



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE
CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Ricardo Josué Pineda Lam

Asesorado por el Ing. Qco. Jorge Mario estrada Asturias

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE
CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RICARDO JOSUÉ PINEDA LAM

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdoba
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdéz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 30 de noviembre de 2015.

Ricardo Josué Pineda Lam

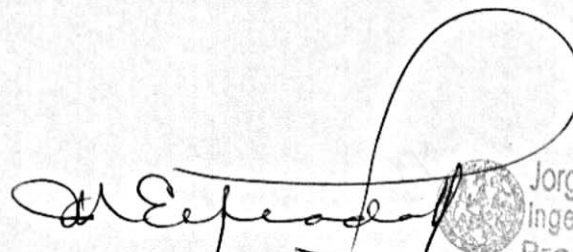
Guatemala 31 de Agosto del 2016

Guatemala, Guatemala

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio hago constar en mi calidad de asesor que he revisado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación del estudiante Ricardo Josué Pineda Lam identificado con el número de carné 2012-13175 titulado "ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA".


Sin otro particular,



Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Colegiado 685

asturiasjm@gmail.com



Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico Col. 685
Profesor Titular
Escuela de Ing. Química USAC



Guatemala, 04 de octubre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.055.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **087-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Ricardo Josué Pineda Lam.**
Identificado con número de carné: **2012-13175.**
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

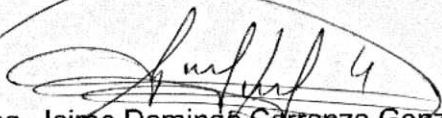
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jaime Domingo Carranza González
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.070.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **RICARDO JOSUÉ PINEDA LAM** titulado: **"ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wong Davila
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, noviembre 2016

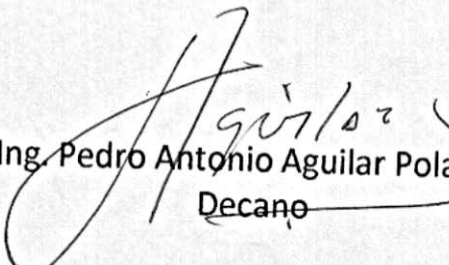
Cc: Archivo
CSWD/ale



DTG. 589.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado el estudiante universitario: **Ricardo Josué Pineda Lam**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por siempre estar conmigo, ser mi luz y estandarte en este arduo camino. Solo a Él sea la Gloria.
Mis padres	Ricardo Pineda y Celia Lam, con todo el cariño, amor, admiración y respeto.
Mis hermanos	Frida, Paola, Katherine, Santiago; con mucho cariño. Son parte importante en mi vida.
Mi sobrino	Jeremy, con mucho amor para este pequeño. Y que sea ejemplo de motivación, esfuerzo y perseverancia para alcanzar las metas.
Mi Familia	A todos en general, tíos, primos, cuñado; todos son especiales para mí.
Mis Abuelitas	Lidia Rivas y María Luisa Escobar, con mucho respeto y cariño.
Mis Amigos	A todos en general, pero especialmente a mis amigos de la universidad, por cada momento compartido y el apoyo en muchas ocasiones.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por nunca dejarme caer en los momentos más difíciles, y darme aliento para seguir adelante. Este logro es dedicado a Él, en primer lugar.
- Mis padres** Por todo el amor que me han dado, pero en especial por esos sacrificios y ese apoyo incondicional que siempre me han otorgado. Solo puedo decir, “Gracias por todo”. Y agradezco a Dios por darme la oportunidad de honrarlos de esta manera. Los quiero mucho.
- Mis hermanos** Gracias por formar parte de mi vida, por ser de apoyo para mí, en muchas ocasiones; este logro también es de ustedes. Los quiero mucho.
- Ing. Jorge Mario Estrada Asturias** Por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de graduación; quien siempre, de manera atenta, demostró su calidad de asesor.
- Inga. Beatriz Ramírez** Por su atención y tiempo brindado y darme la oportunidad de trabajar en el desarrollo de este proyecto de investigación.

2.2.	Índices de Calidad.....	10
2.3.	Índice de Calidad del Agua (ICA).	11
2.3.1.	Parámetros del Índice ICA.....	12
2.3.2.	Método para la estimación del índice de calidad ICA	13
2.3.3.	Interpretación del ICA.....	18
3.	METODOLOGÍA.....	21
3.1.	Variables	21
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	21
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	22
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	22
3.4.1.	Materiales.....	23
3.5.	Técnica cuantitativa.....	23
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	23
3.6.1.	Ubicación de la recolección	23
3.6.2.	Proceso de Recolección de Muestras.....	24
3.6.2.1.	Material.....	25
3.6.2.2.	Preparación de envases para toma de muestras	25
3.6.2.3.	Procedimiento para toma de muestra ..	26
3.6.2.4.	Manejo de muestras	27
3.6.2.5.	Identificación y control de muestras	28
3.6.3.	Cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA)	28
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	29
3.8.	Análisis estadístico.....	29
3.8.1.	Medidas de dispersión.....	29
3.8.2.	Varianza	30

3.8.3.	Desviación estándar	30
3.8.4.	Robustez.....	30
4.	RESULTADOS.....	31
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
5.1.	Procedimiento para cálculo de Índice de Calidad de Agua (ICA).....	39
5.2.	Normalización del método	39
	CONCLUSIONES	43
	RECOMENDACIONES.....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	47
	APÉNDICES.....	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva función de calidad del Oxígeno Disuelto	14
2.	Curva función de calidad de Coliformes Fecales	14
3.	Curva función de calidad de pH	15
4.	Curva función de calidad de DBO	15
5.	Curva función de calidad de Temperatura	16
6.	Curva función de calidad de Fosfatos	16
7.	Curva función de calidad de Nitratos	17
8.	Curva función de calidad de Turbiedad	17
9.	Curva función de calidad de Sólidos Disueltos Totales	18
10.	Usos del Agua según el nivel de índice de calidad	20
11.	Ubicación del lugar Punto de Muestreo	24

TABLAS

I.	Parámetros para el cálculo del Índice ICA	12
II.	Escala de Clasificación del ICA	18
III.	Interpretación de los valores del índice ICA	19
IV.	Variables con sus respectivas unidades de medida	21
V.	Equipo personal para toma de muestras	22
VI.	Equipo para recolección de muestras	22
VII.	Datos de los parámetros analizados en cada muestra.	29
VIII.	Análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos	31

IX.	Ajuste polinómico para subíndice de Porcentaje de Oxígeno Disuelto	32
X.	Ajuste polinómico para subíndice de Coliformes Fecales	32
XI.	Ajuste polinómico para subíndice de pH	33
XII.	Ajuste polinómico para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	33
XIII.	Ajuste polinómico para subíndice de temperatura	34
XIV.	Ajuste polinómico para subíndice de Fosfatos	34
XV.	Ajuste polinómico para subíndice de nitratos	35
XVI.	Ajuste polinómico para subíndice de turbiedad.....	35
XVII.	Ajuste polinómico para subíndice de Sólidos Disueltos Totales	36
XVIII.	Subíndices de los parámetros obtenidos a partir de los ajustes polinómicos para cada muestreo realizado.	36
XIX.	Valores de ICA para temporada seca y temporada lluviosa.	37
XX.	Clasificación de la calidad del agua.	38
XXI.	Interpretación de valores de ICA.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
L	Litros
mg	Miligramos
n	Número de muestras
NTU	Unidades nefelométricas
°C	Celsius
pH	Potencial de hidrógeno.
Qcf	Subíndice Coliformes fecales
Qdbo	Subíndice demanda bioquímica de oxígeno
Qi	Subíndice de parámetro i.
Qn	Subíndice de nitratos
Qod	Subíndice de oxígeno disuelto
Qp	Subíndice de fosfatos
QpH	Subíndice pH
Qsdt	Subíndice sólidos disueltos totales
Qt	Subíndice de temperatura
QTb	Subíndice de turbiedad
Wi	Factor peso
Π	Multiplicativa

GLOSARIO

Calidad de Agua	Determina el grado de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas acorde a valores puntuales.
Coliformes Fecales	Son bacterias que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprofitos en el ambiente.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno, expresa la cantidad necesaria para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia.
Estandarización	Que sirve como tipo, modelo, norma, patrón o referencia. Ajustar algo a un tipo o norma.
Fosfatos	Son nutrientes de las vidas acuáticas y limitantes del crecimiento de las plantas.
ICA	Índice de Calidad de Agua
ISQA	Índice Simplificado de Calidad de Agua
Manual	Ligero y fácil para algo. Libro o cuaderno que sirve para hacer apuntamientos.

NFS	<i>National Sanitation Foundation</i>
Nitratos	Parámetro químico proveniente de las rocas, o bien por oxidación bacteriana de la materia orgánica.
NMP	Número más probable
Normalización	Adaptación de técnicas basadas en un orden especificado para la validez de una metodología.
Normalizar	Regularizar o poner en orden lo que no lo estaba. Hacer que algo se estabilice en la normalidad.
Oxígeno Disuelto	Expresa los niveles de oxígeno en aguas naturales y residuales.
Parámetro Biológico	Son aquellos parámetros que miden cualquier intervención de contaminación con materia orgánica.
Parámetro Físico	Son aquellos parámetros que se perciben por los sentidos, apariencia, color u olor.
Parámetro Químico	Son aquellos parámetros medibles los cuales producen transformaciones o alteraciones en la materia.
SDT	Sólidos disueltos totales, suspendidos y sedimentables.

Temperatura

Parámetro que mide el calor en el agua.

Tipificar

Ajustar varias cosas semejantes a un tipo o norma común.

Turbiedad

Se define como la dificultad del agua para transmitir la luz, debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos e incluso microorganismos.

RESUMEN

El proyecto de investigación tuvo como objetivo estandarizar la metodología de cálculo para el índice de calidad del agua ICA, en la Dirección Ambiental, de la Municipalidad de Guatemala. Para ello se desarrolló un programa de monitoreo ambiental para análisis de aguas superficiales, con la finalidad de obtener datos reales de los parámetros físicos, químicos y biológicos que involucra el índice de calidad.

Como parte de la investigación se implementó una técnica de muestreo generalizada para programas de monitoreo ambiental del recurso hídrico de fuentes superficiales en la ciudad de Guatemala. Realizando una adaptación de la Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Siguiendo todo lo establecido en ella, desde tipo de materiales, formas de captación, técnicas de preservación, entre otros.

Finalmente se redactaron los manuales generalizados para la implementación del método de cálculo del ICA, tomando en consideración técnicas de cálculo matemático, y procedimientos establecidos por la *National Sanitation Foundation* (NSF), para el cálculo del índice ICA, con el fin de determinar la calidad del recurso hídrico en la Ciudad de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Estandarizar el procedimiento y metodología de cálculo para análisis de calidad de agua en la ciudad de Guatemala en temporada lluviosa y temporada seca.

Específicos

1. Establecer la técnica de muestreo generalizada para programas de monitoreo ambiental del recurso hídrico en la ciudad de Guatemala.
2. Determinar el procedimiento de cálculo para análisis del índice de calidad de agua.
3. Redactar los manuales para la generalización del método.

HIPÓTESIS

No se requiere de una hipótesis previa, debido a que la investigación se basa en la implementación de una metodología estándar para el Cálculo del Índice de Calidad del Agua, en el Monitoreo Ambiental de la Ciudad de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

La Dirección de Medio Ambiente de la Ciudad de Guatemala, no cuenta con una metodología de cálculo para el índice de calidad del agua ICA, únicamente basa sus programas de monitoreo ambiental del recurso hídrico superficial, en el Índice simplificado de calidad del agua (ISQA) y el BMWP-CR para análisis de los macroinvertebrados.

El índice ICA, es un índice multiparámetro que analiza las siguientes variables: pH, Coliformes Fecales, DBO, Turbidez, Sólidos Disueltos Totales, Nitratos, Fosfatos, Cambio de Temperatura y Oxígeno Disuelto. Por lo que este índice provee una amplia claridad de las condiciones en las que se encuentra el recurso hídrico, determinando su calidad e indicando los usos que se le pueden dar. Los valores de calificación se encuentran entre 0 y 100. Mientras más cercanos sean los valores a 100 la calidad del recurso hídrico es mejor.

El recurso hídrico ha sido fuertemente atacado por sustancias cada vez más agresivas y difíciles de tratar debido a su naturaleza química de sustancias presentes en desperdicios que caen a las corrientes. Es por ello que agencias gubernamentales, ambientales y diversas organizaciones se han preocupado por evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del estudio de la naturaleza química, física y biológica del agua, mediante programas de monitoreo, tal como lo hace la municipalidad de Guatemala.

Por tal razón, el presente proyecto de investigación normaliza la metodología de cálculo para el Índice de Calidad del Agua ICA, ejemplificando los procedimientos establecidos por la *National Sanitation Foundation* (NSF) basados en la metodología de Delphi, a partir de muestreos realizados sobre aguas superficiales con la finalidad de implementar una técnica de muestreo real y concreta para mostrar valores reales del índice de calidad.

1. ANTECEDENTES

Para las evaluaciones de calidad de agua, diferentes organizaciones de varias nacionalidades involucradas en el control del recurso hídrico, han usado históricamente y de manera regular, Índices Fisicoquímicos. Sin embargo, mientras que los índices de calidad de agua aparecen en la literatura a principios de 1965 (Horton, 1965). La ciencia del desarrollo de los índices de calidad de agua no madura hasta los 70s. Esto pudo deberse en parte a que no fueron ampliamente utilizados y aceptados por las diferentes agencias de monitoreo de la calidad acuática.

El índice General de Calidad de Agua fue desarrollado por Brown et al, (1970) y mejorado por Deininger para la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos en 1975 (NAS, 1975).

De acuerdo con un estudio de la NAS (1975), el Departamento Escocés para el Desarrollo (SSD), en colaboración con instituciones regionales para la preservación de la calidad del río, *The Solway Pufication Board* (Solway RPB) y la *Tweed Purification* (Tweed RPB), llevaron a cabo extensas investigaciones para evaluar la calidad del agua en ríos de Escocia.

En 1978 Ott, presenta una discusión detallada sobre la teoría de índices ambientales y su desarrollo, como también una revisión sobre los índices de la época (Ott, 1978a).

Según Cude (2001), desde 1978 hasta 1994, revisiones de literatura de los índices de calidad de agua desarrollados desde su introducción, han revelado enfoques nuevos y han proporcionado nuevas herramientas para el desarrollo de los índices (Dinius, 1978; Stoner, 1978; Yu and Fogel, 1978; Joung et al., 1979; Bhargava, 1983; Smith, 1987; Kung et al., 1992; Dojlido et al., 1994; En: Cude (2001)).

Sólo hasta 1980, el Departamento de Calidad Ambiental de Oregon, desarrolló su propio índice a partir del NSF, sin embargo, su aplicación fue discontinua dada la dificultad de su cálculo en computadores de primera generación.

Entre 1995 y 1996 se desarrollaron, entre otros, los siguientes avances: la Estrategia de Evaluación de la Florida (*The Strategic Assessment of Florida's Environment-SAFE*) que formuló un índice en 1995. El índice de British Columbia (BCWQI) desarrollado en 1996 y El Programa de Mejoramiento de la Cuenca Baja de (WEP, 1996) que desarrolló un índice en 1996.

En este último año, un estudio realizado por Helmond y Breukel, demostró que, por lo menos 30 índices de calidad de agua, son de uso común alrededor del mundo, y consideran un número de variables que van de 3 a 72. Prácticamente todos estos índices incluyen por lo menos 3 de los siguientes parámetros: O₂, DBO y/o DQO, NH₄-N, PO₄-P, NO₃-N, pH y sólidos totales.

Para el caso Latinoamericano, en México se han desarrollado diversos índices de Calidad de Agua a medida que la normatividad se ha desarrollado (Montoya, 1997).

Por lo que, luego de realizar investigaciones de los tesorios virtuales en las diferentes universidades de este país, no se encontraron trabajos realizados respecto a la estandarización de la metodología de cálculo del índice de calidad del agua (ICA) en el monitoreo ambiental de la ciudad de Guatemala, puesto que existen diversas metodologías de cálculo para dicho índice.

La finalidad de la presente investigación es implementar una metodología de cálculo para el Índice de Calidad del Agua (ICA), aplicado al monitoreo ambiental, en la Ciudad de Guatemala, puesto que únicamente se ha implementado los siguientes índices de calidad de agua: Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA) y el BMWP-CR.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Calidad del Agua

La determinación de la calidad del agua se basa en los niveles de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Para poder evaluar el grado de contaminación en los recursos hídricos es necesario implementar el desarrollo de metodologías de cálculo para determinar el índice de calidad del agua. Por otra parte, debido a las diferencias de interpretación de los encargados de tomar decisiones, los expertos en el tema y del público en general, existe un esfuerzo creciente para desarrollar un sistema indicador que agrupe los parámetros contaminantes más representativos dentro de un marco de referencia unificado.

2.1.1. Parámetros físicos

Son las características del agua que se perciben por los sentidos y no involucran reacciones químicas o biológicas. Entre los parámetros físicos están: la temperatura, los sólidos disueltos totales y la turbiedad.

2.1.1.1. Temperatura

Parámetro que mide el calor en el agua; es importante porque incide en las propiedades, procesos e interacciones físicas, químicas y biológicas de los elementos presentes en el agua.

Como la solubilidad de sustancias químicas, las velocidades de reacción, la solubilidad de los gases en el agua y la actividad biológica. La temperatura del agua se mide en grados centígrados.

2.1.1.2. Sólidos Disueltos Totales

Son las partículas que incluyen a los sólidos disueltos, suspendidos y sedimentables en el agua. Los ST pueden ser, tanto las sustancias orgánicas como inorgánicas, los microorganismos y partículas más grandes como la arena y arcilla. Altas concentraciones impiden la penetración de la luz, disminuyen el oxígeno disuelto, limitan el desarrollo de la vida acuática. Los sólidos disueltos afectan negativamente la calidad del agua para consumo humano, altas concentraciones pueden ocasionar reacciones fisiológicas desfavorables en los consumidores. Los ST son los residuos de materia sólida, orgánica e inorgánica, contenida en el agua que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su posterior secado en estufa a temperatura definida (103-105 °C).

2.1.1.3. Turbiedad

Se define como la dificultad del agua para transmitir la luz, debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos e incluso microorganismos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. El aporte al agua de vertimientos con altas concentraciones de sólidos en suspensión, coloidales o finos, aumenta la turbiedad, se disminuye la transparencia, impidiendo la penetración de la luz, disminuyendo la incorporación del oxígeno disuelto por la fotosíntesis, afectando la calidad y productividad de los ecosistemas.

La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro nefelómetro. Los resultados se expresan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

2.1.2. Parámetros Químicos

El agua, como solvente natural, tiene sustancias químicas disueltas que le proveen ciertas características. Las sustancias disueltas participan en una serie de reacciones químicas que le dan propiedades químicas y biológicas particulares al agua. Para efectos del estudio se determinarán las siguientes características químicas.

2.1.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH)

Expresa la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución. El pH del agua natural depende de la concentración de CO₂. Se debe a la composición de los terrenos donde pasa el agua. El pH alcalino indica que los suelos son calizos y el ácido que son silicios. Vertimientos ácidos, pH < 6 en corrientes de agua con baja alcalinidad ocasionan disminuciones del pH del agua natural por debajo de los valores de tolerancia de las especies acuáticas (pH entre 5 y 9), lo mismo sucede con vertimientos alcalinos pH > 9. El vertido de pH ácido, disuelve los metales pesados y el pH alcalino los precipita. El pH se mide como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno.

2.1.2.2. Oxígeno Disuelto

Se define con la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, expresado en mg de oxígeno por litro de agua. Los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. Además, es función de la temperatura, la presión y la altura sobre el nivel del mar.

2.1.2.3. Fosfatos

Las especies químicas de fósforo más comunes en el agua son los ortofosfatos, los fosfatos condensados (piro-, meta-y poli fosfatos) y los fosfatos orgánicos. Estos fosfatos pueden estar solubles como partículas de detritus o en los cuerpos de los organismos acuáticos. Es común encontrar fosfatos en el agua. Son nutrientes de las vidas acuáticas y limitantes del crecimiento de las plantas. Sin embargo, su presencia está asociada con la eutrofización de las aguas, con problemas de crecimiento de algas indeseables en embalses y lagos, con acumulación de sedimentos, etcétera. Para una buena interpretación de la presencia de fosfatos en las fuentes de aguas crudas, es recomendable la diferenciación analítica de las especies químicas existentes en ellas.

La fuente principal de los fosfatos orgánicos son los procesos biológicos. Éstos pueden generarse a partir de los ortofosfatos en procesos de tratamiento biológico o por los organismos acuáticos del cuerpo hídrico. Otra fuente importante de fosfatos en las aguas superficiales son las descargas de aguas que contienen como residuo detergentes comerciales. Concentraciones relativamente bajas de complejos fosforados afectan el proceso de coagulación durante el tratamiento del agua. Las normas de calidad de agua no han establecido un límite definitivo.

Sin embargo, es necesario estudiar la concentración de fosfatos en el agua y su relación; aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua con la productividad biológica y los problemas que estos pueden generar en el proceso de filtración y en la producción de olores.

2.1.2.4. Nitratos

Pueden provenir de las rocas que los contengan (poco común), o bien por oxidación bacteriana de la materia orgánica, principalmente, de las eliminadas por los animales. La concentración aumenta en las aguas superficiales por el uso de fertilizantes y el aumento de la población (vertimientos de aguas residuales domésticas). El aumento en la concentración de nitratos limita el uso del agua para consumo humano. Desde el punto de vista de potabilidad, las normas actuales admiten hasta 50 mg/l de nitratos, concentraciones superiores son perjudiciales para la salud.

2.1.2.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia. Se expresa en mg/l. Esta demanda es ejercida por las sustancias carbonadas, las nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores. Es una prueba que reduce a números un fenómeno natural, muy sencillo en teoría, pero en esencia muy complejo. El cálculo se efectúa mediante la determinación del contenido inicial de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días en otra muestra semejante, conservada en un frasco cerrado a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos corresponde a la DBO5.

2.1.3. Parámetros Biológicos

El agua contaminada con materia orgánica e inorgánica desarrolla actividad biológica. Los microorganismos degradan la materia orgánica en materia celular y componentes más simples. Para efectos del estudio se realizaran los siguientes análisis biológicos.

2.1.3.1. Coliformes Totales

Los coliformes son bacterias que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprofitos en el ambiente, excepto la *Escherichia*, que tiene origen intestinal. Los coliformes tienen todas las características requeridas para ser un buen indicador de contaminación. Este grupo de microorganismos pertenece a la familia de las entero bacteriáceas. Se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa a 35-37 °C en un lapso de 24-48 horas y producir ácido y gas. Los siguientes géneros conforman el grupo coliforme: *Klebsiella*, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Serratia*. De este grupo, la *Escherichia* y ocasionalmente la *Klebsiella* tienen la capacidad de fermentar la lactosa no solo a las temperaturas indicadas, sino también a 44,5 °C. A los miembros de este grupo se les denomina coliformes termotolerantes (fecales).

Se denomina coliformes termo tolerante a ciertos miembros del grupo de bacterias coliformes totales que están estrechamente relacionados con la contaminación fecal. Por este motivo, antes recibían la denominación de coliformes fecales. Estos coliformes, generalmente no se multiplican en los ambientes acuáticos.

2.2. Índices de Calidad

El índice de calidad, como forma de agrupación simplificada de algunos parámetros, indicadores de un deterioro en la calidad del agua, es una manera de evaluar la calidad de los cuerpos de agua. Sin embargo, para que dicho índice sea práctico debe reducir la enorme cantidad de parámetros a una forma más simple. Por otro lado, si el diseño del índice es adecuado, el valor arrojado puede ser representativo e indicativo del nivel de contaminación y comparable con otros para enmarcar rangos y detectar tendencias.

Existen diferentes índices de calidad del agua, entre los más conocidos se encuentran los índices biológicos, como el índice Saprobic y los físico-químicos. Los más conocidos son el Índice de Calidad del Agua (ICA) siglas en idioma inglés y el Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISQA). Para la presente investigación se implementara únicamente la metodología de cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA).

2.3. Índice de Calidad del Agua (ICA¹).

Este índice tiene la característica que genera ciertos elementos básicos en función de los usos del agua, el “ICA” define la aptitud del cuerpo de agua respecto de los usos prioritarios que este pueda tener. Estos índices son llamados de “Usos Específicos”.

El ICA fue desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional² de los Estados Unidos (NSF), para comparar la calidad del agua de los ríos en varios estados de los Estados Unidos, el índice estándar llamado WQI (*Water Quality Index*) que en español se conoce como: Índice de Calidad de Agua (ICA).

¹Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, Revisión de parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000300019Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Pamplona, Colombia.

²CANTER, L.W.(1998). *Manual de Evaluación del Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto*. 2da. Edición.Editorial McGraw-Hill Interamericana de España.

Este índice es ampliamente utilizado entre todos los índices de calidad de agua existentes, fue diseñado en 1970, y puede ser utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comparando la calidad del agua de diferentes tramos del mismo río, además de compararlos con la calidad de agua de diferentes ríos alrededor del mundo. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo en particular de dicho río, es adecuado o no para el aprovechamiento del agua para consumo humano.

2.3.1. Parámetros del Índice ICA

En el diseño para la determinación del “ICA” intervienen nueve parámetros físicos, químicos y biológicos los cuales se presentan en la tabla I.

Tabla I. Parámetros para el cálculo del Índice ICA

Parámetro	Factor Peso (Wi)
Oxígeno Disuelto	0.17
Coliformes Fecales	0.15
pH	0.12
Demanda Bioquímica de Oxígeno	0.10
Cambio de Temperatura	0.10
Fosfatos	0.10
Nitratos	0.10
Turbiedad	0.08
Sólidos Totales	0.08

Fuente: *Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua*
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000300019.

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Pamplona, Colombia.

2.3.2. Método para la estimación del índice de calidad ICA

Existen dos modelos matemáticos propuestos para determinar el índice. El de promedio aritmético ponderado y el promedio geométrico ponderado. Para este estudio se hará uso de la técnica del promedio geométrico ponderado con la asignación de pesos específicos, obteniéndose a partir de una media geométrica:

$$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \right) \quad (1)$$

Dónde:

i : va de 1 a 9.

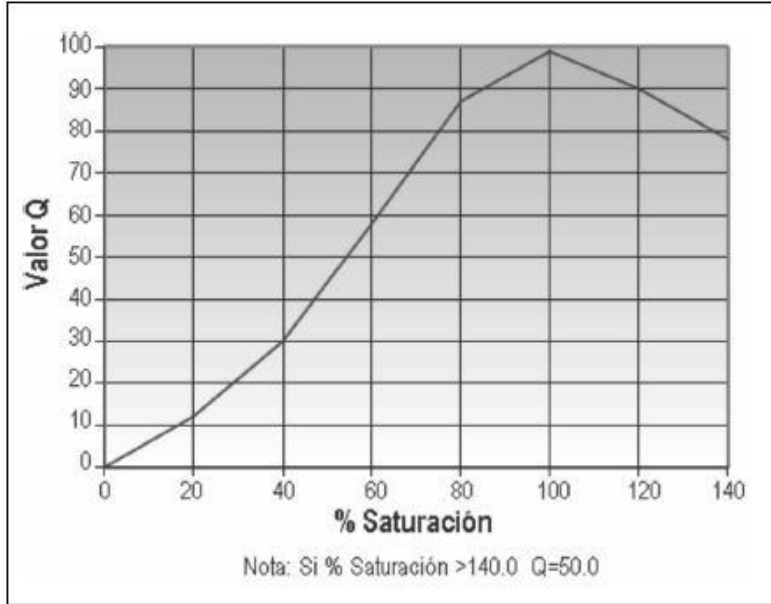
ICA : Índice de Calidad de Agua. Este índice arroja valores entra 0 y 100 indicando la calidad del recurso hídrico.

w_i : Factor peso del parámetro i , valores ponderados entre 0 y 1, de tal forma que la sumatoria de dichos pesos sea igual a uno. Los valores se muestran en la tabla I.

q_i : Subíndice del parámetro i , determinado en función de su concentración, cuya calificación se encuentra en el rango entre 0 y 100 los valores se obtienes de las curvas función para cada parámetro i . figuras 1 a la 9.

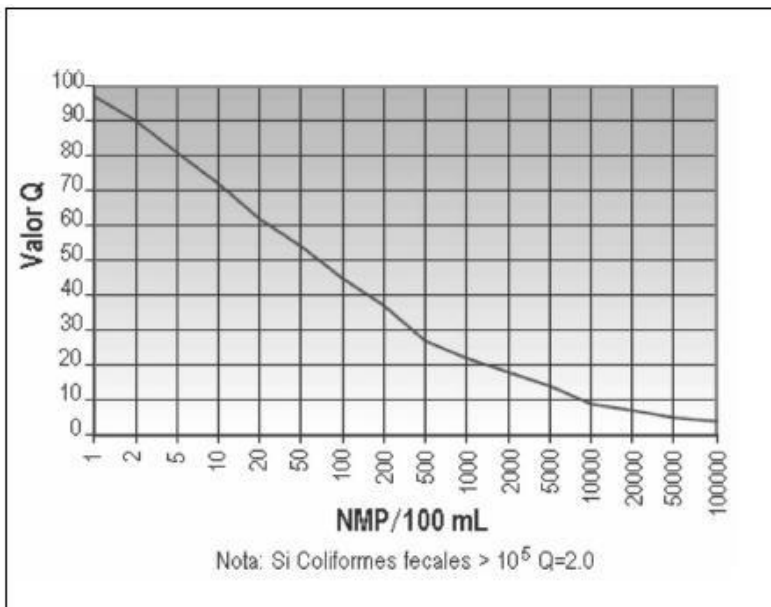
\prod : Representa la multiplicativa de la variable q_i elevadas al factor peso w_i .

Figura 1. **Curva función de calidad del Oxígeno Disuelto**



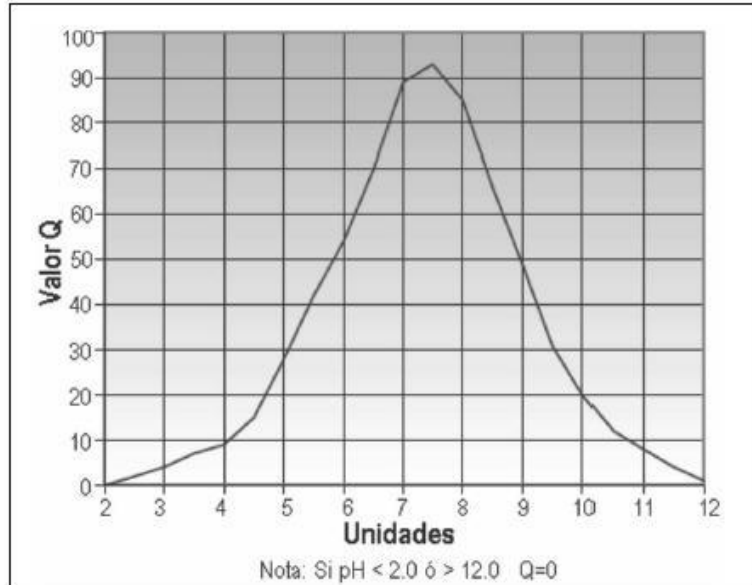
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.21.

Figura 2. **Curva función de calidad de Coliformes Fecales**



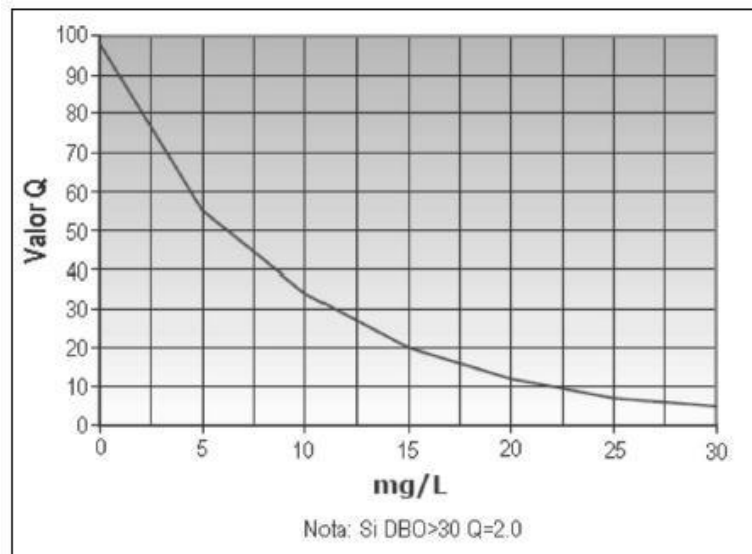
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.21.

Figura 3. Curva función de calidad de pH



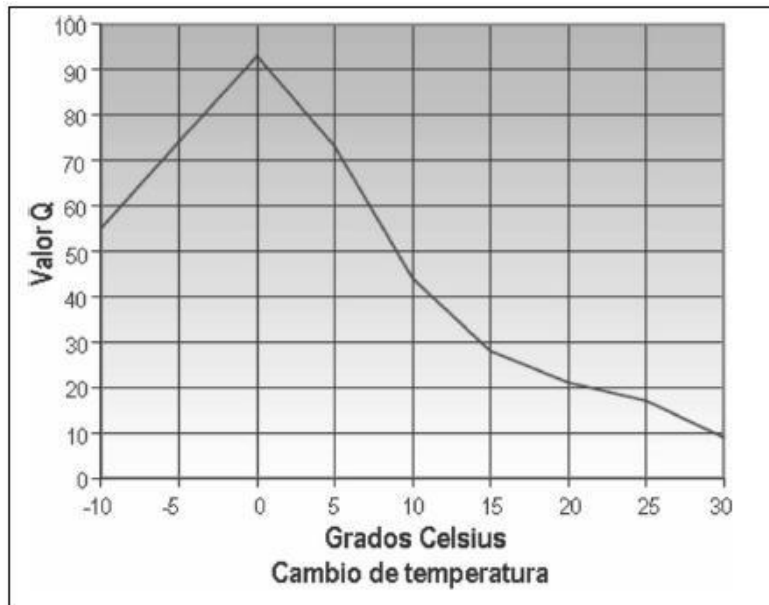
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.21.

Figura 4. Curva función de calidad de DBO



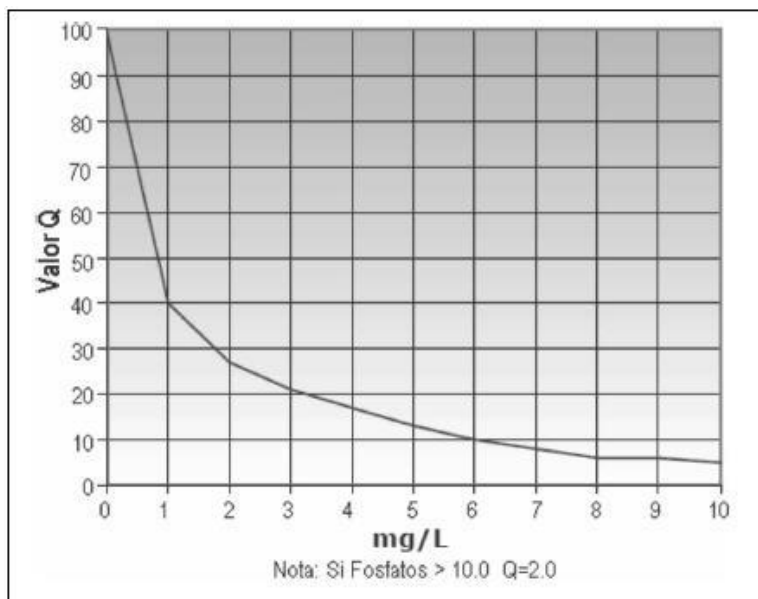
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.21.

Figura 5. **Curva función de calidad de Temperatura**



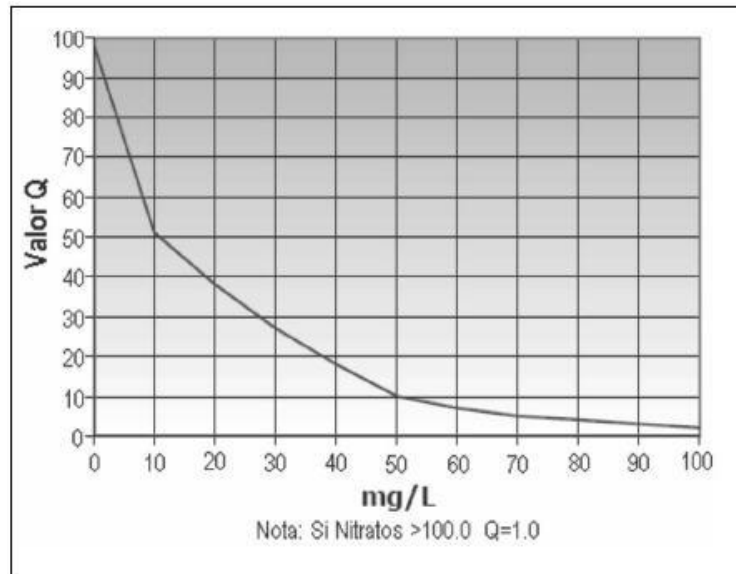
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.22.

Figura 6. **Curva función de calidad de Fosfatos**



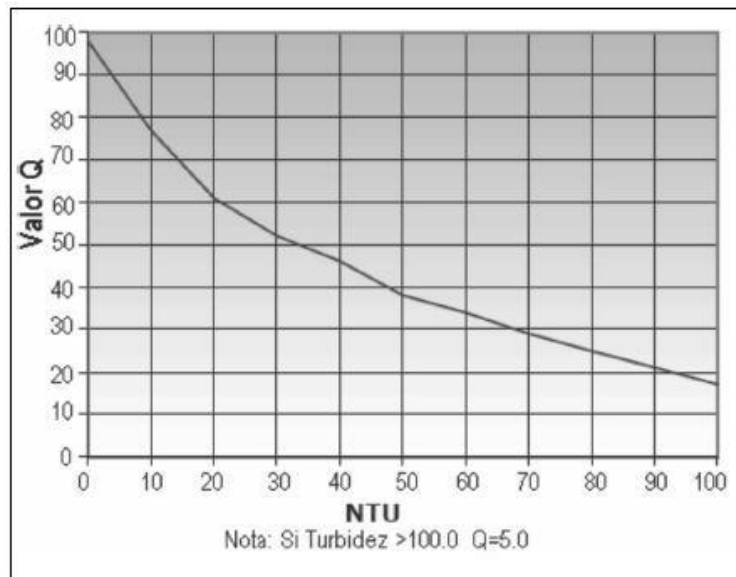
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.22.

Figura 7. **Curva función de calidad de Nitratos**



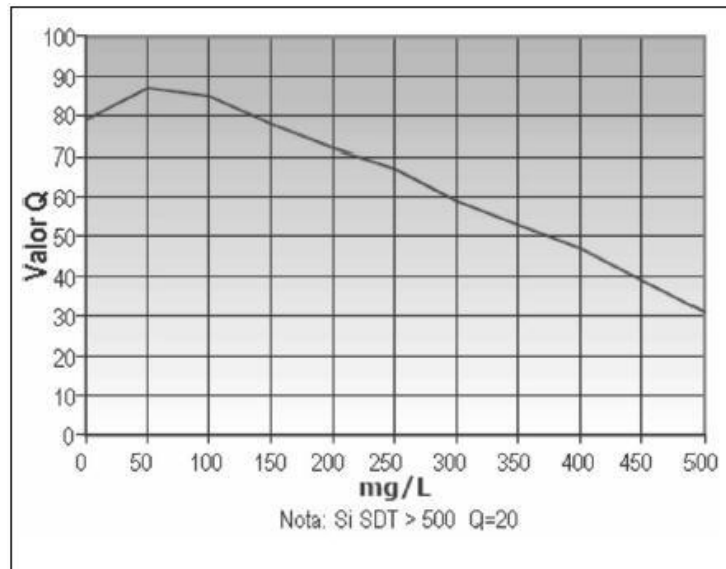
Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.22.

Figura 8. **Curva función de calidad de Turbiedad**



Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.22.

Figura 9. **Curva función de calidad de Sólidos Disueltos Totales**



Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Universidad de San Carlos. 2008. p.23.

2.3.3. Interpretación del ICA

El índice se basa en el resumen de nueve parámetros físicos, químicos y biológicos en una escala de 0 a 100 puntos, el resultado final es interpretado de acuerdo con la siguiente escala de clasificación desarrollada por la NFS:

Tabla II. **Escala de Clasificación del ICA**

Clasificación	Rango	Escala de Color
Excelente	91-100	Azul
Buena	71-90	Verde
Media	51-70	Amarillo
Mala	26-50	Naranja
Muy Mala	0-25	Rojo

Fuente: *índices de calidad (icas) y de contaminación (icos) del agua de importancia mundial*. http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf. Universidad de pamplona Colombia. 21.10.2015.

Tabla III. Interpretación de los valores del índice ICA

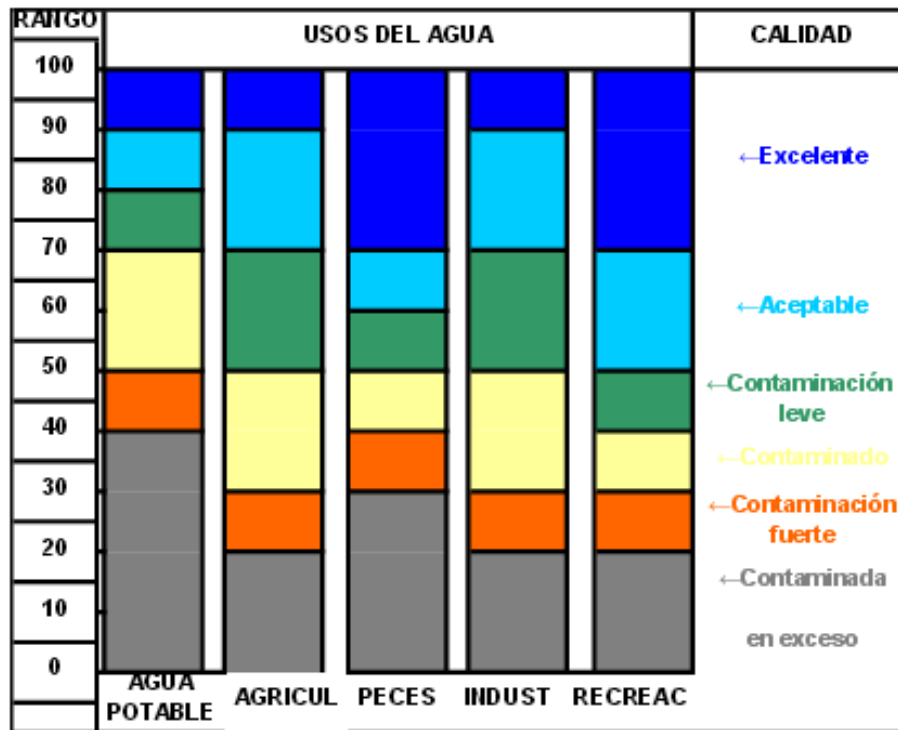
ICA	Categoría	Descripción
91-100	Excelente	El agua, tiene la capacidad de poseer una alta diversidad de vida acuática. Además, es conveniente para todas las formas de contacto directo con ella.
71-90	Buena	Presenta una leve contaminación. La calidad del agua ha disminuido la diversidad de la vida acuática.
51-70	Media	Las aguas tienen, generalmente, menos diversidad de organismos acuáticos y han aumentado con frecuencia el crecimiento de algas.
26-50	Mala	Las aguas pueden solamente apoyar una diversidad baja de la vida acuática y están experimentando probablemente, problemas con la contaminación.
0-25	Muy Mala	Las aguas pueden solamente apoyar un número limitado de las formas acuáticas de la vida, presentan problemas abundantes y, normalmente, no sería considerado aceptable para las actividades que implican el contacto directo con ella, tal como natación.

Fuente: *Índices de calidad (icas) y de contaminación (icos) del agua de importancia mundial*. http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf. Universidad de pamplona Colombia. 21.10.2015.

De acuerdo con las características físicas, químicas y biológicas del agua, resumidas en el índice de calidad. Dinius³ presenta los resultados del índice, según el uso que puede dársele al agua. Como se observa el a figura.

³ DINIUS, S. H. (1987) "Disign of a Water Quality Index" W:R: V23 #5 833-843

Figura 10. Usos del Agua según el nivel de índice de calidad



Fuente: *índices de calidad (icas) y de contaminación (icos) del agua de importancia mundial*. http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf. Universidad de pamplona Colombia. 21.10.2015.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Las variables o parámetros físicos, químicos y biológicos, con sus respectivas unidades de medidas, que se van a analizar son:

Tabla IV. **Variables con sus respectivas unidades de medida**

Parámetro	Unidad de Medida)
Oxígeno Disuelto	% de saturación
Coliformes Fecales	NMP/100mL
pH	Unidades de pH
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L
Cambio de Temperatura	°C
Fosfatos	mg/L
Nitratos	mg/L
Turbiedad	NTU
Sólidos Disueltos Totales	mg/L

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio se limita únicamente a programas de monitoreo que realice la Dirección de Medio Ambiente, Municipalidad de la Ciudad de Guatemala, implementando la metodología para el cálculo del índice de calidad de agua (ICA).

3.3. Recursos humanos disponibles

Desarrollo del proyecto: Ricardo Josué Pineda Lam, estudiante de ingeniería química.

Asesor: Ingeniero Químico, Jorge Mario Estrada.

Asesora Técnico-Administrativo de la Dirección de Medio Ambiente, Municipalidad de Guatemala: Ingeniera Civil, Beatriz Ramírez.

3.4. Recursos materiales disponibles

Tabla V. **Equipo personal para toma de muestras**

No.	Equipo
1	Lentes de seguridad
2	Guantes de Seguridad
3	Casco de seguridad
4	Mosquetón
5	Cordel, para elaboración de arnés
6	Botas de seguridad
7	Guantes de látex

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Equipo para recolección de muestras**

No.	Equipo
1	Recipiente esterilizado de plástico (capacidad: 1 galón)
2	Recipiente de vidrio esterilizado (capacidad: 200 mL)
3	Multiparamétrico

Fuente: elaboración propia.

3.4.1. Materiales

Materia prima necesaria para realizar el estudio: muestras de recurso hídrico, para obtener los resultados de los análisis de cada parámetro involucrado en el cálculo del índice ICA.

3.5. Técnica cuantitativa

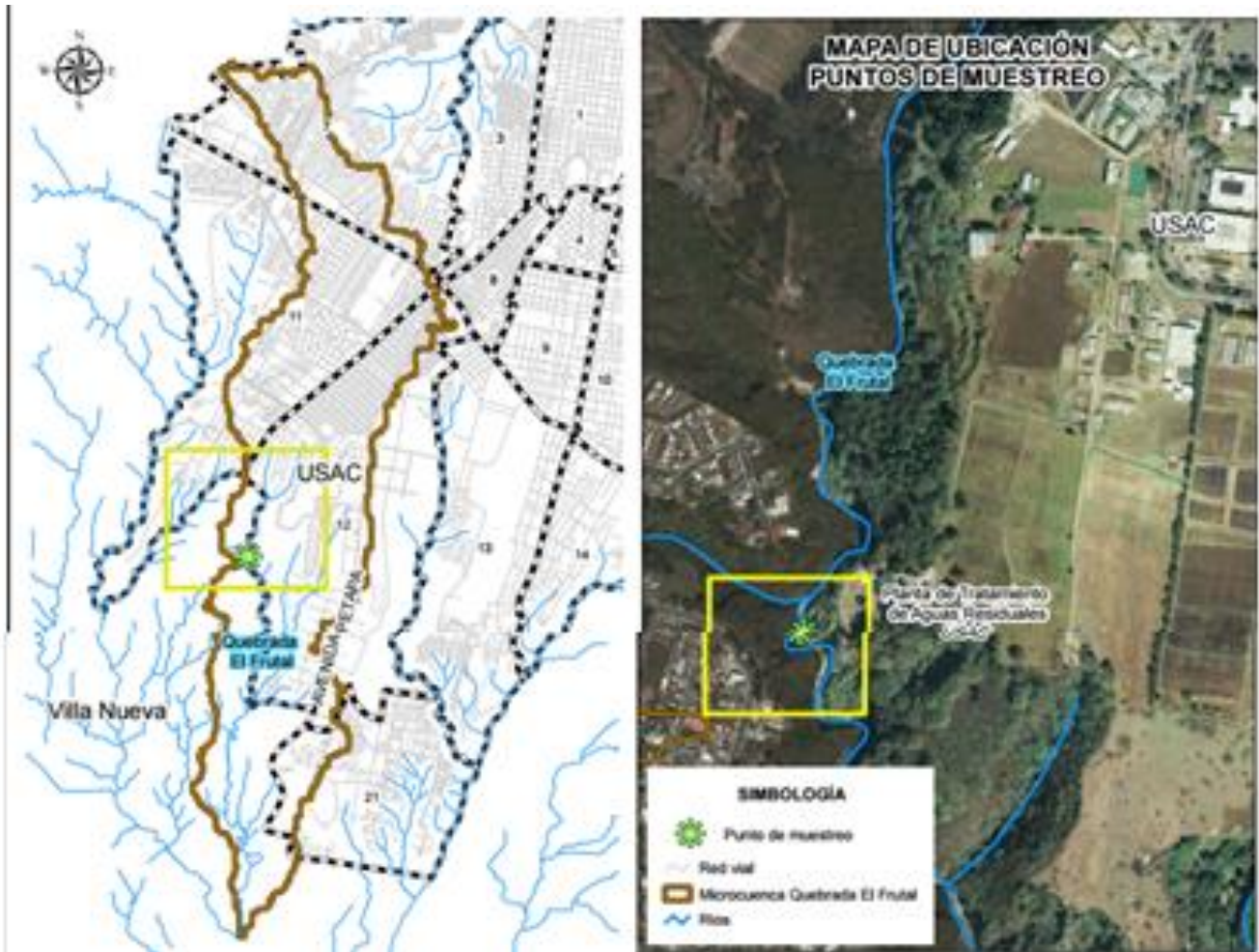
Esta investigación será de carácter cuantitativo, capacitiva y experimental, ya que se realizarán muestreos de determinado recurso hídrico para obtener valores reales de los parámetros involucrados en el cálculo del índice ICA. Con el fin de estandarizar una metodología de cálculo real a programas de monitoreo en la Ciudad de Guatemala.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

3.6.1. Ubicación de la recolección

La recolección de datos se realizó en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. A partir de muestras de recurso hídrico captadas en el Río “Quebrada el Frutal” zona 12, ciudad de Guatemala.

Figura 11. **Ubicación del lugar Punto de Muestreo**



3.6.2. **Proceso de Recolección de Muestras**

La metodología para la recolección de datos se llevará a cabo según la *NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM-014-SSA1-1993 "PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PÚBLICOS Y PRIVADOS"*

3.6.2.1. Material

Envases para toma de muestra:

- Para análisis bacteriológico.- Frascos de vidrio de boca ancha con tapón esmerilado o tapa roscada, o frascos de polipropileno; resistentes a esterilización en estufa o autoclave o bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 ó 250 ml.
- Para análisis físico-químico.- Envases de plástico o vidrio inertes al agua de 2L de capacidad como mínimo, con tapones del mismo material que proporcionen cierre hermético.

3.6.2.2. Preparación de envases para toma de muestras

- Para análisis bacteriológico:
 - Toma de muestra de agua sin cloro residual.- Deben esterilizarse frascos de muestreo en estufa a 170° C, por un tiempo mínimo de 60 min o en autoclave a 120° C durante 15 min. Antes de la esterilización, con papel resistente a esta, debe cubrirse en forma de capuchón el tapón del frasco.
 - Toma de muestra de agua con cloro residual.- Deben esterilizarse frascos de muestreo en estufa a 170° C, por un tiempo mínimo de 60 min o en autoclave a 120° C durante 15 min, los cuales deben contener 0,1 ml de tiosulfato de sodio al 3 % por cada 125 ml de capacidad de los mismos. Debe colocarse un papel de protección al tapón del frasco en forma similar a la indicada en el enunciado anterior.

- Para análisis físico-químico.- Los envases deben lavarse perfectamente y enjuagarse, a continuación, con agua destilada o des-ionizada.

3.6.2.3. Procedimiento para toma de muestra

- Para análisis bacteriológico:

-En captación de un cuerpo de agua superficial o tanque de almacenamiento, deben lavarse manos y antebrazos con agua y jabón. Debe quitarse el papel de protección evitando que se contamine.

-Sumergir el frasco en el agua con el cuello hacia abajo hasta una profundidad de 15 a 30 cm, abrir y enderezar a continuación con el cuello hacia arriba (en todos los casos debe evitarse tomar la muestra de la capa superficial o del fondo, donde puede haber nata o sedimento y en el caso de captación en cuerpos de agua superficiales, no deben tomarse muestras muy próximas a la orilla o muy distantes del punto de extracción); si existe corriente en el cuerpo de agua, la toma de muestra debe efectuarse con la boca del frasco en contracorriente. Efectuada la toma de muestra debe colocarse el tapón, sacar el frasco del agua y colocar el papel de protección.

- Efectuada la toma de muestra, deben colocarse el tapón y el papel de protección al frasco.

- Para análisis físico-químico:

-En captación de un cuerpo de agua superficial, tanque de almacenamiento, pozo somero o fuente similar, debe manejarse el envase, siguiendo las indicaciones comprendidas en el caso bacteriológico.

3.6.2.4. Manejo de muestras

- Las muestras tomadas, como se indican en el punto 6, deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo para su transporte al laboratorio, de preferencia a una temperatura entre los 4 y 10°C, cuidando de no congelar las muestras.
- El periodo máximo que debe transcurrir entre la toma de muestra y el análisis es:

-Para análisis bacteriológico 6 horas.

-Para análisis físico-químico, el periodo depende de la preservación empleada para cada parámetro.

3.6.2.5. Identificación y control de muestras

Para la identificación de las muestras deben etiquetarse los frascos y envases con la siguiente información:

- Número de registro para identificar la muestra.
- Fecha y hora de muestreo.
- Para el control de la muestra debe llevarse un registro con los datos indicados en la etiqueta del frasco o envase.
- Identificación del punto o sitio de muestreo.
- Temperatura ambiente y temperatura del agua.
- Tipo de análisis a efectuar.
- Técnica de preservación empleada.
- Observaciones relativas a la toma de muestra.
- Nombre de la persona que realiza el muestreo.

3.6.3. Cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA)

Con los resultados de los análisis de laboratorio, se seleccionarán los parámetros requeridos para el cálculo del ICA. Luego, para cada parámetro, se determinará el factor de calidad correspondiente, enseguida se determinaran los factores de ponderación. Con el factor de calidad, el factor de ponderación y la ecuación (1) se determinara el índice ICA para cada muestreo realizado.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos tabulados para cada parámetro son referentes a diez muestras que serán analizadas para el desarrollo de la metodología del índice de calidad del agua (ICA).

Tabla VII. Datos de los parámetros analizados en cada muestra.

Fecha	Muestra	OD (%)	Coli. Fecales (NMP)	pH (uni)	DBO (mg/L)	Temperatura (°C)	Fosfatos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Turbiedad (NTU)	SDT (mg/L)
F1	M1	O1	CF1	pH1	DBO1	T1	P1	N1	Tb1	SDT1
F2	M2	O2	CF2	pH2	DBO2	T2	P2	N2	Tb2	SDT2
F3	M3	O3	CF3	pH3	DBO3	T3	P3	N3	Tb3	SDT3
F4	M4	O4	CF4	pH4	DBO4	T4	P4	N4	Tb4	SDT4
F5	M5	O5	CF5	pH5	DBO5	T5	P5	N5	Tb5	SDT5
F6	M6	O6	CF6	pH6	DBO6	T6	P6	N6	Tb6	SDT6
F7	M7	O7	CF7	pH7	DBO7	T7	P7	N7	Tb7	SDT7
F8	M8	O8	CF8	pH7	DBO8	T8	P8	N8	Tb8	SDT8

Fuente: elaboración propia

3.8. Análisis estadístico

Para controlar la influencia de la lluvia en época seca y época lluviosa, se aplicarán métodos estadísticos.

3.8.1. Medidas de dispersión

La desviación respecto a la media es la diferencia entre cada valor de la variable estadística y la media aritmética.

3.8.2. Varianza

La varianza es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística.

3.8.3. Desviación estándar

Es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

3.8.4. Robustez

La robustez de un método de estimación se refiere a su condición para obtener estimaciones insensibles ante posibles violaciones de algunos de los supuestos fijados al especificar un modelo, en particular, el relativo a la distribución admitida para la perturbación aleatoria.

4. RESULTADOS

A continuación se detalla la metodología de cálculo para el análisis del Índice de calidad del agua (ICA):

- **Paso 1:** Tabulación de análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos obtenidos en el laboratorio químico, para n muestras.

Tabla VIII. **Análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos**

Fecha	Muestra	OD (%)	Coli. Fecales (NMP)	pH (uni)	DBO (mg/L)	Temperatura (°C)	Fosfatos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Turbiedad (NTU)	SDT (mg/L)
28/09/2015	1	0,42	>16x10 ⁵	7,86	203,00	19,10	20,00	484,00	39,70	852
06/10/2015	2	5,27	>16x10 ⁵	7,35	13,00	18,87	59,60	1266,00	9,11	620
13/10/2016	3	2,41	>16x10 ⁵	7,58	121,00	19,92	95,00	1750,00	427,00	738
20/10/2016	4	5,8	>16x10 ⁵	7,49	63,00	17,94	26,00	748,00	19,60	631
19/01/2016	5	3,06	>16x10 ⁵	7,13	26,00	19,96	21,50	638,00	6,99	266
02/02/2016	6	5,48	>16x10 ⁶	6,86	9,00	18,45	47,00	880,00	4,17	281
09/02/2016	7	1,77	>16x10 ⁶	7,06	19,00	19,58	52,00	920,00	5,56	321
17/02/2016	8	1,83	>16x10 ⁵	7,11	47,00	17,29	28,80	206,00	16,99	468

Fuente: Laboratorio unificado de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".

- **Paso 2:** Calcular los subíndices de los nueve parámetros involucrados en el ICA, en función de su concentración, a partir de los ajustes polinómicos a las curvas de estandarización (ver figura 1-9) asociadas a cada parámetro, para n muestras.

Tabla IX. **Ajuste polinómico para subíndice de Porcentaje de Oxígeno Disuelto**

$Q_{OD} = 3,1615 \times 10^{-08} (OD\%)^5 - 1,0304 \times 10^{-05} (OD\%)^4 + 1,0076 \times 10^{-03} (OD\%)^3 - 2,7883 \times 10^{-02} (OD\%)^2 + 8,4068 \times 10^{-01} (OD\%) - 1,6120 \times 10^{-01}$
$R^2 = 0,9995$
<p>Donde Q_{OD}, es el subíndice del Oxígeno Disuelto y $(OD\%)$ es el oxígeno disuelto expresado como porcentaje de saturación.</p>
<p>Si el $OD\% > 140$ entonces el $OD\% = 50$</p>

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de $OD\%=0,42$ (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_{od} para la muestra uno (tabla XVIII):

$$Q_{OD} = 3,1615 \times 10^{-08} (0,42)^5 - 1,0304 \times 10^{-05} (0,42)^4 + 1,0076 \times 10^{-03} (0,42)^3 - 2,7883 \times 10^{-02} (0,42)^2 + 8,4068 \times 10^{-01} (0,42) - 1,6120 \times 10^{-01}$$

$$Q_{OD} = 0,19$$

Tabla X. **Ajuste polinómico para subíndice de Coliformes Fecales**

$\ln(Q_{Coli}) = -0,0152(\ln C)^2 - 0,1063(\ln C) + 4,5922$
$R^2 = 0,999$
<p>Donde Q_{Coli}, es el subíndice de coliformes Fecales y (C) es el valor de coliformes fecales como NMP.</p>
<p>Si $Coliformes Fecales > 10^5$ entonces $Q_{Coli} = 2$</p>

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de Coli. Fecales = $>16 \times 10^5$ NMP (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_{cf} para la muestra uno (tabla XVIII):

Debido a que el valor sobrepasa el límite de validez de cálculo del polinomio, el valor de $Q_{Coli} = 2,00$.

Tabla XI. **Ajuste polinómico para subíndice de pH**

• Para $pH \leq 7,5$
$Q_{pH} = -0,1789(pH)^5 + 3,7932(pH)^4 - 30,517(pH)^3 + 119,75(pH)^2 - 224,58(pH) + 159,46$
$R^2 = 0,9981$
• Para $pH > 7,5$
$Q_{pH} = -1,1142(pH)^4 + 44,5095(pH)^3 - 656,60(pH)^2 + 4215,34(pH) - 9840,14$
$R^2 = 1,0000$
Donde Q_{pH} , es el subíndice de pH y (pH) es el nivel de pH.
Si $pH < 2,0$ ó $pH > 12,0$ entonces $Q_{pH} = 0$

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de $pH=7,86$ (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_{pH} para la muestra uno (tabla XVIII):

$$Q_{pH} = -0,1789(7,86)^5 + 3,7932(7,86)^4 - 30,517(7,86)^3 + 119,75(7,86)^2 - 224,58(7,86) + 159,46 \quad Q_{pH} = 88,34$$

Tabla XII. **Ajuste polinómico para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

$Q_{OD} = 1,8677x10^{-04}(DBO)^4 - 1,6615x10^{-02}(DBO)^3 + 5,9636x10^{-01}(DBO)^2 - 1,1152x10^{+01}(DBO) + 1,0019x10^{+02}$
$R^2 = 0,9989$
Donde Q_{OD} , es el subíndice de DBO y (DBO) es la demanda bioquímica de oxígeno en mg/L.
Si $DBO > 30$ entonces $Q_{OD} = 2,0$

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de $DBO=13$ mg/L (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_{dbO} para la muestra dos (tabla XVIII):

$$Q_{DBO} = 1,8677x10^{-04}(13)^4 - 1,6615x10^{-02}(13)^3 + 5,9636x10^{-01}(13)^2 - 1,1152x10^{+01}(13) + 1,0019x10^{+02}$$

$$Q_{DBO} = 24,83$$

Tabla XIII. **Ajuste polinómico para subíndice de temperatura**

$Q_T = 1,9619x10^{-06}(\Delta T)^6 - 1,3964x10^{-04}(\Delta T)^5 + 2,5908x10^{-03}(\Delta T)^4 + 1,5398x10^{-02}(\Delta T)^3 - 6,7952x10^{-01}(\Delta T)^2 - 6,7204x10^{-01}(\Delta T) + 9,0392x10^{+01}$
$R^2 = 0,9972$
<p>Donde Q_T, es el subíndice de temperatura y (ΔT) es el cambio de temperatura en °C entre la temperatura a condiciones normales y la temperatura de medición.</p>

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de Temperatura=19,10°C (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_t para la muestra uno (tabla XVIII):

$$Q_t = 1,9619x10^{-06}(25 - 19,10)^6 - 1,3964x10^{-04}(25 - 19,10)^5 + 2,5908x10^{-03}(25 - 19,10)^4 + 1,5398x10^{-02}(25 - 19,10)^3 - 6,7952x10^{-01}(25 - 19,10)^2 - 6,7204x10^{-01}(25 - 19,10) + 9,0392x10^{+01}$$

$$Q_t = 68,16$$

Tabla XIV. **Ajuste polinómico para subíndice de Fosfatos**

$Q_p = 4,6732x10^{-03}(P)^6 - 1,6167x10^{-01}(P)^5 + 2,2059(P)^4 - 1,5050x10^{+01}(P)^3 + 5,3889x10^{+01}(P)^2 - 9,9893x10^{+01}(P) + 9,9831x10^{+01}$
$R^2 = 0,9994$
<p>Donde Q_p, es el subíndice de fosfatos y (P) es la concentración de fosfatos en mg/L</p>
<p>Si Fosfatos > 10,0 entonces $Q_p = 2,0$</p>

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de Fosfatos =20 mg/L (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_p para la muestra uno (tabla XVIII):

Debido a que el valor sobrepasa el límite de validez de cálculo del polinomio, el valor de $Q_p = 2,00$.

Tabla XV. **Ajuste polinómico para subíndice de nitratos**

$Q_N = 3,5603x10^{-09}(N)^6 - 1,21837x10^{-06}(N)^5 + 1,6238x10^{-04}(N)^4 - 1,06930x10^{-02}(N)^3 + 3,730x10^{-01}(N)^2 - 7,5210(N) + 1,0095x10^{+02}$
$R^2 = 0,9972$
Donde Q_N , es el subíndice de nitratos y (N) es la concentración de nitratos en mg/L
Si Nitratos > 100,0 entonces $Q_N = 1,0$

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de Nitratos=484 mg/L (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_n para la muestra uno (tabla XVIII):

Debido a que el valor sobrepasa el límite de validez de cálculo del polinomio, el valor de $Q_N = 1,00$.

Tabla XVI. **Ajuste polinómico para subíndice de turbiedad**

$Q_{Tb} = 1,8939x10^{-06}(Tb)^4 - 4,9942x10^{-04}(Tb)^3 + 4,9181x10^{-02}(Tb)^2 - 2,6284(Tb) + 9,8098x10^{+01}$
$R^2 = 0,9990$
Donde Q_{Tb} , es el subíndice de turbiedad y (Tb) es la turbiedad en mg/L
Si Turbiedad > 100,0 entonces $Q_{Tb} = 5,0$

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de Turbiedad = 39,7 NTU (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_{tb} para la muestra uno (tabla XVIII):

$$Q_{Tb} = 1,8939x10^{-06}(39,7)^4 - 4,9942x10^{-04}(39,7)^3 + 4,9181x10^{-02}(39,7)^2 - 2,6284(39,7) + 9,8098x10^{+01}$$

$$Q_{Tb} = 44,72$$

Tabla XVII. **Ajuste polinómico para subíndice de Sólidos Disueltos**

Totales

$Q_{SDT} = -4,4289 \times 10^{-09} (SDT)^4 + 4,650 \times 10^{-06} (SDT)^3 - 1,9591 \times 10^{-03} (SDT)^2 + 1,8973 \times 10^{-01} (SDT) + 8,0608 \times 10^{+01}$
$R^2 = 0,9977$
<p>Donde Q_{SDT}, es el subíndice de sólidos disueltos totales y (SDT) es la cantidad de sólidos disueltos totales en mg/L.</p>
<p>Si $SDT > 500,0$ entonces $Q_{SDT} = 20,0$</p>

Fuente: elaboración propia.

Tomando como muestra de cálculo el valor de $SDT = 852$ mg/L (tabla VIII), se obtiene el subíndice Q_{sdt} para la muestra uno (tabla XVIII):

$$Q_{SDT} = -4,4289 \times 10^{-09} (852)^4 + 4,650 \times 10^{-06} (852)^3 - 1,9591 \times 10^{-03} (852)^2 + 1,8973 \times 10^{-01} (852) + 8,0608 \times 10^{+01}$$

$$Q_{SDT} = 20,00$$

A continuación se muestran los valores obtenidos de los subíndices de los parámetros del ICA, para los ocho muestreos realizados, calculados a partir de los ajustes polinómicos antes mostrados.

Tabla XVIII. **Subíndices de los parámetros obtenidos a partir de los ajustes polinómicos para cada muestreo realizado.**

Muestra	Q_{od}	Q_{cf}	Q_{pH}	Q_{dbo}	Q_t	Q_p	Q_n	Q_{Tb}	Q_{sdt}
1	0,19	2,00	88,34	2,00	68,16	2,00	1,00	44,72	20,00
2	3,63	2,00	93,45	24,83	66,84	2,00	1,00	77,87	29,00
3	1,72	2,00	92,55	2,00	72,75	2,00	1,00	5,00	29,00
4	3,96	2,00	93,01	2,00	61,43	2,00	1,00	61,99	29,00
5	2,18	2,00	91,09	6,70	72,97	2,00	1,00	81,96	57,80
6	3,77	2,00	79,05	37,24	64,40	2,00	1,00	87,96	54,79
7	1,24	2,00	89,80	13,97	70,87	2,00	1,00	84,92	46,42
8	1,29	2,00	90,74	2,00	57,64	2,00	1,00	65,35	4,49

Fuente: elaboración propia.

- **Paso 3:** Cálculo de Índice de Calidad de Agua (ICA) haciendo uso de la técnica del promedio geométrico ponderado con la asignación de pesos específicos.

$$ICA = \left(\prod_{i=1}^n Qi^{W_i} \right)$$

Donde, π representa la multiplicativa de los subíndices elevados a su factor peso correspondiente de los nueve parámetros involucrados en el ICA.

Tomando como muestra de cálculo los subíndices obtenidos de la muestra uno (Tabla XI), se calculó el primer valor del ICA:

$$ICA = (0,19)^{0,17} * (2,00)^{0,15} * (88,34)^{0,12} * (2,00)^{0,10} * (68,16)^{0,10} * (2,00)^{0,10} \\ * (1,00)^{0,10} * (44,72)^{0,08} * (20,00)^{0,08} \\ ICA = 4,311$$

A continuación se muestran los valores del ICA para los ocho muestreos realizados, calculados por medio de la técnica del promedio geométrico ponderado:

Tabla XIX. **Valores de ICA para temporada seca y temporada lluviosa.**

Muestra	ICA
1	4,311
2	9,938
3	5,499
4	7,629
5	8,528
6	10,802
7	8,185
8	5,402

Fuente: elaboración propia.

Paso 4: Clasificación del recurso hídrico en base a los valores obtenidos de ICA.

Tabla XX. **Clasificación de la calidad del agua.**

Muestreo	ICA	Calidad
1	4,311	Muy Mala
2	9,938	Muy Mala
3	5,499	Muy Mala
4	7,629	Muy Mala
5	8,528	Muy Mala
6	10,802	Muy Mala
7	8,185	Muy Mala
8	5,402	Muy Mala

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5: Interpretación de los valores del Índice de calidad de agua para el recurso hídrico analizado.

Tabla XXI. **Interpretación de valores de ICA**

ICA	Categoría	Descripción
0-25	Muy Mala	Las aguas pueden solamente apoyar un número limitado de las formas acuáticas de la vida, presentan problemas abundantes y, normalmente, no sería considerado aceptable para las actividades que implican el contacto directo con ella, tal como natación.

Fuente: elaboración propia con base en la tabla III.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Procedimiento para cálculo de Índice de Calidad de Agua (ICA)

La metodología implementada para el cálculo del Índice de calidad de agua (ICA) para el monitoreo ambiental en la ciudad de Guatemala, se ha desarrollado en cinco pasos vitales los cuales deben seguirse en el orden planteado, sin alterar ninguna de las condiciones establecidas en cada paso:

1. Tabulación de datos
2. Cálculo de subíndices
3. Cálculo de valores de ICA
4. Clasificación de recurso hídrico según valores de ICA
5. Interpretación del ICA

5.2. Normalización del método

Para el primer paso, se puede observar en la tabla VIII, la tabulación de los de los valores de los parámetros del ICA, los cuales se obtuvieron a partir de las muestras captadas. Dichas muestras fueron analizadas en el laboratorio “Dra. Alba Tabarini Molina”. Es importante mencionar que únicamente se tabularon los datos para ocho muestreos y no diez como se había planteado en el diseño de investigación, debido a que el grado de contaminación que presentaban las dos muestras faltantes fue de alto nivel, lo cual superaba los límites de detección de las técnicas analíticas empleadas en el laboratorio.

Es importante mencionar que la tabla VIII, es la plantilla que deberá utilizarse para cualquier tabulación de datos realizada en los programas de monitoreo ambiental que realice la dirección de medio ambiente de la Municipalidad de Guatemala, tomando en consideración el orden y normalización del método.

En el paso dos, se muestra el orden en que deben ser calculados los subíndices de los parámetros del ICA, y los ajustes polinómicos experimentales que se utilizarán en el método, tomando muy en cuenta las condiciones que se plantean en cada tabla. Por ejemplo, en el caso del porcentaje de oxígeno disuelto, primer subíndice a calcular, se puede observar (tabla IX) que si los valores obtenidos en el laboratorio son $>140\%$ se tomará un valor de OD $\%=50$, debido a que un valor mayor se excedería en el rango de validez al que se ajusta el polinomio correspondiente.

En las tablas X a la XVII, ocurre de forma similar, se muestran los límites permisibles para la utilización de los ajustes polinómicos para los subíndices de cada parámetro correspondiente. Caso peculiar para el pH, ya que el cálculo de este subíndice comprende dos ajustes polinómicos, ya sea el caso que se tengan valores de $\leq 7,5$ ó $> 7,5$. Cabe resaltar que cada ajuste polinómico presente una correlación cercana a uno, lo cual favorece a la eficacia de la metodología para el cálculo del ICA.

En la tabla XVIII, se muestran los valores obtenidos de los subíndices de cada parámetro para las ocho muestras analizadas. Los cuales son valores adimensionales que a partir del uso de los ajustes polinómicos se eliminan sus unidades correspondientes, lo cual es necesario para proceder al cálculo del ICA. Es importante indicar que el formato que tiene la tabla es el que debe utilizarse para la tabulación de valores de los subíndices y en el mismo orden, sin alterar su uso.

En el paso tres, netamente se procede al cálculo directo del ICA, en donde la tabla XIX, muestra los valores obtenidos, los cuales se calcularon a partir del promedio geométrico ponderado, mediante la multiplicativa de los subíndices elevados al factor peso correspondiente (tabla I). Técnica la cual es eficaz, ya que los valores que se observan, se acercan a la condición real en la que se encuentra el recurso hídrico analizado, comprobando estadísticamente la precisión entre los datos.

Posterior a esto se muestra en el paso cuatro y cinco, la clasificación e interpretación del recurso hídrico analizado, en donde en la tabla XX, se puede observar que tanto para la época lluviosa y época seca, la clasificación es “Muy Mala”, por ende la interpretación de ICA, según el rango de (0-25) es que no hay posibilidad de vida acuática, en la cual no debería existir contacto humano con dichas aguas (tabla XXI). Por lo que estos últimos dos pasos son de suma importancia ya que proveerán una perspectiva adecuada para la toma de decisiones.

En conclusión, los cinco pasos planteados, definen la normalización de la metodología de cálculo para el Índice de calidad de agua en el monitoreo ambiental de la Ciudad de Guatemala.

CONCLUSIONES

1. La adaptación de la norma oficial mexicana NOM-014-SSA1-1993, se ajusta a los programas de monitoreo ambiental realizados en la Ciudad de Guatemala, garantizando en la recolección de muestras el orden, control y preservación de las mismas, evitando cualquier alteración que pueda influir en el resultado de los análisis.
2. La técnica del promedio geométrico ponderado y la utilización de ajustes polinómicos, en el procedimiento de cálculo del ICA, dan validez y aceptación al método, mediante el análisis estadístico en la precisión de los datos.
3. La normalización del método para el cálculo del ICA, facilita a la dirección de Medio Ambiente, tomar decisiones en cuanto a tratamientos y resguardo de aguas superficiales, debido a la practicidad, facilidad y sencillez en la aplicación del método.

RECOMENDACIONES

1. Percatarse que la técnica planteada sea utilizada únicamente en los programas de monitoreo ambiental, de la municipalidad de Guatemala, en la recolección de muestras de fuentes superficiales. Otras ubicaciones geográficas deberán ser adaptadas a sus condiciones ambientales propias.
2. Realizar análisis estadístico sobre los resultados obtenidos de ICA, para verificar las posibles desviaciones en la precisión de los datos, ya sea que se trabaje en época lluviosa o época seca.
3. Desarrollar un software que facilite el ingreso y recopilación de datos, así como el cálculo del índice de calidad de agua (ICA), agilizando la obtención de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALDANA, Mónica. ZACARIAS, Elvis. *Índice de calidad de agua del río Cucabaj ubicado en el municipio de Santa Cruz del Quiché, Quiché y la influencia en los costos del tratamiento de potabilización*. Centro Universitario de Quiché, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2014. 34p.
2. ARRIOLA, Ana. *Índices de Calidad de agua en el Río Pinula, cuenca del lago de Amatitlán*. Trabajo de graduación de la escuela de estudios del mar y acuicultura. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2012. 56p.
3. BALL, R.; Church, R., *Water quality indexing and scoring.*, Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 106, EE4, 1980, pp. 757-771.
4. BEHAR G, Roberto. *Análisis y valoración del Índice de Calidad del Agua (ICA) de la NSF: Caso Ríos Cali y Meléndez*. Artículo Científico. Universidad del Valle, Colombia, 1997. 37p.
5. FERNÁNDEZ, N.; Solano, F., *Índices de calidad y de contaminación del agua.*, Universidad de Pamplona, 2005.
6. RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua*. Trabajo de graduación de ingeniería sanitaria. Universidad de San Carlos. 2008. 162p.

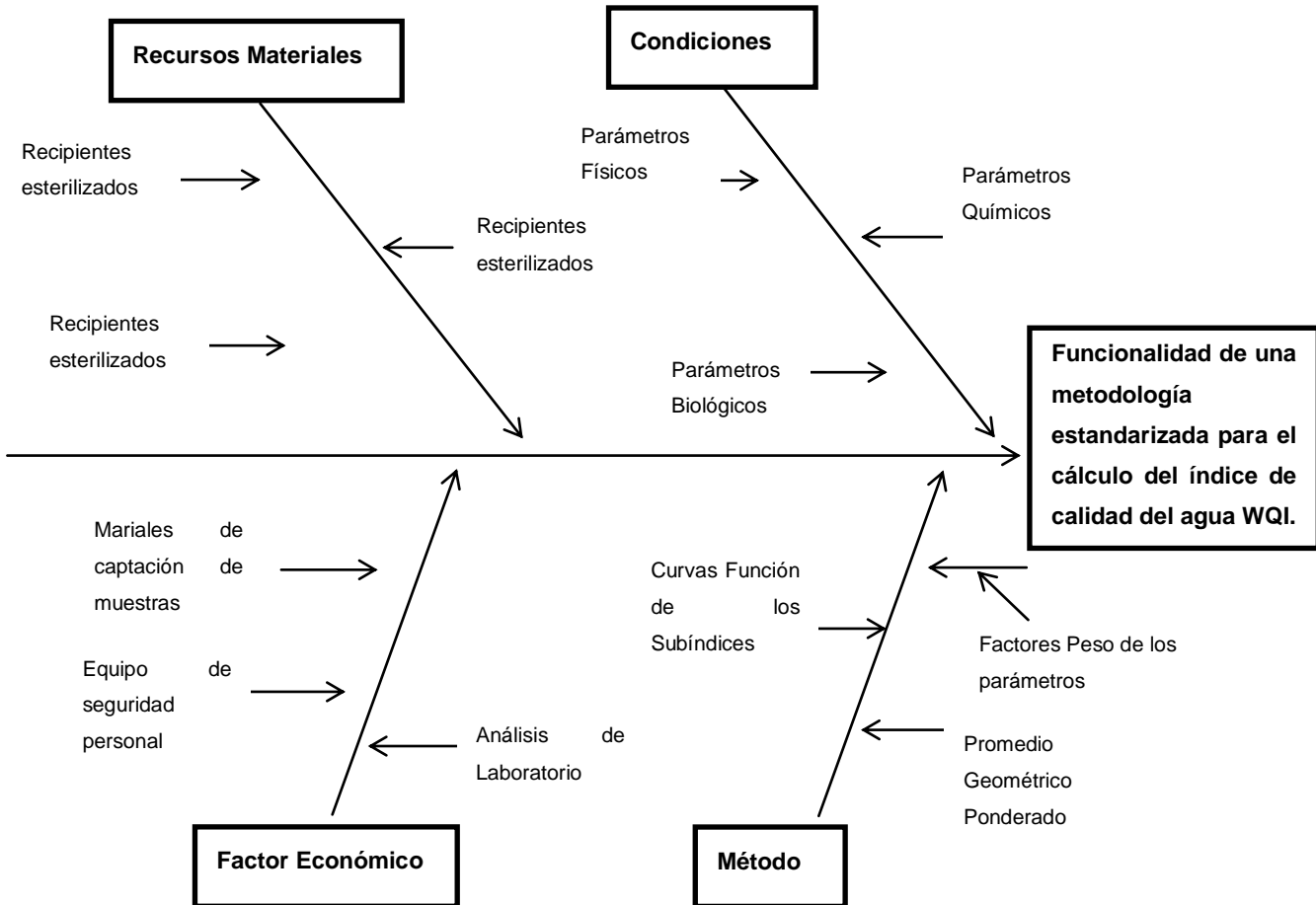
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos.**

Carrera	Campos de Conocimiento	Área	Curso	Tema Específico	Temática a resolver
Ingeniería Química	Ingeniería y Tecnología	Química	*Análisis Cualitativo *Análisis Cuantitativo *Análisis Instrumental *Química Ambiental	pH Solubilidad Valoración de métodos Impacto Ambiental	Manejo de distintos parámetros físicos, químicos y biológicos. Interpretación de análisis.
		Área de Especialización	*Microbiología	Tipos de Bacterias Grupos que conforman los coliformes.	Métodos de determinación de presencia de microorganismos y medios de reproducción.
		Área de Ciencias Básicas y Complementarias	*Mate básica 1	Ecuaciones algebraicas. Graficas Polinomiales	Cálculo de medias aritméticas. Interpretación de gráficas.
			*Estadística 1	*Estadística Descriptiva *Variables Aleatorias	Proporcionar elementos matemáticos que expliquen fenómenos.
*Calidad del Agua	*Índices de Calidad de agua. *Métodos de preservación. *Plan de Monitoreo de Ambiental.	Aplicación de metodología e interpretación de datos sobre la calidad del agua. Puntos de muestreo y captación de los mismos.			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa y/o árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.