dividido en 5 clases y muestra los límites de permisibilidad para varios indicadores de calidad, considerando reglamentos de varios países o propuestas de investigadores, siempre y cuando concuerden con la realidad ambiental existente en Guatemala, de acuerdo con la información de la base de datos de campo generada en el 2020, así como los resultados que se fueron dando durante la generación de los diferentes índices.

Cuadro 4. Legislaciones propuestas para calidad fisicoquímica del agua para cada indicador, expresado en miligramos por litro.

Propuesta nueva	Origen	Clase				
		I	II	III	IV	V
Alcalinidad	Propio según datos de campo	0-<55	55-<140	140-<320	320-<470	>=470
Amonio	Europa Central/Asia modificado	<0.2	0.2-<0.5	0.5-<1.3	1.3-2.2	>2.2
Cloruros	Propio según datos de campo	0-<150	150-<250	250-<400	400-<500	>=500
Coliformes fecales	Europa Central/Asia (modificado)	<100	100-<3000	3000-<10000	10000->20000	>20000
Conductividad	Perú	0-1500	>1500-2500	>2500-5000	>5000	---

DBO	Chile modificado	<15	15-35	>35-70.	>70-100	>100
Dureza	Roldan, Gabriel	0-<75	75-<150	150-<300	300-<400	>=400
Fosfatos	Singh modificado	<0.27	0.27-<0.70	0.70-<1.65	1.65-2.5	>2.5
Fósforo total	Europa Central/Asia	<0.15	0.15-<0.3	0.3-<0.7	0.7-1	>1
Nitrato	Costa Rica	<5	5-<10	10-<15	15-<20	>=20
Nitrito	Perú (modificado)	<1	1-<2.5	2.5-<5.5	5.5-<8	>=8
Nitrógeno total	Europa Central/Asia (modificado)	<2.5	2.5-<6.3	6.3-<13.7	13.7-20	>20
Oxígeno disuelto	Liou (modificado)	6.5->6.05	6.05->5.4	5.4->4	4->2.9	<=2.9
pH	Europa Central/Asia	6.5-9.0	6.5-9.0	6.5-9.0	6.5-9.0	<6.5- >9.0
Porcentaje saturación O ₂	Costa Rica modificado	88-100/100-111	74-88/>111-117	49-74/>117-130	49-30	<30 o >130
Salinidad	Propio según datos de campo	0-<0.12	0.12-<0.28	0.28-<0.62	0.62-<0.90	>=0.90
Sólidos Sedimentables	Propio según datos de campo	0-120	>120-300	>300-700	>700-1000	>1000
Sólidos Suspendidos Totales	Propio según datos de campo	0-100	>100-190	>190-317	>317-400	>400
Sulfatos	Europa Central/Asia (modificado)	0-<150	150-<250	250-<400	400-500	>500
Turbiedad	Propio según datos de campo	0-65	>65-160	>160-350	<350-500	>500

Cálculo de los SI

Siguiendo la metodología para el cálculo de SI propuesta por Calvo-Brenes (2018 y 2019) y utilizando la información del cuadro 4 y la escala de clasificación seleccionada (cuadro 2), se obtuvieron las fórmulas de transformación para el SI indicadas en el cuadro 5.

Cuadro 5. Fórmulas de transformación para el SI

Indicador	Origen	Fórmulas de transformación
Alcalinidad	Propio según datos de campo	Si SI>100 entonces SI = 100 SI = -0.1705*X + 99.476 Si X > 524 entonces SI = 10

Amonio	Europa modificado	Central/Asia	Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = 7.0051 * X^2 - 51.635 * X + 99.818$ Si $X > 2.8$ entonces $SI = 10$
Cloruros	Propio según datos de campo		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -0.002 * X^2 - 0.0381 * X + 100.33$ Si $X > 530$ entonces $SI = 10$
Coliformes fecales	Europa (modificado)	Central/Asia	Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ Si $X = 0 - 100$ entonces $SI = 100$ $SI = 1 * 10^{-7} * X^2 - 0.0056 * X + 90.657$ Si $X > 27000$ entonces $SI = 10$
Conductividad	Perú		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -7 * 10^{-7} * X^2 - 0.0077 * X + 100.69$ Si $X > 7400$ entonces $SI = 10$
DBO ₅	Chile modificado		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -0.001 * X^2 - 0.7117 * X + 100.48$ Si $X > 110$ entonces $SI = 10$
Dureza	Roldan, Gabriel		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -0.00015 * X^2 - 0.1401 * X + 100.34$ Si $X > 435$ entonces $SI = 10$
Fosfato	Singh modificado		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = 0.1882 * X^2 - 11.839 * X + 99.8$ Si $X > 100$ entonces $SI = 10$
Fósforo total	Europa Central/Asia		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -80.236 * X + 100.5$ Si $X > 1.13$ entonces $SI = 10$
Nitrato	Costa Rica		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -0.1286 * X^2 - 1.5286 * X + 100.57$ Si $X > 21$ entonces $SI = 10$
Nitrito	Perú (modificado)		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -10.0 * X + 100$ Si $X > 9$ entonces $SI = 10$
Nitrógeno total	Europa (modificado)	Central/Asia	Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = -4.0054 * X + 100.05$ Si $X > 22.5$ entonces $SI = 10$
Oxígeno disuelto	Liou (modificado)		Si $SI > 100$ entonces $SI = 100$ $SI = 22.174 * X - 44.231$ Si $X < 2.45$ entonces $SI = 10$

		Si $X > 6.5$ entonces SI = 100
pH	Europa Central/Asia	Si $6.5 < X \leq 9.0$ entonces SI = 100 Si $X < 6.5$ o > 9.0 entonces SI = 20
Porcentaje saturación O ₂	Costa Rica modificado	Si $SI > 100$ entonces SI = 100 $SI = -0.004 * X^2 + 1.6664 * X - 26.67$ Si $X < 23$ entonces SI = 10
Salinidad	Propio según datos de campo	Si $SI > 100$ entonces SI = 100 $SI = -89.786 * X + 100.36$ Si $X > 1$ entonces SI = 10
Sólidos Sedimentables	Propio según datos de campo	Si $SI > 100$ entonces SI = 100 $SI = -0.0793 * X + 99.602$ Si $X > 1130$ entonces SI = 10
Sólidos Suspendidos Totales	Propio según datos de campo	Si $SI > 100$ entonces SI = 100 $SI = -0.0003 * X^2 - 0.0698 * X + 100.08$ Si $X > 445$ entonces SI = 10
Sulfatos	Europa Central/Asia (modificado)	Si $X < 250$ entonces SI = 100 Si $250 < X \leq 350$ entonces SI = 90 Si $X > 350$ entonces SI = 20
Turbiedad	Propio según datos de campo	Si $SI > 100$ entonces SI = 100 $SI = -0.1598 * X + 100.35$ Si $X > 565$ entonces SI = 10

Desarrollo de un Nuevo ICA fisicoquímico

El cuadro 6 presenta los diferentes índices fisicoquímicos evaluados y el cuadro 7 muestra el análisis estadístico de los coeficientes de correlaciones bivariados de Pearson para cada uno de ellos. El RBP es el índice control de referencia y sobre este se efectúan todas las comparaciones con el resto de los índices. El primer ICA evaluado fue el ICA-ES cuyo cálculo se efectuó de acuerdo con lo indicado en la metodología. Existe una correlación con el RBP; sin embargo, su nivel de confianza es de 84.7% ($\alpha = 0.153$), el cual no es significativamente alto.

El siguiente ICA evaluado se codificó como Dojlido-1 en el cual se utilizó la fórmula de agregación de Dojlido (Calvo-Brenes, 2018) y se emplearon todos los indicadores evaluados en el campo y el laboratorio. Se aclara que el cálculo de los SIs se hizo con una propuesta de reglamento anterior a los que se presentan en el cuadro 4. En este caso la correlación tuvo un nivel de confianza de 82.6% ($\alpha = 0.174$), el cual no es alto. En ese análisis, se encontró que prácticamente todos los sitios muestreados estaban en la categoría de contaminación “Severa”. Además, se determinó que los indicadores causantes del mal desempeño fueron causados por nitritos, nitratos, fosfatos y OD. Se buscó una reglamentación para estos casos particulares, con el fin de mejorar el criterio con relación a la realidad ambiental de Guatemala. En algunos casos, que no se pudo encontrar algún reglamento apropiado, se usaron datos de investigadores mencionados por Calvo-Brenes (2018) en su libro índices

para establecer los rangos de permisibilidad para las 5 clases propuestas basado en gráficos de los SI para cada indicador de calidad (Anexos en el mencionado libro).

Cuadro 6. Pruebas con diferentes fórmulas de agregación para ICA-GT

Río	Zona	Mes	Epoca	Indice							
				RBP	ICA-ES	Dojlido-1	Dojlido-2	Dojlido-3	Brown-1	Brown-2	Dinius-1
Acomé	Alta	Feb-19	seca	149	71.21	81.1	82.1	74.9	91.1	84.9	81.3
	Media	Feb-19	seca	70	67.88	44.6	58.4	45.6	85.4	74.4	65.5
	Baja	Feb-19	seca	59	70.24	36.1	61.1	48.4	85.1	74.0	65.9
Los esclavos	Alta	Feb-19	seca	74	43.5	33.9	51.8	36.9	82.0	67.4	56.8
	Media	Feb-19	seca	85	43.34	28.5	60.6	46.5	84.4	71.8	63.0
	Baja	Feb-19	seca	83	48.89	36.4	62.0	47.4	83.9	71.5	62.9
María Linda	Alta 1	Feb-19	seca	176	51.34	29.3	74.5	61.3	87.0	79.2	74.1
	Alta 2	Feb-19	seca	157	58.02	79.3	82.7	74.1	90.8	83.8	80.3
	Media	Feb-19	seca	94	54.94	60.1	85.6	80.2	91.2	86.6	84.2
	Baja	Feb-19	seca	75	55.26	63.1	64.3	54.9	84.9	74.0	67.5
Acomé	Alta	Apr-19	seca	147	56.95	36.2	68.7	53.3	87.1	76.0	69.2
	Media	Apr-19	seca	70	53.5	36.4	76.1	64.0	88.6	80.2	74.8
	Baja	Apr-19	seca	60	47.8	28.4	62.8	48.6	84.4	72.8	65.5
Los esclavos	Alta	Apr-19	seca	75	51.28	24.4	38.2	24.6	83.3	69.3	56.6
	Media	Apr-19	seca	86	54.39	35.3	67.3	54.5	85.3	75.7	68.8
	Baja	Apr-19	seca	83	50.61	31.0	54.7	50.0	83.0	71.0	63.8
María Linda	Alta 1	Apr-19	seca	176	50.5	29.0	39.5	25.1	86.3	73.1	61.0
	Alta 2	Apr-19	seca	157	50.2	29.5	39.8	25.2	87.5	76.3	63.7
	Media	Apr-19	seca	94	47.24	29.6	79.8	70.5	86.4	76.4	74.0
	Baja	Apr-19	seca	75	44.35	28.8	38.4	25.2	82.2	68.5	56.0
Acomé	Alta	Jun-19	lluviosa	140	59.19	25.4	92.0	86.7	93.3	88.6	87.7
	Media	Jun-19	lluviosa	62	63.33	31.5	91.2	85.1	93.0	88.6	87.3
	Baja	Jun-19	lluviosa	54	58.17	39.9	88.7	80.7	91.7	85.5	83.9
Los esclavos	Alta	Jun-19	lluviosa	70	50.28	24.8	39.7	25.1	85.7	74.5	61.0
	Media	Jun-19	lluviosa	79	52.59	39.3	89.4	82.2	91.3	86.0	84.8
	Baja	Jun-19	lluviosa	68	49.93	36.5	86.7	78.8	89.3	82.3	81.0
María Linda	Alta 1	Jun-19	lluviosa	172	67.6	40.4	92.2	87.3	94.0	89.7	88.6
	Alta 2	Jun-19	lluviosa	157	66.49	40.3	91.4	86.5	93.7	89.4	88.0
	Media	Jun-19	lluviosa	74	60.76	39.5	90.2	87.4	91.6	87.8	87.0
	Baja	Jun-19	lluviosa	63	54.36	31.9	82.4	73.1	87.1	78.4	76.5
Acomé	Alta	Se-19	lluviosa	145	77.3	40.2	87.9	76.1	92.9	89.6	87.5
	Media	Se-19	lluviosa	67	66.56	29.6	44.6	28.6	86.1	72.7	60.1
	Baja	Se-19	lluviosa	57	63.31	29.5	39.2	24.7	84.4	71.2	57.6
Los esclavos	Alta	Se-19	lluviosa	71	66.99	39.5	40.0	25.2	86.9	84.6	82.6
	Media	Se-19	lluviosa	79	63.3	29.7	38.8	24.6	83.2	70.7	58.3
	Baja	Se-19	lluviosa	81	62.03	29.3	29.4	18.3	78.6	68.9	56.7
María Linda	Alta 1	Se-19	lluviosa	173	64.67	31.6	92.6	91.5	94.0	91.4	90.8
	Alta 2	Se-19	lluviosa	155	44.11	24.8	39.6	25.3	82.9	66.7	56.2
	Media	Se-19	lluviosa	72	41.63	28.7	38.3	25.2	80.9	61.5	50.8
	Baja	Se-19	lluviosa	60	47.32	38.8	88.7	85.7	90.1	84.8	84.3
Acomé	Alta	Nov-19	seca	151	61.01	39.9	86.7	73.8	92.1	85.2	82.2
	Media	Nov-19	seca	71	61.46	38.8	77.5	61.5	89.2	80.7	76.0
	Baja	Nov-19	seca	60	54.47	28.0	37.6	23.7	83.4	66.3	52.0
Los esclavos	Alta	Nov-19	seca	74	57.12	29.8	40.3	25.5	87.1	76.8	65.5
	Media	Nov-19	seca	85	44.9	24.7	38.6	24.5	80.7	61.3	51.3
	Baja	Nov-19	seca	85	50.94	24.7	38.7	24.7	80.3	63.4	53.5
María Linda	Alta 1	Nov-19	seca	178	59.53	36.8	90.5	84.0	92.2	86.0	85.1
	Alta 2	Nov-19	seca	160	57.57	30.9	84.8	74.8	87.9	76.6	75.5
	Media	Nov-19	seca	95	53.22	38.0	83.5	71.1	89.2	79.3	76.9
	Baja	Nov-19	seca	76	56.35	39.2	82.5	70.1	88.0	78.1	75.8
Acomé	Alta	Dec-19	seca	147	73.09	30.4	41.3	26.1	87.7	74.2	61.3
	Media	Dec-19	seca	70	71.6	29.9	40.0	25.4	84.8	70.5	57.2
	Baja	Dec-19	seca	60	65.29	29.1	38.1	25.1	84.5	72.8	57.9
Los esclavos	Alta	Dec-19	seca	75	61.38	35.9	59.6	46.9	84.5	72.8	64.3
	Media	Dec-19	seca	86	62.35	38.3	72.9	61.2	86.0	76.5	71.2
	Baja	Dec-19	seca	83	61.03	37.3	67.0	50.9	85.0	71.9	65.1
María Linda	Alta 1	Dec-19	seca	176	63.19	37.9	70.1	56.6	87.2	75.3	68.6
	Alta 2	Dec-19	seca	157	74.29	39.4	81.1	65.6	91.0	82.9	78.3
	Media	Dec-19	seca	94	72.5	39.5	81.9	67.8	90.2	82.6	78.5
	Baja	Dec-19	seca	75	70.75	37.2	66.0	47.3	89.3	80.9	72.3

Cuadro 7. Matriz con coeficientes de correlaciones bivariadas de Pearson para varios índices.

		Correlations							
		RBP	ICA-ES	Dojlido-1	Dojlido-2	Dojlido-3	Brown-1	Brown-2	Dinius-1
RBP	Pearson Correlation	1	.187	.178	.300*	.295*	.434**	.350**	.334**
	Sig. (2-tailed)		.153	.174	.020	.022	.001	.006	.009
ICA-ES	Pearson Correlation		1	.292*	.214	.188	.447**	.454**	.353**
	Sig. (2-tailed)			.024	.100	.150	.000	.000	.006
Dojlido-1	Pearson Correlation			1	.444**	.445**	.411**	.438**	.449**
	Sig. (2-tailed)				.000	.000	.001	.000	.000
Dojlido-2	Pearson Correlation				1	.991**	.838**	.831**	.909**
	Sig. (2-tailed)					.000	.000	.000	.000
Dojlido-3	Pearson Correlation					1	.835**	.838**	.917**
	Sig. (2-tailed)						.000	.000	.000
Brown-1	Pearson Correlation						1	.959**	.928**
	Sig. (2-tailed)							.000	.000
Brown-2	Pearson Correlation							1	.973**
	Sig. (2-tailed)								.000
Dinius-1	Pearson Correlation								1
	Sig. (2-tailed)								
Doj+ Brown	Pearson Correlation								
	Sig. (2-tailed)								

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Con una nueva propuesta de reglamentación mejorada (cuadro 5), se calculó nuevamente un ICA al que se codificó como Dojlido 2. Nuevamente se indica que se usaron todos los indicadores seleccionados para su evaluación. En estas nuevas circunstancias, el ICA mejora su nivel de confianza a un 98.0% (cuadro 7, $\alpha = 0.020$).

El siguiente paso fue utilizar el programa SPSS utilizando el ICA Dojlido 2 como base del análisis, pero empleando la herramienta de reducción de variables utilizando el algoritmo “Stepwise” y se codificó como Dojlido 3. Esta herramienta va eliminando diferentes indicadores, según su valor en su coeficiente de correlación parcial bivariado de Pearson, analizando su nivel de significancia y los coeficientes de determinación ajustados (R^2 adj). En este análisis se logran generar diferentes modelos de regresión con diferente número de indicadores y diferentes R^2 adj.

El Dojlido 3 se puede considerar que su nivel de confianza no varía con respecto al Dojlido 2, pues es de 97.8%; sin embargo, se logra disminuir el número de indicadores usados, lo cual resulta conveniente. Los últimos 4 modelos dieron un R^2 adj de 72.4-74.8% que es un valor considerado aceptable desde el punto de vista estadístico (Acuña-Fernández, 2013). El último modelo dio Sig 0.000 para cada indicador del modelo, excepto para el indicador Fósforo Total que fue de 0.007 y Alcalinidad con 0.001. Los indicadores seleccionados para este modelo fueron: OD, amonio, nitritos y nitratos, fósforo total, DBO_5 y alcalinidad. Al aplicar la reducción de variables a 7 indicadores, el ICA se mantiene bastante integro en su evaluación, solo necesita 7 variables para hacer su trabajo, utilizando la fórmula de agregación de Dojlido.

También se evaluó un ICA utilizando la fórmula de agregación de Brown, cuya fórmula es la misma propuesta por Horton y empleando todas las variables y dando a W_i el mismo peso para todos ($W_i=0.05$ para 20 variables). Se codificó como Brown 1, la correlación es buena

con un nivel de confianza de 99.9% ($\alpha = 0.001$); sin embargo, la clasificación de la calidad por colores con respecto al RBP parece bastante desfazada, pues con el RBP la mayoría de los puntos muestreados está en la categoría de contaminación “Severa”, con Brown en la mayoría de los casos fue “Incipiente” y otros como “Ninguna”.

Efectuando reducción de variables en el ICA Brown 1 como base del análisis estadístico, se observó en los diferentes modelos que en general, varias variables correlacionan bien por lo que se seleccionaron varias utilizando el criterio de experto: OD, conductividad, DBO5, Turbidez, alcalinidad, fosfatos, Nitratos y CF. El R^2 adj fue de 91.1, pero fosfatos no correlaciona según SPSS, la conductividad tuvo un $\alpha = 0.05$ y los CF tuvieron un $\alpha = 0.013$. Entonces se sustituyeron los fosfatos por fósforo total y R^2 adj fue de 93.3. Bajo este nuevo escenario la conductividad no correlacionó y entonces se eliminó del modelo. R^2 adj quedó en 93.1 y todos los indicadores con correlaciones parciales con $\alpha = 0.000$ (SPSS). Las variables incluidas en este modelo son: OD, DBO5, turbidez, alcalinidad, nitratos, amonio, CF y fósforo total. Se codificó como Brown-2, presentó un nivel de confianza de 99.4%; sin embargo, clasifica la calidad del agua como “moderada” o “Incipiente”.

Se evaluó también un ICA con la fórmula de agregación de Dinius y con reducción de indicadores por medio de SPSS. El nivel de confianza fue de 99.1%, pero su comportamiento al evaluar la calidad del agua fue similar al de Brown.

Finalmente, para seleccionar el ICA fisicoquímico para Guatemala, se deben tener una serie de consideraciones importantes. La primera es que el RBP basa su evaluación en indicadores del hábitat, variables que no cambian en el corto o mediano plazo. Por eso vemos que un punto de muestreo no cambia de un mes a otro, o si se trata de época lluviosa o seca. Los patrones de calidad con este índice se mantienen constantes como se puede observar en el cuadro 6. En cambio, los ICAs fisicoquímicos, sí cambian en el corto tiempo, especialmente entre la época seca y la lluviosa. Eso provoca que no haya demasiado paralelismo en la clasificación de la calidad del agua entre ambos tipos de índices. Mas aún, esta constancia de los valores del RBP en relación con la inconstancia de los valores de los ICAs fisicoquímicos, conlleva a que los R^2 adj. no sean tan altos. Si a esto consideramos que la fórmula de agregación de Dojlido, resulta en una mayor sensibilidad del ICA (Calvo-Brenes, 2018) ante los cambios de calidad, tendremos valores no altos en el R^2 adj.

Considerando lo anterior, se observa que los ICAs de Brown y Dinius muestran mejores R^2 ajustados y mejores correlaciones con el RBP, no ocurre igualmente con la clasificación del agua por parte de los otros ICAs con relación al RBP. Si bien el ICA Dojlido 3 tiene un valor menor en su R^2 ajustado, la similitud de la calidad reportada por el ICA Dojlido-3 es similar al del RBP, contrario a lo que ocurre con Brown o Dinius.

Si se hace una evaluación donde consideramos las diferencias entre lo clasificado por calidad del RBP con cada índice y si en los casos en que no hay diferencia en el rango, le asignamos un 0, en el caso en que haya un rango o color de diferencia le asignamos un 1 y así sucesivamente, tenemos que al obtener un valor promedio usando este sistema, el cuadro 8 muestra los siguientes resultados:

Cuadro 8. Diferencia en clasificación entre el RBP con cada ICA evaluado

RBP	ICA-ES	Dojlido-1	Dojlido-2	Dojlido-3	Brown-1	Brown-2	Dinius-1
Diferencia	0.91	0.77	0.88	0.82	1.60	1.09	1.05

Del cuadro 8 se puede observar que el ICA que mostró menores diferencias con respecto a la clasificación dada por el RBP fue el Dojlido-1, seguido del Dojlido-3. El ICA Dojlido-1 requirió del empleo de 20 variables, mientras que el 3 sólo requirió de 7 variables. Además, el nivel de probabilidad de la correlación entre ambos índices fue de 82.6%. El valor cercano a 1 en la figura 5 para el ICA Dojlido-3 supone que, en la mayoría de los casos, clasificó al agua con un grado de calidad inferior al que mostró el RPT. Una de las razones de esta diferencia es el tipo de escalas utilizados para los ICAs fisicoquímicos evaluados y la del RBP, que son diferentes en su escala de separación entre rangos que son diferentes.

Conclusiones

El reglamento propuesto para Guatemala (cuadro 4) con datos de permisibilidad para diferentes indicadores de calidad, para poder evaluar y clasificar la calidad del agua por clases es necesaria, pues sin ella no se pueden trabajar con índices fisicoquímicos que sean confiables. El ICA fisicoquímico cuya clasificación estuvo mejor relacionada con el RBP fue el ICA Dojlido 3, al que designaremos como ICA GT.

Los criterios de selección de indicadores fisicoquímicos y las regulaciones de calidad del agua del país, describen la condición deseada de un cuerpo de agua y cómo se protegerá o logrará esa condición. Los cuerpos de agua se pueden utilizar para diferentes propósitos, tales como la pesca, la protección de la salud humana y la vida acuática.

Referencias

Haga referencia a las citas hechas en el estado del arte

Acuña-Fernández, E. (2013). *Análisis de regresión*. Universidad de Puerto Rico.

Ahmad, W., Iqbal, J., Nasir, M. J., Ahmad, B., Khan, M. T., Khan, S. N., & Adnan, S. (2021). Impact of land use/land cover changes on water quality and human health in district Peshawar Pakistan. *Scientific Reports*, 11(1), 16526. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96075-3>

Calvo-Brenes, G. (2015). *Ríos: Fundamentos sobre su calidad y su relación con el entorno socioambiental* (First). Editorial Tecnológica.

Calvo-Brenes, G. (2018). *Indíces e indicadores sobre la calidad del agua* (First). Editorial Tecnológica.

Calvo-Brenes, G. (2019). Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4796>

Calvo-Brenes, G., & Salazar-Céspedes, K. (2023). Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores fisicoquímicos,

microbiológicos y biológicos de la calidad de agua. *Revista Tecnología en Marcha*.

<https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6456>

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): History, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349–395.

<https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>

Cude, C. G. (2005). ACCOMMODATING CHANGE OF BACTERIAL INDICATORS IN LONG TERM WATER QUALITY DATASETS. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(1), 47–54. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03716.x>

FAO. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura—Sistemas al límite*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>

Gil-Rodas, N., Calvo-Brenes, G., Guerra, A., & Perdomo, A. (2021). Water quality assessment of six rivers of the Pacific side of Guatemala. *Environmental Earth Sciences*, 80(5), 196.

<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09505-w>

Gil-Rodas, N., Guevara-Mora, M., Rivas, G., Dávila, G., García, D., Contreras-Perdomo, A., Alvizures, P., Martínez, M., & Calvo-Brenes, G. (2023). A comparative study of several types of indices for river quality assessment. *Water Quality Research Journal*, 58(3), 169–183.

<https://doi.org/10.2166/wqrj.2023.029>

Gupta, S., & Gupta, S. K. (2021). A critical review on water quality index tool: Genesis, evolution and future directions. *Ecological Informatics*, 63, 101299.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101299>

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. (2018). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

- Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science, 10*, 880246.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- MINAE. (2007). *Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales: Vol. Decreto # 33903-MINAE-S.*
- Saad Abdelkarim, M. (2020). Biomonitoring and bioassessment of running water quality in developing countries: A case study from Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research, 46*(4), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.11.003>
- SNET. (2023). *Indice de calidad del agua general "ICA."*
<http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>
- Uddin, M. M., Zakeel, M. C. M., Zavahir, J. S., Marikar, F. M. M. T., & Jahan, I. (2021). Heavy Metal Accumulation in Rice and Aquatic Plants Used as Human Food: A General Review. *Toxics, 9*(12), 360. <https://doi.org/10.3390/toxics9120360>
- Uddin, Md. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators, 122*, 107218.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Yax-López, P., Román, E. G., Elías, K. N., & Marroquin, F. E. (2021). *Agrícolas del Pacífico de Guatemala.*