



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

**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS Y UN
ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, CIUDAD
DE GUATEMALA**

Ivonne Liere Quevedo

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada

Guatemala, septiembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES
FISICOQUÍMICOS Y UN ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN
EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

IVONNE LIERE QUEVEDO

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2017

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
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:

DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS Y UN ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 de noviembre de 2015.

Ivonne Liere Quevedo

Guatemala, 24 de abril de 2017

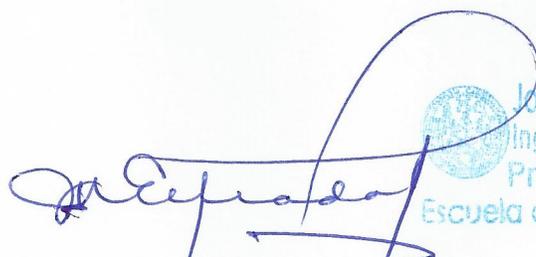
Ingeniero
Carlos Salvador Wong
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Trabajo de Graduación titulado "*DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS Y UN ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, CIUDAD DE GUATEMALA*", de la estudiante de Ingeniería Ambiental, Ivonne Liere Quevedo quien se identifica con DPI 2178989390101 y carné universitario número 2012-13106.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Asesor

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



Guatemala, 02 de agosto de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.028.2017.

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 **088-2015** 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 la estudiante universitaria: **Ivonne Liere Quevedo**.
Identificada con número de carné: **2012-13106**.
Previo a optar al título de **INGENIERA AMBIENTAL**.

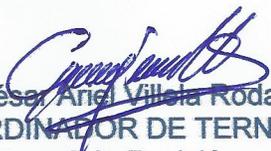
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS Y UN ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, 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. César Ariel Villola Rodas
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.049.2017

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** de la carrera de **Ingeniería Ambiental** de la estudiante, **IVONNE LIERE QUEVEDO** titulado: **"DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS Y UN ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, 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, septiembre 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura e Ingeniería



Universidad de San Carlos
de Guatemala

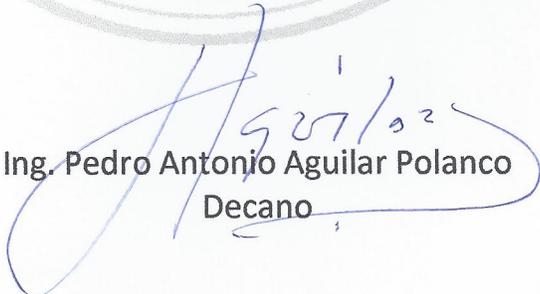


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 442.2017

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: **DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS Y UN ÍNDICE BIOLÓGICO DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO TEOCINTE, ZONA 25, CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Ivonne Liere Quevedo**, 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, septiembre de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la fortaleza necesaria para llegar hasta la cima.
- Mis padres** Emérita Quevedo y Harald Liere por brindarme la vida que me dieron. Si me dieran a elegir, sin dudarlo, los elegiría a ustedes otra vez.
- Mis hermanas** Melanie Liere y Marie Andrée Liere, una para todas y todas para una, por ser no solo mis hermanas, también, mis guías, mis consejeras, mi soporte, mis mejores amigas.
- Mi sobrina** Isabella Valle Liere, cuando naciste tú a los árboles les nacieron frutas. Llenaste mi vida de alegría, ruido y colores.
- Mi novio** Alejandro Echeverría, andábamos sin buscarnos, pero sabiendo que andábamos para encontrarnos. Por estar a mi lado en esta montaña rusa. Siempre fue, es y será un amor conocerte.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi alma mater y darme la oportunidad de formarme académicamente.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme todos los conocimientos necesarios para crecer profesionalmente.

Mis amigas

Nancy García, Kelly Aguilar, Luz González, Natali Pérez, mis chicas súper poderosas. Gracias por hacerme reír, por alentarme, por estar ahí.

Nancy García

Somos el dúo dinámico; gracias por acompañarme en todas las experiencias, desde el bautizo hasta este momento.

Luz González

Gracias por ser el ente luminoso de mi vida, por tus consejos, por tu paciencia, por tu amistad.

Mis amigos

Antonio Camacho, Eduardo Zapón, Eder García, Estuardo Marín, Carlos Andrés Pérez, Carlos Chicojay, Fernando Castillo, Cristopher Hernández, Jorge Ruiz, porque de cada uno de ustedes aprendí algo, gracias por su amistad.

Susy Guerra

Por estar siempre en las buenas y en las malas, por adoptarme como tu hermana y por darme tus consejos en momentos clave.

Ing. Jorge Mario Estrada

Por brindarme su tiempo, paciencia y conocimientos en este estudio de investigación.

Lic. José Ortíz

Por tu valioso aporte a mi estudio de investigación.

CEMA

Por darme la oportunidad de realizar parte de la fase experimental del estudio en sus instalaciones.

Laboratorio Dra.

Alba Tabarini Molina

Por ayudarme con la fase experimental de mi estudio de investigación.

Municipalidad de

Guatemala

Por el apoyo necesario para realizar este estudio de investigación.

2.4.2.	Índices biológicos	26
2.4.2.1.	Índices de diversidad.....	26
2.4.2.2.	Índices bióticos.....	28
2.5.	Correlación de Pearson.....	32
2.6.	Distribución F de Fisher	33
2.7.	Características del río Teocinte.....	34
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
3.1.	Variables	35
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	36
3.3.	Recursos humanos disponibles	36
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	37
3.5.	Técnica cuantitativa o cualitativa.....	39
3.6.	Recolección de la información en campo.....	39
3.7.	Análisis estadístico.....	41
4.	RESULTADOS.....	43
4.1.	Puntos de muestreo	43
4.2.	Datos obtenidos	45
4.2.1.	Época lluviosa	45
4.2.2.	Época seca.....	51
4.3.	Muestra de cálculo	58
4.3.1.	Cálculo del índice BMWP	58
4.3.2.	Cálculo del ICOMI	58
4.3.3.	Cálculo del ISQA	59
4.3.4.	Cálculo de la prueba F de Fisher	61
4.3.5.	Cálculo de la correlación lineal.....	64
4.4.	Datos calculados.....	65

4.4.1.	Época lluviosa.....	65
4.4.2.	Época seca.....	69
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	75
	CONCLUSIONES	81
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICES	93
	ANEXOS	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Distintos tipos de formas de los macroinvertebrados	11
2.	Cantidad de patas en los macroinvertebrados	11
3.	Subcuenca del río Teocinte.....	34
4.	Equipo para la recolección de muestras, parte 1	38
5.	Equipo para la recolección de muestras, parte 2	38
6.	Mapa de ubicación de puntos de muestreo.....	44
7.	Distribución Fc	63
8.	Correlación ISQA-ICOMI.....	67
9.	Correlación BMWP-ISQA	68
10.	Correlación BMWP-ICOMI	68
11.	Correlación ISQA-ICOMI.....	71
12.	Correlación BMWP-ISQA	72
13.	Correlación BMWP-ICOMI	72

TABLAS

I.	Valoración según la sensibilidad de la contaminación de los macroinvertebrados.....	12
II.	Clasificación del ICA propuesto por Brown	18
III.	Pesos relativos para cada parámetro del ICA	19
IV.	Significado de los valores del ISQA	21
V.	Clasificación de los índices de contaminación	22
VI.	Puntajes para las familias identificadas en Costa Rica	29

VII.	Clasificación de la calidad del agua según el Índice BMWP-CR	30
VIII.	Niveles de calidad del agua según índice EPT	32
IX.	Variables independientes, dependientes y respuesta	35
X.	Ubicación de puntos de muestreo.....	43
XI.	Demanda química orgánica (mg/l)	45
XII.	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	45
XIII.	Oxígeno disuelto (mg/l)	46
XIV.	Conductividad (μ S/cm).....	46
XV.	Temperatura ($^{\circ}$ C).....	46
XVI.	Dureza (mg/l)	47
XVII.	Alcalinidad (mg/l)	47
XVIII.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el primer muestreo (24/8/2016).....	47
XIX.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el segundo muestreo (21/9/2016).....	48
XX.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el tercer muestreo (28/9/2016).....	48
XXI.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el cuarto muestreo (5/10/2016).....	49
XXII.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el quinto muestreo (12/10/2016).....	50
XXIII.	Demanda química orgánica (mg/l)	51
XXIV.	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	51
XXV.	Oxígeno disuelto (mg/l)	51
XXVI.	Conductividad (μ S/cm).....	52
XXVII.	Temperatura ($^{\circ}$ C).....	52
XXVIII.	Alcalinidad (mg/l)	53
XXIX.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el primer muestreo (25/1/2017).....	53

XXX.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el segundo muestreo (2/2/2017)	54
XXXI.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el tercer muestreo (7/2/2017)	55
XXXII.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el cuarto muestreo (15/2/2017)	56
XXXIII.	Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el quinto muestreo (22/2/2017)	57
XXXIV.	Cálculo de Fisher, paso 1	62
XXXV.	Cálculo de Fisher, paso 2	62
XXXVI.	Resultados índice BMWP	65
XXXVII.	Resultados ICOMI	65
XXXVIII.	Resultados ISQA	65
XXXIX.	Análisis de varianza y F de Fisher del ICOMI	66
XL.	Análisis de varianza y F de Fisher del ISQA	66
XLI.	Análisis de varianza y F de Fisher del BMWP	66
XLII.	Cálculo de la correlación lineal	67
XLIII.	Ecuaciones de las correlaciones entre cada índice	69
XLIV.	Resultados índice BMWP	69
XLV.	Resultados ICOMI	69
XLVI.	Resultados ISQA	70
XLVII.	Análisis de varianza y F de Fisher del ICOMI	70
XLVIII.	Análisis de varianza y F de Fisher del ISQA	70
XLIX.	Análisis de varianza y F de Fisher del BMWP	71
L.	Cálculo de la correlación lineal	71
LI.	Ecuaciones de las correlaciones entre cada índice	73

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius o centígrados
μS/cm	Microsiemens por centímetro
mg/l	Miligramos por litro

GLOSARIO

Agente patógeno	Agentes infecciosos que pueden provocar enfermedades a su huésped. Se refieren a los microorganismos como los virus, bacterias y hongos. Estos agentes pueden perturbar la fisiología normal de plantas, animales y humano.
Alcalinidad	La capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua.
Antropogénico	De origen humano o derivado de la actividad del hombre.
Bentos	Comunidad formada por materia inerte y organismos que habitan en el fondo de los ecosistemas acuáticos.
Bioindicador	Atributos de los sistemas biológicos que se emplean para descifrar factores de su ambiente. Son organismos o comunidades de estos que a través de su presencia indican el nivel de preservación del hábitat.

BMWP	Por sus siglas en inglés <i>biological monitoring working party</i> , índice biológico donde se requieren identificaciones a nivel de familia de macroinvertebrados modificado y adaptado a las características geomorfológicas y climáticas de distintos lugares (ejemplo, BMWP-CR, adaptado a Costa Rica).
CE	La conductividad eléctrica de una disolución puede definirse como la aptitud para transmitir la corriente eléctrica; dependerá, además del voltaje aplicado, el tipo, el número, la carga y la movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio donde han de moverse.
DQO	La demanda química de oxígeno determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.
Dureza	Concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio.
Eutrofización	Proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la

mineralización total, de manera que produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas.

ICOMI

Índice de contaminación por mineralización, utiliza la conductividad como reflejo del conjunto de sólidos disueltos, dureza por cuanto recoge los cationes calcio y magnesio, y alcalinidad porque hace lo propio con los aniones carbonatos y bicarbonatos.

ISQA

Por sus siglas en inglés *simplified water quality index*, el índice simplificado de calidad del agua proporciona una idea rápida e de la calidad. Se obtiene a partir de una sencilla fórmula que combina 5 parámetros fisicoquímicos.

Lixiviación

Es un proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado produciéndose la disolución de uno de los componentes del sólido.

LMA

Límite máximo aceptable, es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual estas características son percibidas por los consumidores desde el punto de vista sensorial pero sin que implique un daño a la salud del consumidor.

LMP	Límite máximo permisible, es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual el agua no es adecuada para consumo humano.
OD	Oxígeno disuelto presente en el agua.
Palatabilidad	Cualidad de ser grato al paladar.
SST	Sólidos suspendidos totales, el residuo no filtrable de una muestra de agua natural, residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103 °C -105 °C hasta peso constante.

RESUMEN

Se trabajó en el río Teocinte ubicado en la zona 25 de la ciudad de Guatemala. En este río se extrajeron muestras de tres puntos: en la parte alta, parte media y en la parte baja; para poder determinar la calidad en estas partes del río y observar el comportamiento de la calidad del agua conforme el agua avanza, la altura cambia y las condiciones del lugar se modifican. Esto se realizó por medio de dos índices fisicoquímicos (uno de calidad y uno de contaminación) y uno biológico (biótico). Los índices fisicoquímicos que se calcularon son:

- El índice simplificado de calidad del agua (ISQA, por sus siglas en inglés); para calcularlo se obtuvieron de las muestras: temperatura del agua, DQO, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, conductividad.
- El índice de contaminación por mineralización (ICOMI), para este fue necesario obtener: la conductividad, dureza y la alcalinidad.

El índice biótico que se calculó es el BMWP (*biological monitoring working party*, por sus siglas en inglés). Para este índice se utilizó la tabla de puntuación de éstas familias de macroinvertebrados, en donde se le asigna un valor del 1 al 10 a cada una (siendo 1 tolerante y 10 intolerante).

Para finalizar el estudio, se realizó una comparación entre cada índice, determinando que existe una correlación polinomial de grado dos entre ellos.

OBJETIVOS

General

Determinar la correlación entre dos índices fisicoquímicos y un índice biológico de calidad del agua en el río Teocinte, zona 25, ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Determinar el índice de contaminación por mineralización (ICOMI) en tres puntos del río Teocinte.
2. Determinar el índice simplificado de calidad del agua (ISQA) en tres puntos del río Teocinte.
3. Calcular el índice biótico BMWP (*biological monitoring working party*) en tres puntos del río Teocinte.
4. Determinar la correlación estadística existente entre el ICOMI y el ISQA.
5. Determinar la correlación estadística existente entre el índice biológico BMWP (*biological monitoring working party*) y el ISQA.
6. Determinar la correlación estadística existente entre el índice biológico BMWP y el ICOMI.

HIPÓTESIS

Hipótesis alternativa

Existe una correlación lineal entre cada índice fisicoquímico (ISQA e ICOMI) y entre el índice biótico (BMWP), que explique el desenvolvimiento de los macroinvertebrados bentónicos con respecto a la calidad fisicoquímica en la parte alta, media y baja del río Teocinte.

Hipótesis nula

No existe una correlación lineal entre cada índice fisicoquímico (ISQA e ICOMI) y entre el índice biótico (BMWP), que explique el desenvolvimiento de los macroinvertebrados bentónicos con respecto a la calidad fisicoquímica en la parte alta, media y baja del río Teocinte.

INTRODUCCIÓN

La contaminación hídrica es uno de los problemas más grandes que existen en el mundo, ya que debido a la industrialización y al mal uso de este recurso se han ido deteriorando los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos). Esta contaminación proviene de diversas fuentes: domésticas, industriales, agrícolas, en su mayoría actividades antropogénicas. Cada una afecta de distinta manera al río y al ecosistema en sí, que alteran la vida de los seres que lo habitan además, a las personas; sus principales contaminantes son los agentes patógenos, sustancias químicas (orgánicas e inorgánicas), el aumento de nutrientes (eutrofización), etc. Por estas razones, es necesario realizar estudios de la calidad del agua.

Existen diversas formas de verificar la calidad del agua, una de estas es el cálculo de los índices de calidad del agua: los índices fisicoquímicos y los índices biológicos. Los índices fisicoquímicos se basan en analizar los parámetros físicos u organolépticos y los parámetros químicos, de éstos índices existen dos divisiones: índices fisicoquímicos de calidad; en estos se obtiene un valor adimensional entre 1 y 100 de manera que el cuerpo de agua que obtenga un valor cercano a 100 tiene una excelente calidad y cercano a 1 tiene baja calidad.

Entre estos índices están: el índice simplificado de calidad del agua, índice automático de calidad del agua y el índice de calidad del agua; los índices fisicoquímicos de contaminación, miden el nivel de contaminación que tiene el cuerpo de agua, el resultado se da entre 0 (baja contaminación) y 1 (alta contaminación). Entre estos índices se encuentran: el índice de contaminación

por mineralización, índice de contaminación por materia orgánica, índice de contaminación por sólidos suspendidos e índice de contaminación trófica.

Los índices biológicos se basan en analizar determinadas comunidades acuáticas; para verificar la calidad del cuerpo de agua se observa si existe o no una de estas. Existen tres divisiones de estos índices: los índices de diversidad, miden la abundancia y biodiversidad de las especies en un lugar específico. Entre estos índices están: el de Shannon-Wiener, Simpson-Gini, McIntosh y Berger-Parker; los índices bióticos se basan en un lugar y tipo de contaminación específica, valoran a los macroinvertebrados de 1 (baja sensibilidad a la contaminación) a 10 (alta sensibilidad a la contaminación). Se dividen entre: el índice BMWP (por sus siglas en inglés: *biological monitoring working party*), índice biótico de Trent (TBI), índice de Chandler e índice EPT (Ephemeroptera, plecoptera trichoptera).

En el presente trabajo se calcularon dos índices fisicoquímicos: el ICOMI que está basado en el análisis de la conductividad, la dureza y la alcalinidad; el ISQA el cual se basa en los siguientes parámetros: temperatura, DQO (demanda química de oxígeno), sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y conductividad; además, se calculó el índice BMWP, basado en la existencia de determinadas familias de macroinvertebrados asignándoles un valor conforme la tolerancia a la contaminación de cada una.

Debido a que en estudios anteriores existen los cálculos de estos índices en distintos cuerpos de agua, se decidió realizar una pequeña variante en donde se calculó la correlación entre cada uno de los índices para verificar si existe relación entre las actividades de los macroinvertebrados bentónicos con respecto a la calidad fisicoquímica del agua; además de verificar la relación existente entre ambos índices fisicoquímicos.

Se realizó el estudio en el río Teocinte, para observar el comportamiento de los índices en la parte alta, media y baja del lugar.

1. ANTECEDENTES

En el año 2006, Oswaldo Martínez determinó la calidad fisicoquímica en el canal de Chiquimulilla, en la reserva natural de usos múltiples, en Monterrico. La calidad del agua no fue determinada por ningún índice fisicoquímico, sino solo por sus parámetros; además, no se presentó la determinación de un índice biótico ni su correlación con índices fisicoquímicos.

En el año 2006 Ricardo Figueroa, Alejandro Palma, Víctor Ruiz Y Xavier Niell realizaron un análisis comparativo de índices bióticos utilizados en la evaluación de la calidad de las aguas en un río mediterráneo de Chile: río Chillán, VIII región. La calidad del agua no fue determinada por ningún índice fisicoquímico, sino solo por distintos índices bióticos (El presente estudio realiza una adaptación de índices bióticos (IBE, BMWP, IBF y SIGNAL); no se presentó la correlación estadística con los índices sino solo su comparación.

En el año 2006, Mario Alberto Jiménez y María Victoria Vélez realizaron el *Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial* en donde compararon el índice de calidad del agua (WQI, por sus siglas en inglés) con los cuatro índices de contaminación (ICOMI, ICOTRO, ICOMO, ICOSUS) y una caracterización general de la calidad de las aguas superficiales de la cuenca de la quebrada Doña María localizada en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), Colombia. No se presentó ningún índice biológico, tampoco la correlación estadística con los índices.

En el año 2008, Irene Franco determinó la calidad del agua en el complejo de humedales marino-costeros en Iztapa, Escuintla, La Candelaria, Taxisco, y Santa Rosa, Guatemala. En este trabajo, al igual que el de Martínez, se determinó la calidad del agua por medio de los parámetros fisicoquímicos y no realizó una determinación de algún índice en general, ni la correlación entre estos.

En el año 2008, Jorge Rivera Méndez determinó la calidad del agua en la parte alta de la cuenca del río Naranjo, en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango. La calidad se determinó por medio de dos índices fisicoquímicos, el WQI (por sus siglas en inglés *water quality index*, desarrollado por la NFS de los EE. UU) y el índice simplificado de la calidad del agua (ISQA). En este estudio se determinaron coeficientes cinéticos de autodepuración del agua y la carga contaminante; no se realizó el cálculo del ICOMI (índice de contaminación por mineralización), un índice biótico ni la correlación entre estos.

En el año 2012, Ana Isabel Arriola de León determinó el índice de calidad del agua en el río Pínula, en la cuenca del lago de Amatitlán. Los índices que se determinaron fueron: el índice de calidad de agua para el Salvador –ICA-SV; índice biológico a nivel de familia para El Salvador –IBF-SV; *Biological Monitoring Working Party* para Costa Rica –BMWP-CR; y el % Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera -%EPT. No se determinaron los índices fisicoquímicos (ISQA e ICOMI) y no existe la correlación entre los índices.

En el año 2013, Esteban Acuña determinó la calidad del agua mediante índices bióticos en la subcuenca del río Quiscab, del departamento de Sololá; pero no se presentó la determinación de los índices fisicoquímicos y su correlación con el índice biótico.

2. MARCO TEÓRICO

La calidad del agua es importante en el medio ambiente ya que afecta directamente el entorno donde se encuentra. Para comprender este tema se necesitan los siguientes conceptos básicos:

2.1. Calidad del agua

Esta se refiere al estado en que se encuentra la parte física, química y biológica ya sea en el estado natural o si ha sido afectada por acciones antropogénicas. El agua se considera de calidad si se le da algún uso y no se obtiene ningún daño. Para el consumo humano, el agua no debe tener microorganismos patógenos o peligrosos que afecten de alguna manera a este o al entorno en donde se encuentre; además sus características organolépticas deben ser aceptables. En un cuerpo de agua es importante conocer la historia y la fuente del agua que contiene, ya que de ello depende la calidad del mismo.

En el 2011, la ONU determinó que si no existiera la actividad antropogénica, la calidad del agua la determinarían la erosión de los minerales, la evapotranspiración en los procesos de la atmósfera, la sedimentación de los lodos y las sales, los nutrientes del suelo, los procesos biológicos en el medio acuático y el proceso de lixiviación natural de la materia orgánica.

2.2. Características del agua

Son los parámetros que contiene el agua para verificar que tan pura o contaminada se encuentre; estos son: físicos, químicos y biológicos.

2.2.1. Características físicas

También llamadas organolépticas, son las que se pueden percibir por medio de los sentidos. Además, son aquellas que tienen incidencia en las características estéticas del agua. Entre ellas están el color, el olor, el sabor, la temperatura, etc.

- Temperatura: es uno de los parámetros más importantes, determina el calor en el agua. Afecta la viscosidad y la velocidad de las reacciones químicas en el agua. Este parámetro interviene en los procesos de tratamiento del agua.
- Sólidos sedimentables: son los que se encuentran en el fondo de un recipiente cónico (como el cono de Imhoff).
- Sólidos totales: estos incluyen los sólidos disueltos, suspendidos y sedimentables del agua.
 - Sólidos disueltos: Se les conoce por sus siglas en inglés TDS (*total dissolved solids*) y es la suma total de todos los minerales, los metales y los iones que se encuentran disueltos en el agua.
 - Sólidos suspendidos: se determinan restando los sólidos disueltos de los totales.
- Turbiedad: también conocida como turbidez; es la reducción de la transparencia del agua creada por toda aquella materia que se encuentra sin disolver.

2.2.2. Características químicas

Según, estos se dividen en dos: los indicadores y las sustancias químicas.

Los indicadores son todos aquellos que sus concentraciones son la interacción con otras sustancias:

- pH: potencial de hidrógeno, es la medida de acidez o la alcalinidad de la solución acuosa; ésta afecta los usos del agua. La mayoría de aguas naturales se encuentran con un pH entre 6 y 8.
- Conductividad: es la que demuestra la materia ionizable que se encuentra en el agua, además, de las sales disueltas en la misma. Los iones como el calcio, magnesio, fósforo, sodio, etc.
- Dureza: es la concentración de los cationes bivalentes en el agua (como el Ca^{2+} y Mg^{2+}). Uno de los problemas que crea esta son las incrustaciones formadas en equipos que se encuentran en la industria y tuberías, además de afectar la formación de espuma de los detergentes al entrar en contacto con el agua.

Las sustancias químicas, son:

- Grasas: son las sustancias orgánicas que se remueven de las soluciones acuosas o en suspensión. En estas entran los hidrocarburos, esteroides, aceites, ceras y ácidos grasos.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): determina la cantidad de materia orgánica que contiene el agua. Para obtenerla se determina la

cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para actuar en la materia orgánica. El proceso de descomposición varía según sea la temperatura, entonces, este análisis se realiza en forma estándar durante 5 días a 20°C, a este análisis se le llama DBO_5 .

- Demanda química de oxígeno (DQO): al igual que el DBO, determina la cantidad de materia orgánica contenida en el agua. La diferencia que tiene con la demanda bioquímica de oxígeno es que utiliza una sustancia química para degradar la materia orgánica (por ejemplo, el dicromato de potasio).
- Oxígeno disuelto (OD): como su nombre lo indica, es todo el oxígeno que se encuentra disuelto en el agua. Es un indicador de la contaminación existente en el agua, si esta contiene mayor OD el agua es de mejor calidad, si contiene materia orgánica en descomposición el OD disminuye considerablemente; normalmente varía entre 7 y 12 partes por millón.
- Carbono orgánico total (COT o TOC, por sus siglas en inglés): Es un indicador de que existe materia orgánica en el agua que se está analizando. Según la PRTR, se le denomina TOC a todo el carbón que se encuentra o forma parte de las aguas superficiales. Existen muchas sustancias naturales y creadas por el hombre, que ayudan a incrementar el COT, no obstante, en el proceso del consumo de oxígeno los microorganismos descomponen esta sustancia.
- Nitratos: es un compuesto inorgánico compuesto por un átomo de nitrógeno y tres átomos de oxígeno, obteniendo el siguiente símbolo químico: NO_3 . El aumento de nitratos en aguas subterráneas se debe al

uso de fertilizantes nitrogenados, sistemas sépticos y almacenamiento de estiércol u operaciones de extensión.

- Fosfatos: Según Romero, el fósforo es el que ayuda con el crecimiento de plantas y animales, además es uno de los nutrientes que ayuda con el control del crecimiento de las algas; su exceso produce un desarrollo incontrolado de las plantas. Uno de los contaminantes que tienen grandes cantidades de fósforo son los detergentes, que han aumentado el contenido de fosfatos en las aguas residuales domésticas. Las formas del fósforo que son importantes en el agua son: ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos.

2.2.3. Características biológicas

Se dividen en dos: constituyentes microbiológicos y macrobiológicos.

- Constituyentes microbiológicos

Son todos aquellos organismos microscópicos que se encuentran como células aisladas o asociadas; también en esta clasificación entran los virus.

Las células se encuentran divididas en dos grupos: eucariotas y procariotas. El primer grupo está constituido por los hongos, algas y protozoarios; son organismos unicelulares o multicelulares que tienen adentro estructuras limitadas por organelos. El segundo grupo está compuesto por las bacterias, bastante sencillas en su interior ya que no contienen membrana celular.

Entre estos constituyentes se encuentran los coliformes totales. Normalmente, se encuentran en el intestino de los animales y humanos; ingresan al ambiente por medio de las heces fecales. Por tanto, si el agua no contiene coliformes, quiere decir que son de buena calidad.

- Escherichia Coli (E. Coli): es una de las bacterias más conocidas de los coliformes, ya que viven en los intestinos de la mayoría de los mamíferos sanos. Es el principal organismo anaerobio facultativo del sistema digestivo. Si se encuentra en el agua, se considera que existen heces fecales recientes.
 - Enterococos intestinales: también, se consideran como índice de contaminantes fecales, debido a que estos no nacen en lugares acuáticos. A diferencia de la E. Coli, éstos sobreviven más tiempo.
- Constituyentes microbiológicos

En este grupo se encuentran los macroinvertebrados bentónicos, estos son los organismos más utilizados como bioindicadores para la calidad del agua debido a que muestran una respuesta duradera a la contaminación puntual del cuerpo de agua en donde se encuentren. Brindan la calidad del agua a mediano y largo plazo, ya que no migran y sus especies tienen ciclos de vida entre menos de un mes, hasta más de un año. A causa de las diferentes estructuras de las comunidades se pueden representar los índices de calidad del agua, más adelante se mencionan estos índices.

Los macroinvertebrados son todos aquellos que por ser relativamente grandes, son visibles al ojo humano. Además, se pueden obtener por redes de luz de malla de entre 250-300 μm , ya que estos miden entre 2 mm y 30 cm.

Se encuentran en su mayoría los grupos artrópodos, como los insectos (en especial las larvas); además, se pueden encontrar los oligoquetos, hirudíneas y moluscos; con menor frecuencia, se encuentran celéntereos, briozos o platelmintos. Los macroinvertebrados no solo se encuentran en los bentos de los ríos, humedales y litorales, también se encuentran como grupo dominante de los ríos. Se caracterizan por su alta variedad taxonómica y la adaptabilidad morfológica que tienen para poder aprovechar los nutrientes del agua. Se caracterizan por:

- Se pueden encontrar en cualquier cuerpo de agua dulce (esteros, ríos, lagos y lagunas), esto ayuda a realizar comparaciones.
- La gran diversidad que tiene representa, en el momento que determinada especie falte o exista, haya algún tipo de alteración antropogénica.
- Debido a que estas especies no migran, se puede determinar el área en donde exista la alteración del ecosistema.
- Su presencia a lo largo del año, puede determinar cualquier alteración ya sea temporal o permanente según la composición específica de cada comunidad de macroinvertebrados.
- Se pueden realizar a bajo costo y con un equipo bastante simple.
- Los macroinvertebrados pueden detectar las siguientes presiones:

- Fisicoquímicas: a causa de la contaminación térmica, cambios en la mineralización del agua, contaminación orgánica, eutrofización y la contaminación por metales u otros contaminantes.
- Hidromorfológica: debido a la alteración del régimen del caudal o su tasa de renovación y la alteración de a morfología del lugar.
- Según Reyes y Fierro los macroinvertebrados pueden vivir en:
 - Hojas flotantes y sus restos
 - Troncos caídos y en descomposición
 - En el lodo o en la arena del río
 - Sobre o debajo de las piedras
 - Donde el agua es más correntosa
 - En lagunas, lagos, aguas estancadas, pozas y charcos
- Y se pueden alimentar de:
 - Plantas acuáticas, restos de otras plantas y algas.
 - Otros invertebrados y peces.
 - Pequeños restos de comida en descomposición y elementos nutritivos del suelo.
 - Animales en descomposición.
 - Elementos nutritivos del agua.
 - Sangre de otros animales.

En el manual de macroinvertebrados de Reyes y Fierro se menciona que estos tienen muchas formas, por ejemplo, las conchas son redondeadas, escarabajos ovalados, lombrices alargadas, etc.

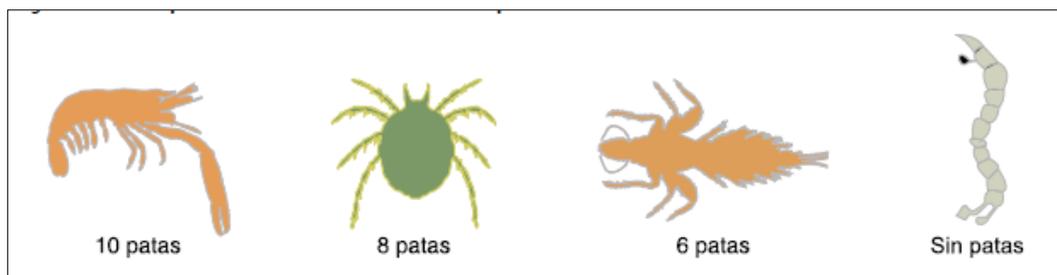
Figura 1. **Distintos tipos de formas de los macroinvertebrados**



Fuente: CARRERA, C.; FIERRO, K. *Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. p. 29.

Algunos tienen muchas patas, por ejemplo, los camarones tienen 10, ácaros 8, etc. Otros no tienen patas como las larvas de mosca.

Figura 2. **Cantidad de patas en los macroinvertebrados**



Fuente: CARRERA, C.; FIERRO, K. *Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. p. 29.

La mayoría de macroinvertebrados tienen el color respecto al lugar en el que viven, por ejemplo, las conchas tienen colores oscuros debido al lodo que las rodea.

Los macroinvertebrados se utilizan como indicadores de la calidad del agua debido a que los científicos los valoraron con respecto a la sensibilidad de su grado de contaminación. Estos números están valorados del 1 al 10.

Tabla I. **Valoración según la sensibilidad de la contaminación de los macroinvertebrados**

Sensibilidad	Calidad de agua	Calificación
No aceptan contaminantes	Muy buena	9-10
Aceptan muy pocos contaminantes	Buena	7-8
Aceptan pocos contaminantes	Regular	5-6
Aceptan mayor cantidad de contaminantes	Mala	3-4
Aceptan muchos contaminantes	Muy mala	1-2

Fuente: CARRERA, C.; FIERRO, K. *Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. p. 30.

2.3. Contaminación

Es toda aquella alteración que tiene el ambiente que afecta de forma negativa al ser humano y al ecosistema en sí. También, se puede entender como la introducción de todas aquellas sustancias o energías que atentará contra el normal funcionamiento y equilibrio que tenía el medio inicialmente, provocando daños en algunas ocasiones irreversible.

Otra definición de contaminación se le da a la presencia en el medio de cualquier agente químico, físico o biológico perjudiciales para la salud de la población, de la vida animal o vegetal.

Existen diversos tipos de contaminación, la mayoría está provocada por las actividades del ser humano; en este apartado se mencionan unas de las más importantes:

2.3.1. Tipos de contaminación

- Contaminación del suelo

Es la alteración de forma natural de la superficie terrestre y la introducción de sustancias ajenas a esta. Mayoritariamente las sustancias que se le añaden son para el cuidado de la agricultura, como los insecticidas y fertilizantes; además de contaminar el suelo, también afecta al agua subterránea.

- Contaminación del aire

También, conocida como polución del aire, se produce debido a la emisión de una mezcla de partículas sólidas y gases en el aire, por ejemplo: emisión de humo de los carros, la quema de basura, polvo, polen, incendios forestales, etc. Una de las consecuencias más significativas es que ha reducido la capa de ozono.

- Contaminación visual

Es la alteración del paisaje natural del ecosistema. Se debe a los basureros, las vallas publicitarias, el proselitismo político, el tránsito vehicular, los cableados eléctricos, etc.

- Contaminación auditiva

Son todos aquellos sonidos que no son soportables para la audición humana. Perjudica de varias formas ya que no solo puede provocar la sordera parcial o total, también, dolores de cabeza y hasta la muerte.

La medida para calcular la presión auditiva son los decibelios (dB), según la OMS lo soportable para el ser humano son 65 dB. Cuando la presión acústica está a 75 dB se vuelve dañina, dolorosa cuando está a 120 dB y puede causar la muerte cuando llega a los 180 dB.

- Contaminación térmica

Es el cambio de la temperatura, ya sea del agua o del aire, que afecta significativamente a los ecosistemas que se encuentren alrededor de estos. Sus principales causas son la eliminación de árboles y plantas, las termoeléctricas, etc.

- Contaminación hídrica

Para éste estudio, la contaminación del agua es la más importante. La mayoría del agua superficial de Guatemala está contaminada y, poco a poco, se están contaminando los acuíferos; esto se debe a las actividades antropogénicas.

Se entiende por contaminación hídrica a la alteración del estado natural del agua, introduciendo algún material que cambie la calidad y composición química. Las fuentes de contaminación del agua son varias, provienen de las actividades domésticas, agrícolas, industriales, unas son más contaminantes

que otras; cuando no se trata de manera adecuada el agua ya utilizada, esta se contamina de manera considerable.

- Los principales contaminantes del agua son:
 - Agentes patógenos: como virus, bacterias y parásitos. si el agua contiene estos agentes y se consume brinda enfermedades gastrointestinales a quien la ingiera.
 - Desechos que requieren oxígeno: Si se encuentran demasiados en el agua, se puede terminar el oxígeno del agua y acabar con la vida acuática.
 - Sustancias químicas inorgánicas: en éstas se encuentran los metales tóxicos y los ácidos.
 - Sustancias químicas orgánicas: como el petróleo, plástico, los detergentes y plaguicidas que amenazan la vida acuática.
 - La eutrofización (aumento de nutrientes): pueden ayudar con el crecimiento excesivo de las plantas acuáticas; ya que utilizan el oxígeno del agua, también, terminan con la vida de los ecosistemas acuáticos.
 - Sedimentos o materia suspendida en el agua: enturbian el agua y es una de las mayores fuentes de contaminación hídrica.

- Aumento de la temperatura: se menciona en la contaminación térmica; ayuda a disminuir el oxígeno existente en el agua y con la vulnerabilidad de la vida acuática.

En Guatemala existe mala calidad de agua, pues esta abastece en los hogares y tiene costo en la salud humana. En el año 2003, las enfermedades intestinales (parasitosis intestinal y enfermedad diarreica aguda) ocuparon el segundo y tercer lugares como causas de morbilidad general (responsable del 17,2 % del total de causas) y de morbilidad en el grupo de niños de uno a cuatro años. En el grupo de menores de un año, el síndrome diarreico agudo, ocupó el segundo lugar y el parasitismo intestinal, el sexto. En el año 2004 hubo 3 636 muertes por enfermedad diarreica aguda, 51 % en hombres y 24 % en niños y niñas menores de un año. La tasa de mortalidad general por diarrea fue de 42,9 por 100 000 habitantes, según la Organización Panamericana de la Salud.

2.4. Índices de la calidad del agua

Los índices de calidad del agua según son las expresiones matemáticas en donde se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- Fisicoquímicos: como las concentraciones, sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua.
- Biológicos: incluye la biota acuática, su composición y estado.
- No acuáticos: los cambios que existen debido a factores intrínsecos y externos del sistema acuático; como la presencia de bosques en las riberas de la corriente, etc.

2.4.1. Índices fisicoquímicos

Incluye los índices de calidad fisicoquímicos, de contaminación fisicoquímica y el índice de saturación de Langellier.

2.4.1.1. Índices de calidad fisicoquímica

Es una herramienta que permite obtener un valor numérico adimensional calculado con varios parámetros fisicoquímicos individuales. Los más utilizados en la actualidad son:

- Índice de calidad del agua (ICA)

Este índice es una versión modificada realizada por Brown del índice WQI (por sus siglas en inglés *water quality index*) que fue realizado por la Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.

En este índice se utilizan 9 parámetros: coliformes fecales, DBO₅, fosfatos, cambio en la temperatura, sólidos disueltos totales, nitratos, oxígeno disuelto, pH y turbidez.

Este índice adopta un valor de 100 cuando se encuentra con excelente calidad, mientras más contaminado se encuentre va disminuyendo el valor.

- Después de realizar su cálculo se clasifica de la siguiente manera:

Tabla II. **Clasificación del ICA propuesto por Brown**

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. *Índice de calidad del agua general ICA*. <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>. Consulta: 2 de mayo de 2015.

Para realizar el cálculo del ICA se puede utilizar una suma lineal ponderada de los subíndices (ICA_a) o una función ponderada multiplicativa (ICA_m), entonces:

$$ICA_a = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i) \quad [Ec. 1]$$

$$ICA_m = \prod_{i=1}^9 (Sub_i^{w_i}) \quad [Ec. 2]$$

Donde:

- W_i : pesos relativos asignados a cada parámetro (Sub_i), ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a 1.
- Sub_i : subíndice del parámetro i .

Para determinar el valor del ICA es necesario sustituir los datos en la ecuación 2 obteniendo los Sub_i de distintas gráficas, dicho valor se eleva por sus respectivos w_i de la tabla III y se multiplican los 9 resultados obteniendo de esta manera el ICA.

Tabla III. **Pesos relativos para cada parámetro del ICA**

i	Sub_i	w_i
1	Coliformes fecales	0,15
2	pH	0,12
3	DBO ₅	0,10
4	Nitratos	0,10
5	Fosfatos	0,10
6	Temperatura	0,10
7	Turbidez	0,08
8	Sólidos disueltos totales	0,08
9	Oxígeno disuelto	0,17

Fuente: SNET. *Índice de calidad del agua general ICA*. <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>. Consulta: 2 de mayo de 2015.

- Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA)

Para éste índice se necesita tener otros índices para completar una visión real de la situación. Se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$ISQA = E_{(T)} * (A_{(DQO)} + B_{(SST)} + C_{(O2)} + D_{(CE)}) \quad [Ec. 3]$$

Donde:

- $E_{(T)}$: temperatura del agua (en °C), puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1 según:

$$E_{(T)}=1 \text{ si } T \leq 20^{\circ}\text{C}. \quad [Ec. 4]$$

$$E_{(T)} = 1 - ((T - 20) * 0,0125 \text{ si } T > 20^{\circ}\text{C} \quad [Ec. 5]$$

- $A_{(DQO)}$: demanda química orgánica según la oxidabilidad al permanganato (DQO-Mn en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:

$$A_{(DQO)}=30-DQO-Mn \text{ si } DQO-Mn \leq 10 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$A_{(DQO)} = 21-(0,35*DQO-Mn) \text{ si } 60 \text{ mg/l} \geq DQO-Mn > 10 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$A_{(DQO)}=0 \text{ si } DQO-Mn > 60 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec.8}]$$

- A partir del año 2003 se empezó a calcular mediante el parámetro COT, en mg/l, además, estima la materia orgánica que contiene el agua.

$$A_{(COT)} =30-COT \text{ si } COT \leq 5 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$A_{(COT)} =21-(0,35*COT) \text{ si } 12 \geq COT > 5\text{mg/l} \quad [\text{Ec. 10}]$$

$$A_{(COT)} =0 \text{ si } COT > 12\text{mg/l} \quad [\text{Ec. 11}]$$

- $B_{(SST)}$: sólidos en suspensión totales (SST en mg/l). Puede tomar valores comprendido entre 0 y 25 según:

$$B_{(SST)} =25-(0,15*SST) \text{ si } SST \leq 100 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec.12}]$$

$$B_{(SST)} = 17 - (0,07 * SST) \text{ si } 250 \text{ mg/l} \geq SST > 100 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 13}]$$

$$B_{(SST)} = 0 \text{ si } SST > 250 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 14}]$$

- $C_{(O_2)}$: oxígeno disuelto (O_2 en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:

$$C_{(O_2)} =2.5 * O_2 \text{ si } O_2 < 10 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$C_{(O_2)} = 25 \text{ si } O_2 \geq 10 \text{ mg/l} \quad [\text{Ec. 16}]$$

- $D_{(CE)}$: conductividad (CE en $\mu\text{S/cm}$ a 18°C). Si la conductividad se mide a 25°C , para obtener la conversión a 18°C se multiplicará por 0,86. Puede tomar valores entre 0 y 20:

$$D_{(CE)} = (3,6 - \log CE) * 15,4 \text{ si } CE \leq 4000 \mu\text{S/cm} \quad [\text{Ecu. 17}]$$

$$D_{(CE)} = 0 \text{ si } CE > 4000 \mu\text{S/cm} \quad [\text{Ec. 18}]$$

Tabla IV. **Significado de los valores del ISQA**

ISQA	Categoría	Descripción
90-100	Excelente (azul)	La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas; las condiciones son cercanas a los niveles naturales.
80-90	Buena (verde)	La calidad del agua está protegida contra un menor grado de amenazas; las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseados.
70-80	Intermedia (amarillo)	La calidad del agua es ocasionalmente afectada; las condiciones a veces no cumplen con los niveles deseados.
60-70	Admisible (naranja)	La calidad del agua es frecuentemente afectada; las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.
0-60	Inadmisible (rojo)	La calidad del agua es continuamente afectada; las condiciones no cumplen con los niveles deseados.

Fuente: RIVERA, Jorge. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la parte alta de la cuenca del río naranjo, ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango*. p. 25.

El ISQA va a encontrarse entre 0 (calidad mínima) y 100 (calidad máxima).

- Índice automático de calidad de aguas (IAQA)

Es una variante del ISQA, en donde los valores de los parámetros se obtienen de redes automáticas de control, lo que facilita en tiempo real y en

continuo. El parámetro COT se utiliza como parámetro A y en el parámetro B la turbidez.

2.4.1.2. Índices de contaminación fisicoquímica

Según Cañas (S/F), en estos índices se obtienen valores adimensionales entre 0 y 1 en donde, al contrario de los de calidad fisicoquímica, si el valor está cercano a 0 indica una baja contaminación en el agua y si el valor está cercano a uno tiene una alta contaminación.

Según la CDMB (S/F), los rangos establecidos para la clasificación de los índices de contaminación son:

Tabla V. **Clasificación de los índices de contaminación**

ICO	Grado de contaminación	Escala de color
0-0,2	Ninguna	Azul
>0,2-0,4	Baja	Verde
>0,4-0,6	Media	Amarillo
>0,6-0,8	Alta	Naranja
>0,8-1	Muy alta	Rojo

Fuente: CDMB. *Índices de contaminación.*

<http://caracoli.cdm.gov.co/cai/rhc/indcontamina.html>. Consulta: 15 de mayo de 2017.

- Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)

Según Ramírez, Restrepo y Cañas, el ICOMI elige la conductividad para reflejar el conjunto de sólidos disueltos, la dureza por cuanto recoge los cationes (calcio y magnesio) y, por último, la alcalinidad porque hace lo propio con los aniones, carbonatos y bicarbonatos.

Este índice es el valor promedio entre las tres variables antes mencionadas, definidas en un rango de 0-1; donde los índices próximos a cero reflejan baja contaminación por mineralización, todo lo contrario cuando están cercanos a uno. Para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$ICOMI = \frac{1}{3} * (I_{conductividad} + I_{dureza} + I_{alcalinidad}) \quad [Ec. 19]$$

Donde:

- $I_{conductividad}$ se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\log_{10} I_{conductividad} = -3.26 + 1.34 \log_{10} conductividad \left(\frac{\mu S}{cm}\right) \quad [Ec. 20]$$

$$I_{conductividad} = 10^{-3.26+1.34 \log_{10} conductividad \left(\frac{\mu S}{cm}\right)} \quad [Ec. 21]$$

- Conductividades mayores a 270 $\mu S/cm$, tienen un índice de conductividad = 1.

- I_{dureza} se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\log_{10} I_{dureza} = -9,09 + 4,40 \log_{10} dureza (mg/l) \quad [Ec. 22]$$

$$I_{dureza} = 10^{-9.09+4.40 \log_{10} dureza (mg/l)} \quad [Ec. 23]$$

- Durezas mayores a 110 mg/l tienen valor $I_{dureza} = 1$
- Durezas menores a 30 mg/l tienen valor $I_{dureza} = 0$

- $I_{alcalinidad}$ se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$I_{alcalinidad} = -0,25 + 0,005 * alcalinidad \left(\frac{mg}{l}\right) \quad [Ec. 24]$$

- Alcalinidades mayores a 250 mg/l tienen un valor $I_{\text{alcal.}}=1$.
- Alcalinidades menores a 50 mg/l su índice toma un valor igual a cero.
- Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO):

Se obtiene a través de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno.

$$ICOMO = \frac{1}{3}(I_{DBO} + I_{coliformes} + I_{oxigeno\%}) \quad [\text{Ec. 24}]$$

Donde:

- $I_{DBO} = -0,05 + 0,70 \log_{10} DBO \text{ (} \frac{mg}{l} \text{)}$ [Ec. 25]
- $DBO > 30 \text{ mg/l}$ se le da un valor de 1
- $DBO < 2 \text{ mg/l}$ se le da un valor de 0
- $I_{coliformes} = -1,44 + 0,56 \log_{10} \text{ coliformes totales (} \frac{NMP}{100 \text{ mL}} \text{)}$ [Ec. 27]
 - Col. T > 20,000 NMP/100mL se le asigna un valor de 1
 - Col. Tot < 500 NMP/100mL se le asigna un valor de 0
- $I_{oxigeno\%} = 1 - 0,01 * \text{Oxígeno } \%$ [Ec. 28]
 - Oxígeno(%) > 100 % tiene un valor de 0

Nota: el oxígeno está expresado en porcentaje de saturación de oxígeno, $20^\circ\text{C}=9.4 \text{ mg/l}$.

Para sistemas lénticos con eutrofización y porcentajes de saturación mayores al 100% se sugiere reemplazar por:

- $I_{oxígeno} = 100 \% * Oxígeno \% - 1$
[Ec.26]

- Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)

Este índice trabaja con la concentración de sólidos suspendidos que se definen como partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución.

- Índice de contaminación trófica (ICOTRO)

Se calcula sobre la base de la concentración de fósforo total, éste parámetro en exceso en el agua provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico; la determinación se hace convirtiendo todos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico. Dependiendo de la cantidad de fósforo total obtenido, se determina el grado de eutrofización que tiene el cuerpo de agua:

- Oligotrofia: < 0,01
- Mesotrofia: 0.01 – 0,02
- Eutrofia: 0.02 – 1,00
- Hipereutrofia: > 1,00

2.4.1.3. Índice de saturación de Langelier (ISL)

Éste índice es para determinar las tendencias corrosivas e incrustantes en el agua para uso doméstico o industrial. En este cálculo se utilizan los siguientes parámetros: pH, temperatura, dureza de calcio y alcalinidad total.

El rango ideal para el índice de Langelier es de -0,3 a +0,3. Si el ISL es menor a -0,3 se considera corrosivo y si se obtiene un ISL mayor a 0,3 es tendencia de agua incrustante.

2.4.2. Índices biológicos

Estos índices brindan un valor adimensional que demuestra los efectos de la contaminación en una comunidad biológica específica; se basa en verificar las actividades de las comunidades con respecto al ecosistema en el que se encuentren. La existencia de alguna especie o su ausencia y la densidad o abundancia, determinará la calidad del cuerpo de agua en el que se encuentren. Estos índices complementan a los índices fisicoquímicos, ya que pueden determinar el estado del agua en un tiempo prolongado, pero no identificar los agentes contaminantes existentes.

Existen 3 tipos de índices biológicos: índices de diversidad, saprobios y los bióticos.

2.4.2.1. Índices de diversidad

Se basan en medir la abundancia y biodiversidad de las especies en un sitio específico, mientras más biodiversidad más puntuación. Reflejan todas las alteraciones del número de las comunidades. Las deficiencias de estos índices

es que no existe un consenso claro para los valores obtenidos. Los índices de diversidad son los siguientes:

- Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H)

Se basa en relacionar la cantidad de especies con la proporción de individuos que existen en cada especie presentes en la muestra. La parte negativa de este índice es que no brinda la periodicidad, el tipo de muestreo, la resolución taxonómica y responde de manera irregular a los cambios que tienen los ecosistemas acuáticos.

- Índice de diversidad de Simpson-Gini (Y)

Indica la probabilidad de que dos individuos extraídos al azar de una comunidad pertenecen a la misma especie, si la probabilidad es alta la comunidad es poco diversa. Los impactos que normalmente indica son: polución orgánica, degradación de la morfología del río y degradación general.

- Índice de Berger-Parker (B)

Calcula la dominancia de la especie más abundante; indica los mismos impactos que el índice anterior.

- Índice de diversidad de McIntosh

Se basa en los tamaños de las poblaciones de los distintos taxones, indica la dominancia de alguno o algunos de ellos.

2.4.2.2. Índices bióticos

Son específicos para un tipo de contaminación y región geográfica, están basados en el concepto de organismo indicador. Valoran el estado ecológico de un ecosistema acuático afectado por algún proceso de contaminación. Para el cálculo se le asigna un valor a los grupos de invertebrados en función de la tolerancia que tienen con determinado tipo de contaminación, a los más tolerantes se les asigna un valor numérico menor y a los más sensibles uno mayor; al sumarlos todos indicará la calidad del ecosistema analizado.

Los índices bióticos son los siguientes:

- Índice BMWP (por sus siglas en inglés)

Biological monitoring working party): brinda un valor entre 1 (familias muy tolerantes a la contaminación) y 10 (familias intolerantes) a las familias de macroinvertebrados bentónicos. La suma de los valores encontrados de cada familia nos da el grado de contaminación en el punto estudiado.

Dado a que no existe un índice BMWP para Guatemala, se utiliza el índice BMWP adaptado para Costa Rica.

Según el puntaje dado en la tabla VI se asigna una sola vez por familia, no importando la cantidad de individuos o géneros encontrados, la suma de los valores de las familias encontradas es el resultado final del índice.

Tabla VI. Puntajes para las familias identificadas en Costa Rica

Puntaje	Filo	Clase	Orden	Familias
9	Arthropoda	Insecta	Odonata	Polythoridae
			Diptera	Blephariceridae, Athericidae
			Ephemeroptera	Heptageniidae
			Plecoptera	Perlidae
			Trichoptera	Lepidostomatidae, Odontoceridae, Hydrobiosidae, Ecnomidae
8	Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Leptophlebiidae
			Odonata	Cordulegastridae, Corduliidae, Aeshnidae, Perilestidae
			Trichoptera	Limnephilidae, Calamoceratidae, Leptoceridae, Glossosomatidae
			Blattodea	Blaberidae
7	Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Ptilodactylidae, Psephenidae, Lutrochidae
			Odonata	Gomphidae, Lestidae, Megapodagrionidae, Protoneuridae, Platystictidae
			Trichoptera	Philopotamidae
		Crustacea	Amphipoda	Talitridae, Gammaridae
6	Arthropoda	Insecta	Odonata	Libellulidae
			Megaloptera	Corydalidae
			Trichoptera	Hydroptilidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae
			Ephemeroptera	Ethyoplociidae
5	Arthropoda	Insecta	Lepidoptera	Pyralidae
			Trichoptera	Hydropsychidae, Helicopsychidae
			Coleoptera	Dryopidae, Hydraenidae, Elmidae, Limnichidae
			Ephemeroptera	Leptohyphidae, Oligoneuriidae, Polymitarcyidae, Baetidae
	Crustacea (subfilo)	Indefinido	Indefinido	
4	Arthropoda	Insecta	Platyhelminthes	Trepaxone mata
			Neoophora	Planariidae
			Coleoptera	Chrysomelidae, Curculionidae, Haliplidae, Lampyridae, Staphylinidae, Dytiscidae, Gyrinidae, Scirtidae, Noteridae
			Diptera	Dixidae, Simulidae, Tipulidae, Dolichopodidae, Empididae, Muscidae, Sciomyzidae, Ceratopogonidae, Stratiomyidae, Tabanidae
			Hemiptera	Belostomatidae, Corixidae, Naucoridae, Pleidae, Nepidae, Notonectidae,
			Odonata	Calopterygidae, Coenagrionidae
		Ephemeroptera	Caenidae	
4		Arachnida	Trombidiformes	Hidracarina

Continuación de la tabla VI.

3	Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Hydrophilidae	
			Diptera	Psychodidae	
	Mollusca	Gastropoda	Malacostraca	Isopoda	Asellidae
			Heterostropha	Valvatidae	
			Neotaenioglossa	Hydrobiidae, Bythinellidae	
			Basommatophora	Lymnaeidae, Physidae, Planorbidae	
	Annelida	Clitellata	Bivalvia	Veneroidea	Pisidiidae
			Hirudinea	Indefinido	Indefinido
			Rynchobdellida	Glossiphonidae	
			Arhynchobdellida	Erpobdellidae Hirudidae	
2	Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae, Culicidae, Ephydriidae	
1	Arthropoda	Insecta	Diptera	Syrphidae	
	Annelida	Oligochaeta	Todos los ordenes	Indefinido	

Fuente: elaboración propia.

Por último, según el Ministerio de Ambiente y Energía y el Ministerio de Salud de Costa Rica (2007), este índice adquiere valores entre 0 y un máximo indeterminado que, en la práctica no suele superar 200. Por lo tanto, se establecen 6 niveles de calidad para el agua (los dos primeros pertenecen al grupo de aguas no contaminadas).

Tabla VII. **Clasificación de la calidad del agua según el Índice BMWP-CR**

Nivel de calidad	BMWP	Color
Aguas de calidad excelente	>120	Azul
Aguas de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible	101-120	Azul
Aguas de calidad regular, eutrofia, contaminación moderada	61-100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminadas	36-60	Amarillo
Aguas de calidad mala, muy contaminadas	16-35	Naranja
Aguas de calidad muy mala, extremadamente contaminadas	<15	Rojo

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Ministerio de Salud de Costa Rica. *Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales*. cr/sites/default/files/de-33903reglamento_evaluacion_clasificacion_cuerpos_de_agua_0.pdf. Consulta: 2 de abril de 2015.

- Índice biótico de Trent (TBI)

Este brinda el grado de tensión que producen las aguas residuales en las comunidades de los animales de ríos, a partir de las cantidades de taxones y la presencia de especies. Utiliza 6 taxones y brinda un valor entre 0 (mala) y 15 (buena).

- Índice Chandler

Se basa en 6 grupos y utiliza un factor de abundancia, donde cada especie varía según el número de individuos. Su puntuación varía entre 0 (mala calidad) y no existe un límite superior; existe un límite entre 300 y 3 000, debajo de 300 el agua está contaminada y arriba de 3 000 está poco contaminada.

- Índice EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera)

Evalúa la abundancia de los grupos de macroinvertebrados de éstas familias, con respecto a abundancia total de macroinvertebrados. Estos grupos son bastante sensibles a la contaminación, si tiene un valor mayor de 75 % en EPT de la abundancia total refleja una buena calidad del agua y si éste es cercano a 0 % es una mala calidad (ver tabla VIII)

Se calcula contabilizando el número total de individuos por orden Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, y dividirlos con el número total de individuos capturados, de modo que se obtiene un promedio que se compara con lo siguiente:

Tabla VIII. **Niveles de calidad del agua según índice EPT**

Clase	Índice EPT (%)	Calidad del Agua
1	75-100	Muy Buena
2	50-74	Buena
3	25-49	Regular
4	0-24	Mala

Fuente: ACUÑA, Esteban. *Determinación de la calidad del agua en la subcuenca del río quiscab departamento de sololá, mediante dos índices bióticos.* p. 21.

2.5. Correlación de Pearson

La correlación de Pearson, según Fernández y Díaz:

“La cuantificación de la fuerza de la relación lineal entre dos variables cuantitativas, se estudia por medio del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Dicho coeficiente oscila entre -1 y $+1$. Un valor de -1 indica una relación lineal o línea recta positiva perfecta. Una correlación próxima a cero indica que no hay relación lineal entre las dos variables.”¹

El uso de esta técnica requiere que las dos variables hayan sido medidas hasta un nivel cuantitativo continuo y que la distribución de ambas sea semejante a la de la curva normal; es decir, que tenga sesgo y curtosis parecidos a la de dicha distribución

Para obtener la correlación de Pearson se debe realizar el promedio de cada variable, luego realizar la covarianza, calcular las desviaciones típicas de

Las dos variables y, por último, realizar la correlación. Con las siguientes ecuaciones:

¹ PITA FERNÁNDEZ, S.; PÉRTEGA DÍAZ, S. *Relación entre variables cuantitativas.* prod.fisterra.com/mbe/investiga/var_cuantitativas/var_cuantitativas2.pdf. Consulta: 15 de abril de 2015.

$$\text{Covarianza} = \frac{\Sigma(X*Y)}{n} - (\bar{X} * \bar{Y}) \quad [\text{Ec. 27}]$$

$$S_{(x)} = \sqrt{(x^2) - (\bar{x})^2} \quad [\text{Ec. 28}]$$

$$S_{(y)} = \sqrt{(y^2) - (\bar{y})^2} \quad [\text{Ec. 29}]$$

$$r_p = \frac{\text{covarianza}}{S_x * S_y} \quad [\text{Ec. 30}]$$

Donde:

- X= (pueden ser los valores del ICOMI, ISQA o BMWP)
- Y= (pueden ser los valores del ICOMI, ISQA o BMWP)
- n= cantidad de valores analizados
- $S_{(x \text{ o } y)}$ =la desviación típica de X y de Y
- r_p = correlación de pearson

2.6. Distribución F de Fisher

Según las pruebas F son nombradas así en honor a Sir Ronald Fisher. La F estadística es una razón de dos varianzas. Las varianzas son medidas de dispersión, también se pueden entender como qué tan lejos están dispersos los datos de la media. Valores más grandes representan una mayor dispersión.

La estadística F está basada en la razón de la media cuadrática. El término media cuadrática es un estimado de la variación de la población que acontece los grados de libertad usado para calcular ese estimado.

A pesar de ser una razón de varianzas, se puede utilizar la prueba en varias situaciones: a) puede evaluar la igualdad de varianzas; b) también evaluar la significancia completa de un modelo de regresión; c) para comparar modelos diferentes; d) para evaluar la igualdad de las medias y los términos de regresión.

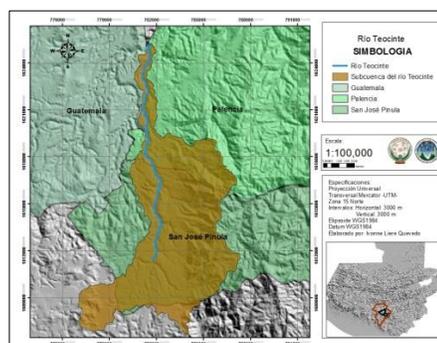
2.7. Características del río Teocinte

El río Teocinte pertenece a la subcuenca del mismo nombre, esta se encuentra en la cuenca del río Motagua. Sus afluentes son varias quebradas de la subcuenca: quebrada Las Pilas, Agua Tibia, Las Flores, Peña Áspera, Las Bellotas, Blanca, El Molino, etc. El río Teocinte descarga en el río Las Cañas.

Éste río es captado por las plantas de tratamiento: Las Ilusiones ubicada en la zona 18 y Santa Luisa ubicada en zona 16.

Este río inicia en San José Pinula y atraviesa entre el límite de la ciudad de Guatemala (zona 25) con Palencia. La subcuenca del río Teocinte tiene un área de 74,46 km².

Figura 3. Subcuenca del río Teocinte



Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Las técnicas y los procedimientos utilizados en el estudio se ordenaron de la siguiente manera:

3.1. Variables

Tabla IX. Variables independientes, dependientes y respuesta

Variable	Independiente	Dependiente	Variable Respuesta
ISQA		X	X
ICOMI		X	X
Índice BMWP		X	X
Correlación entre cada índice		X	X
Temperatura		X	
DQO		X	
Sólidos suspendidos totales		X	
Oxígeno disuelto		X	
Conductividad		X	
Dureza		X	
Alcalinidad		X	
Variedad taxonómica		X	
Puntuación de macroinvertebrados		X	
Puntos de muestreo	X		

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La delimitación del campo de estudio de esta investigación se encuentra dentro de la Ingeniería Ambiental; el enfoque es determinar la calidad del agua del río Teocinte con el fin de evaluar la correlación existente entre los índices fisicoquímicos con los índices biológicos.

El campo de estudio, como se mencionó anteriormente, es el de la calidad del agua enfocada a la actividad de los macroinvertebrados bentónicos con los distintos cambios de los índices fisicoquímicos.

Por último, la línea de investigación es la del biomonitoreo y la de los índices fisicoquímicos; utilizando los macroinvertebrados bentónicos como indicadores, el índice BMWP, distintos parámetros fisicoquímicos, el índice de contaminación por mineralización y el índice simplificado de calidad del agua.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Ivonne Liere Quevedo.
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias.
- Ayudante de muestreo y guía: Jhonatan Sicán (Técnico de investigación del departamento de ambiente de la Municipalidad de Guatemala).
- Personal del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina.

- Lic. José Roberto Ortiz del Laboratorio de Ciencias Biológicas y Oceanográficas ubicado en el CEMA (Centros de Estudios del Mar y Acuicultura).

3.4. Recursos materiales disponibles

- Equipo de protección personal
 - Botas de hule
 - Guantes de látex
 - Bloqueador solar
 - Gorra
- Equipo para la recolección de muestras
 - Red de muestreo tipo D (cedazo de 1mm).
 - Pinzas.
 - 30 botes de plástico para la muestra de sedimento de 100 ml.
 - 30 botes de plástico para las muestras limpias de macroinvertebrados de 100 m.
 - Cinta de aislar.
 - 30 botes de plástico de 1 litro para las muestras de agua.
 - Alcohol etílico (70 %).
 - Glicerina.
 - Cámara digital.
 - Cuaderno de apuntes.
 - Dispositivo GPS.
 - Marcador indeleble.
 - Cinta adhesiva (*masking tape*).
 - Multiparamétrico.

Figura 4. **Equipo para la recolección de muestras, parte 1**



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Equipo para la recolección de muestras, parte 2**



Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cuantitativa o cualitativa

Se realizó una técnica cuantitativa con referencia al cálculo de los índices fisicoquímicos y su correlación.

Para el índice BMWP se utilizó una técnica cualitativa/cuantitativa, ya que se realizó una descripción de la tolerancia de las distintas familias de macroinvertebrados; luego, se le asignó el valor del grado de sensibilidad a la contaminación que tienen; por último, se realizó el cálculo del índice. Además, se realizó una técnica cuantitativa en la correlación de este índice con los índices fisicoquímicos.

3.6. Recolección de la información en campo

La recolección de muestras de macroinvertebrados está basada en el protocolo del índice BMWP adaptado para Costa Rica.

- Selección del sitio: se eligió un lugar del río representativo y de fácil acceso, se tomó en cuenta todos los posibles microhábitat, que se especifican a continuación.
 - Orillas sin corriente, con corriente, raíces, vegetación u objetos sumergidos.
 - Sustrato de remansos, rápidos y pozas.
 - Paquetes de hojas en remansos y rápidos.
- Tiempo de muestreo e identificación: el muestreo duró 15 minutos utilizando la red tipo D. Los individuos se preservaron en etanol a 70° y luego se identificaron.

- Especificaciones de los muestreos: durante el tiempo que duró el muestreo, se avanzó con la red D corriente arriba, colocándola en cada uno de los microhábitat posibles, lavando raíces, vegetación, paquetes de hojas y sedimentos. Si en la red se encontraban macroinvertebrados visibles se ubicaron en recipientes con alcohol/glicerina.
- El recipiente se etiquetó con la fecha y el nombre del río.
- Los puntos de muestreo se seleccionaron en la parte alta, media y baja del trayecto del río. El muestreo se realizó en 5 días de la época seca y 5 días en la época lluviosa para que este fuera significativo, obteniendo un total de 30 muestras (cada día se muestrearon tres puntos).
- Para obtener mejores resultados se conservó (en alcohol etílico a 70°) sedimento de cada muestreo; posteriormente, se limpiaron estas muestras con ayuda de un estereoscopio y se obtuvieron más familias de macroinvertebrados.
 - La limpieza de las muestras consiste en retirar los individuos del sedimento e identificar las distintas familias encontradas.
- En estos mismos puntos se recolectaron las muestras de agua para el análisis del laboratorio y se obtuvieron los parámetros fisicoquímicos, para ello se realizaron los siguientes pasos:
 - Se sumergió completamente el bote de plástico de 1 litro en el río 3 veces para su limpieza inicial.

- De nuevo se sumergió por completo el bote plástico, esta vez se llenó sin dejar ninguna burbuja interior.
- Se tapó el bote de plástico y se identificó con la parte del río, fecha y hora de muestreo.
- Al igual que las muestras de macroinvertebrados, se recolectaron en total 30 muestras de agua.
- Se obtuvieron parámetros físicoquímicos in-situ con ayuda del multiparamétrico.

3.7. Análisis estadístico

Se calculó la F de Fisher en cada parte del río (variable independiente) para cada índice (variable dependiente) y, también se realizó la correlación de Pearson entre dos variables cuantitativas, en este caso fueron:

- Relación ICOMI-ISQA
- Relación ISQA-BMWP
- Relación ICOMI-BMWP

4. RESULTADOS

En el siguiente apartado se describen los puntos de muestreo, los datos obtenidos en campo y en el laboratorio, la muestra de cálculo y, por último, los datos calculados.

4.1. Puntos de muestreo

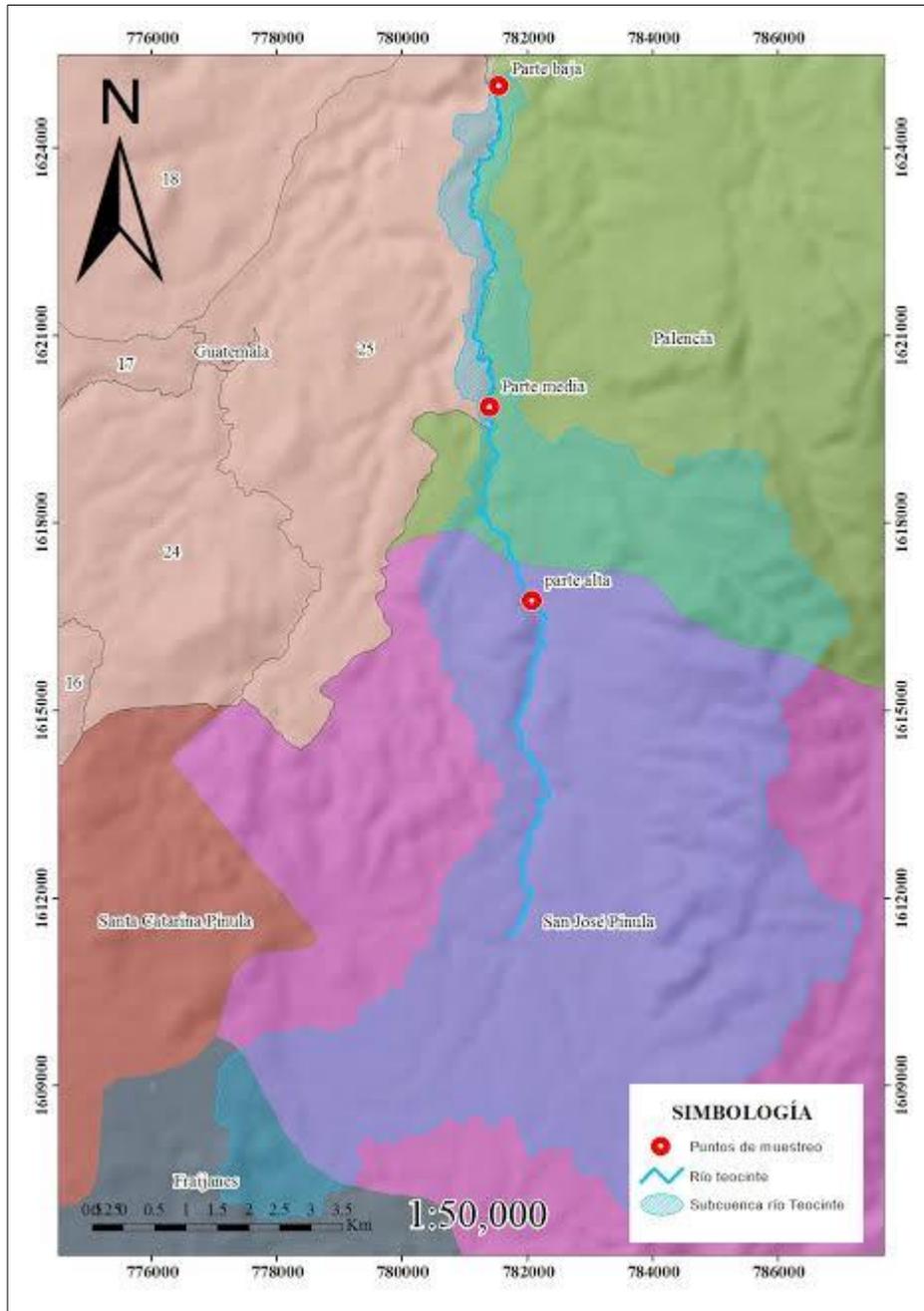
Los puntos de muestreo fueron seleccionados con ayuda del dispositivo GPS que fueron ubicados de la siguiente manera:

Tabla X. **Ubicación de puntos de muestreo**

Núm.	Parte	Coordenadas	
1	Alta	N 14° 36' 34,21"	O 90° 22' 54,31"
2	Media	N 14° 38' 15,22"	O 90° 23' 15,17"
3	Baja	N 14° 41' 2,420"	O 90° 23' 8,940"

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Mapa de ubicación de puntos de muestreo**



Fuente: Municipalidad de Guatemala. *Dirección de medio ambiente.*

www.munigate.com/muni/direcciones/medio-ambiente/. Consulta: 2 de junio de 2015.

4.2. Datos obtenidos:

En este apartado se muestran los datos obtenidos en campo y en el laboratorio de ambas épocas.

4.2.1. Época lluviosa

Tabla XI. Demanda química orgánica (mg/l)

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	<5	<5
2	-----	13,8	17,4
3	41	16	<5
4	47	44	48
5	11	11	10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Sólidos suspendidos totales (mg/l)

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	7,25	162
2	-----	21	80,5
3	4	65	138
4	19,2	9,6	17,5
5	2,71	4	184

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Oxígeno disuelto (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	8.32	9.25
2	-----	8.8	9.26
3	8.06	8.58	8.98
4	7.95	7.9	9.08
5	7.79	7.98	9.68

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	231	231
2	-----	186	212,6
3	25,2	151,1	190,6
4	210,7	210,2	249
5	252,9	237,9	289,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	22,14	20,78
2	-----	21,38	20,96
3	20,05	20,12	19,32
4	20,71	24,61	21,1
5	20,66	22,46	21,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Dureza (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	84	84
2	-----	86	84
3	110	98	82
4	100	102	134
5	112	90	92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Alcalinidad (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	-----	86	86
2	-----	58	66
3	90	58	70
4	74	68	80
5	100	70	88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el primer muestreo (24/8/2016)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	-----	-----	-----
Media	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
Baja	Odonata	Libellulidae	6
		Calopterygidae	4
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Simulidae	4
		Trichoptera	Hydropsychidae

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el segundo muestreo (21/9/2016)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	-----	-----	-----
Media	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
	Odonata	Calopterygidae	4
	Hemiptera	Naucoridae	4
	Neoophora	Planariidae	5
Baja	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Helycopsychidae	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el tercer muestreo (28/9/2016)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
		Psychodidae	3
	Ephemeroptera	Baetidae	5
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Coleoptera	Psephenidae	7
	Basommatophora	Physidae	3
	Oligochaeta	(todas las familias)	1
Media	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
	Coleoptera	Curculionidae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
Oligochaeta	(todas las familias)	1	
Baja	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Coleoptera	Elmidae	5
	Oligochaeta	(todas las familias)	1
Mollusca (filo)	Gastropoda (clase)	3	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el cuarto muestreo (5/10/2016)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
	Odonata	Coenagrionidae	4
		Calopterygidae	4
Coleoptera	Curculionidae	4	
Oligochaeta	(todas las familias)	1	
Media	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
		Leptophlebiidae	8
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
		Ephydriidae	2
	Coleoptera	Dytiscidae	4
		Elmidae	5
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
	Odonata	Calopterygidae	4
Oligochaeta	(todas las familias)	1	
Baja	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
	Coleoptera	Lampyridae	4
		Elmidae	5
	Basommatophora	Physidae	3
Oligochaeta	(todas las familias)	1	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el quinto muestreo (12/10/2016)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Hydroptilidae	6
	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
		Dolichopodidae	4
	Odonata	Coenagrionidae	4
		Calopterygidae	4
	Hemiptera	Naucoridae	4
Basommatophora	Physidae	3	
Oligochaeta	(todas las familias)	1	
Neophora	Planariidae	5	
Media	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Hemiptera	Naucoridae	4
		Belostomatidae	4
	Megaloptera	Corydalidae	6
	Coleoptera	Dytiscidae	4
		Elmidae	5
	Odonata	Calopterygidae	4
		Libellulidae	6
Gomphidae		7	
Diptera	Chironomidae	2	
	Simuliidae	4	
Baja	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
		Leptophlebiidae	8
	Odonata	Calopterygidae	4
	Megaloptera	Corydalidae	6
Oligochaeta	(todas las familias)	1	

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Época seca

Tabla XXIII. **Demanda química orgánica (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	13	7	29
2	26	15	18
3	7	4	12
4	3	5	6
5	3	11	15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Sólidos suspendidos totales (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	211	180	191
2	207	179	197
3	218	179	205
4	216	374	207
5	-----	-----	-----

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Oxígeno disuelto (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	3,20	4,96	1,42
2	6,18	7,58	3,86
3	2,04	2,46	1,00
4	3,22	3,18	3,09
5	2,12	2,71	1,64

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	424	365	389
2	421	365	399
3	439	367	413
4	438	374	418
5	444	375	394

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	17,56	19,05	17,61
2	20,09	21,36	20,33
3	20,67	22,55	20,59
4	19,57	21,57	19,68
5	21,24	22,38	21,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Dureza (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	156	120	180
2	170	200	160
3	156	146	160
4	155	140	160
5	128	122	128

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Alcalinidad (mg/l)**

Núm. de muestreo	Parte alta	Parte media	Parte baja
1	136	104	102
2	140	138	140
3	150	106	150
4	146	106	150
5	142	108	148

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el primer muestreo (25/1/2017)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
	Odonata	Calopterygidae	4
		Coenagrionidae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Basommatophora	Physidae	3
Oligochaeta	(todas las familias)	1	
Media	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
	Coleoptera	Psephenidae	7
		Elmidae	5
	Odonata	Calopterygidae	4
		Coenagrionidae	4
	Diptera	Psychodidae	3
		Chironomidae	2
Baja	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Hydropsychidae	5
	Trichoptera	Helicopsychidae	5
		Physidae	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el segundo muestreo (2/2/2017)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Diptera	Chironomidae	2
		Simulidae	4
		Empididae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
	Oligochaeta	(Todas las familias)	1
	Basommatophora	Physidae	3
Neophora	Planariidae	5	
Media	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
		Hydroptilidae	6
		Leptoceridae	8
	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
		Leptophlebiidae	8
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
	Odonata	Calopterygidae	4
Coleoptera	Elmidae	5	
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	
Baja	Diptera	Chironomidae	2
		Ceratopogonidae	4
		Simulidae	4
		Stratiomyidae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
		Hydroptilidae	6
	Ephemeroptera	Baetidae	5
		Leptohyphidae	5
	Basommatophora	Physidae	3
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el tercer muestreo (7/2/2017)

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Diptera	Simulidae	4
		Chironomidae	2
	Hemiptera	Naucoridae	4
	Basommatophora	Physidae	3
	Coleoptera	Curculionidae	4
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	
Media	Coleoptera	Psephenidae	7
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Trichoptera	Hydroptilidae	6
		Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
		Leptoceridae	8
	Odonata	Calopterygidae	4
		Gomphidae	7
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
Neophora	Planariidae	5	
Baja	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Simulidae	4
	Trichoptera	Hydroptilidae	6
		Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
	Basommatophora	Physidae	3
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el cuarto muestreo (15/2/2017)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Diptera	Chironomidae	2
		Simuliidae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
	Basommatophora	Physidae	3
	Oligochaeta	(Todas las familias)	1
Media	Trichoptera	Hydroptilidae	6
		Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
		Leptoceridae	8
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Odonata	Calopterygidae	4
	Diptera	Chironomidae	2
	Coleoptera	Elmidae	5
		Dytiscidae	4
Psephenidae		7	
Trombidiformes	Hidracarina	4	
Baja	Odonata	Calopterygidae	4
		Coenagrionidae	4
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Trichoptera	Hydroptilidae	6
		Hydropsychidae	5
		Helicopsychidae	5
	Coleoptera	Dytiscidae	4
	Basommatophora	Physidae	3
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	
Neophora	Planariidae	5	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Puntaje para familias de macroinvertebrados obtenidos en el quinto muestreo (22/2/2017)**

Parte	Orden	Familia	Puntaje
Alta	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
		Simulidae	4
	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Leptoceridae	8
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
	Coleoptera	Elmidae	5
	Oligochaeta	(Todas las familias)	1
	Basommatophora	Physidae	3
Neophora	Planariidae	5	
Media	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Leptoceridae	8
		Helicopsychidae	5
	Diptera	Chironomidae	2
		Psychodidae	3
		Simulidae	4
		Ceratopogonidae	4
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Coleoptera	Elmidae	5
	Neophora	Planariidae	5
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	
Baja	Trichoptera	Hydropsychidae	5
		Leptoceridae	8
		Helicopsychidae	5
		Hydroptilidae	6
	Ephemeroptera	Leptohyphidae	5
		Baetidae	5
	Hemiptera	Naucoridae	4
	Diptera	Chironomidae	2
		Muscidae	4
	Coleoptera	Psephenidae	7
	Neophora	Planariidae	5
Oligochaeta	(Todas las familias)	1	
Basommatophora	Physidae	3	

Fuente: elaboración propia.

4.3. Muestra de cálculo

4.3.1. Cálculo del índice BMWP

Para este cálculo se le asignó un puntaje determinado a cada familia identificada (ver tabla VI); la sumatoria de los valores es el resultado del índice BMWP.

Ejemplo: se muestra el cálculo de la parte baja del primer muestreo de la época lluviosa (ver tabla XVIII); en este punto se encontraron 4 órdenes y 6 familias, la familia Libellulidae con puntuación más alta (6) y Chironomidae la más baja (2).

$$BMWP = 6 + 4 + 5 + 2 + 4 + 5 = 26$$

Luego de obtener el resultado, se buscó en la tabla VII el nivel de calidad y el color que se le asigna; en este caso se encuentra clasificada en el color naranja y como aguas de calidad mala, muy contaminadas.

Por último, se realizó un promedio para cada punto de las dos épocas.

4.3.2. Cálculo del ICOMI

Ejemplo: se muestra el cálculo de la parte baja de la época lluviosa, para ello se promediaron los parámetros fisicoquímicos (alcalinidad: 78 mg/l, conductividad: 234,6 μ S/cm y dureza 95,2 mg/l) de los 5 muestreos realizados. Para obtener el resultado final se utilizaron las ecuaciones 19 a la 24.

Primero se calcularon los índices de conductividad, dureza y alcalinidad de la siguiente manera:

- $I_{\text{conductividad}}$ se obtuvo de la siguiente manera:
 - $\log_{10} I_{\text{conductividad}} = -3,26 + 1,34 \log_{10} \left(234,6 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right) = -0,0838$
 - $I_{\text{conductividad}} = 10^{-0.0838} = 0,8246$

- I_{dureza} se obtuvo a partir de la siguiente expresión:
 - $\log_{10} I_{\text{dureza}} = -9,09 + 4,40 \log_{10} \left(95,2 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = -0,384$
 - $I_{\text{dureza}} = 10^{-0.384} = 0,413$

- $I_{\text{alcalinidad}}$ se obtuvo de la siguiente manera:
 - $I_{\text{alcalinidad}} = -0,25 + 0,005 * \left(78 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = 0,14$

- Se calculó el ICOMI sustituyendo los resultados anteriores en la siguiente expresión:
 - $ICOMI = \frac{1}{3} * (0,8246 + 0,413 + 0,14) = 0,4592$

Por último, en la tabla V se buscó el límite donde se encuentra y se clasificó en el grado de contaminación y el color; en este caso su grado de contaminación es medio (>0,4-0,6) y el color es amarillo.

4.3.3. Cálculo del ISQA

Ejemplo: se realizó el cálculo de la parte baja de la época lluviosa, para ello se promediaron los parámetros fisicoquímicos (DQO: 17,08 mg/l, SST:

116,4 mg/l, OD: 9,25 mg/l, conductividad: 234,6 μ S/cm y temperatura: 20,78°C) de los 5 muestreos realizados. Para obtener el resultado final se utilizaron las ecuaciones 3-18:

Primero se realizó un cálculo para cada parámetro de la siguiente manera:

- Para la temperatura (variable E en ecuación 3) se obtuvo un valor mayor que 20°C por ende se utilizó la siguiente expresión:
 - $E = 1 - ((20,778 \text{ } ^\circ\text{C} - 20) * 0,0125 = 0,99$
- Para la demanda química orgánica (variable A en ecuación 3) según la oxidabilidad al permanganato (DQO-Mn en mg/l). Se obtuvo un valor menor que 60 y mayor que 10 mg/l, por consiguiente se utilizó la siguiente expresión:
 - $A = 21 - (0,35 * 17,08 \text{ mg/l}) = 15,022$
- Para los sólidos en suspensión totales (variable B en ecuación 3), ya que se obtuvo un valor menor a 250 y mayor a 100 mg/l se utilizó la siguiente expresión:
 - $B = 17 - (0,07 * 116,4 \text{ mg/l}) = 8,852$
- Para el oxígeno disuelto (variable C en ecuación 3) se obtuvo un valor menor a 10 por lo tanto se utilizó la siguiente expresión:

$$C = 2,5 * 9,25 \text{ mg/l} = 23,125$$

- Para la conductividad (variable D en ecuación 3) ya que se obtuvo un valor menor a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se utilizó la siguiente expresión:
 - $D = (3,6 - \log 234,6 \mu\text{S}/\text{cm}) * 15,4 = 18,94$
- Se calculó el ISQA sustituyendo los resultados anteriores en la siguiente expresión:
 - $\text{ISQA} = 0,99 * (15,022 + 8,852 + 23,125 + 18,94) = 65,28$

Por último, se buscó en la tabla IV el significado, el color y la categoría donde se encontraba; en este caso se clasifica como admisible, color naranja y su descripción La calidad del agua es frecuentemente afectada; las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.

4.3.4. Cálculo de la prueba F de Fisher

Se utilizaron como variable independiente las partes del río (alta, media y baja) y como variable dependiente los diferentes índices obtenidos (ISQA, ICOMI y BMWP).

Ejemplo: se muestra el cálculo de la prueba F del ICOMI de la época lluviosa, para ello se utilizaron los resultados de los 3 puntos (parte alta, media y baja). Con los datos obtenidos de la tabla XXXVIII se realizó lo siguiente:

Se Comenzó calculando los totales y los cuadrados de los totales divididos por el número de muestreos:

Tabla XXXV. **Cálculo de Fisher, paso 1**

	Alta	Media	Baja	Total	Sum ² /n
Suma	1,81	1,19	1,51	4,51	2,26
Sum ² /n	1,09	0,47	0,76	2,32	

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se calculan los cuadrados de las observaciones y su total:

Tabla XXXVI. **Cálculo de Fisher, paso 2**

Muestreo	Alta	Media	Baja	
1	0,4096	0,1023	0,0961	
2	0,2025	0,2025	0,4624	
3	0,5069	0,1764	0,2704	Total:
Total:	1,119	0,4813	0,8289	2,4292

Fuente: elaboración propia.

A partir de estas cantidades básicas se calculan las sumas de cuadrados:

- $Sc \text{ (total)} = 2,4292 - 2,26 = 0,1692$
- $Sc \text{ (intra)} = 2,4292 - 2,32 = 0,1092$
- $Sc \text{ (entre)} = 2,32 - 2,26 = 0,06$

Los cuadrados medios serán:

- $CM \text{ (entre)} = 0,06 / 2 = 0,034$
- $CM \text{ (intra)} = 0,1092 / 3 = 0,0364$

Por consiguiente el estadístico de contraste vale:

- $F=(0,034/0,0364)= 0,93$

La f crítica se calcula obteniéndola del siguiente cuadro, con un nivel de confianza del 95 %, y grados de libertad de 2 y 3:

Figura 7. **Distribución Fc**

		Grados de libertad del numerador										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396	19.413	
3	10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	

Fuente: URBINA, Jean. *Distribución de Fisher, Ji-cuadrado y T de Student*. <https://es.slideshare.net/jonatan0106/prueba-de-hipotesis-49577406>. Consulta: 6 de junio de 2015.

- Obteniendo un fc de 9,5521

Dado que $F < F_C$ ($0,93 < 9,55$) infiere que las medias del ICOMI no difieren significativamente entre sí. Las partes del río Teocinte no afectan significativamente al ICOMI.

4.3.5. Cálculo de la correlación lineal

Ejemplo: se muestra el cálculo de la correlación lineal entre el BMWP e ICOMI de la época lluviosa, para ello se utilizaron los resultados de los 3 puntos (parte alta, media y baja) de ambos índices y las ecuaciones 30-33.

- Primero se calculó la covarianza con los datos de ambos índices:

$$\circ \quad \text{Cov} = \frac{(38,67*0,58)+(35,6*0,38)+(27,6*0,46)}{3} - \left(\left(\frac{38,67+35,6+27,6}{3} \right) * \left(\frac{0,58+0,38+0,46}{3} \right) \right) = 0,1447$$

- Segundo se realizó el cálculo de la desviación estándar de ambos índices:

$$\circ \quad S_{(\text{BMWP})} = \sqrt{\frac{(38,67-33,96)^2+(35,6-33,96)^2+(27,6-33,96)^2}{3}} = 4,67$$

$$\circ \quad S_{(\text{ICOMI})} = \sqrt{\frac{(0,58-0,47)^2+(0,38-0,47)^2+(0,46-0,47)^2}{3}} = 0,082$$

- Por último se sustituyeron los resultados anteriores en la siguiente expresión:

$$\circ \quad r_p = \frac{0,1447}{4,67*0,082} = 0,378$$

Dado a que el resultado no es uno ni está cercano a uno no existe correlación lineal entre estos índices; para determinar la correlación que tienen,

se realizó la gráfica de dispersión y se agregó la línea de tendencia, se determinó que esta es una correlación polinomial de grados dos.

4.4. Datos calculados

4.4.1. Época Lluviosa

Tabla XXXVII. Resultados índice BMWP

Muestreo	1	2	3	4	5	Promedio	Calidad
Parte alta	---	---	30	34	52	38,67	Calidad mala, contaminada
Parte media	12	30	26	49	61	35,6	Calidad mala, contaminada
Parte baja	26	20	24	28	40	27,6	Calidad mala, muy contaminada

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. Resultados ICOMI

Parte	ICOMI	Contaminación
Alta	0,58	Media
Media	0,38	Baja
Baja	0,46	Media

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. Resultados ISQA

Parte	ISQA	Calidad
Alta	71,33	Intermedia
Media	75,13	Intermedia
Baja	65,29	Admisible

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. Análisis de varianza y F de Fisher del ICOMI

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0318	2	0,0159	0,932	0,4842	9,5521
Dentro de los grupos	0,0512	3	0,0171			
Total	0,0830	5				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. Análisis de varianza y F de Fisher del ISQA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	46,734	2	23,367	0,650	0,547	4,459
Dentro de los grupos	287,484	8	35,936			
Total	334,218	10				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. Análisis de varianza y F de Fisher del BMWP

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	397,970	2	198,985	1,217	0,345	4,459
Dentro de los grupos	1307,667	8	163,458			
Total	1705,636	10				

Fuente: elaboración propia.

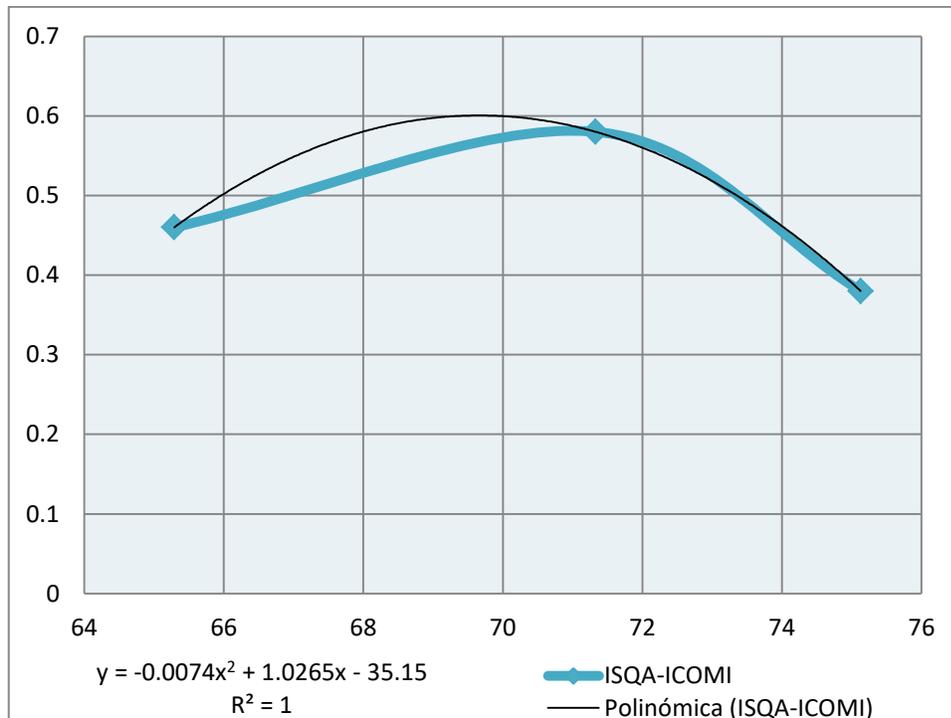
Tabla XLIII. **Cálculo de la correlación lineal**

Correlación	Coefficiente de correlación de Pearson (R)
ISQA-ICOMI	-0,274
ISQA-BMWP	0,787
BMWP-ICOMI	0,377

Fuente: elaboración propia.

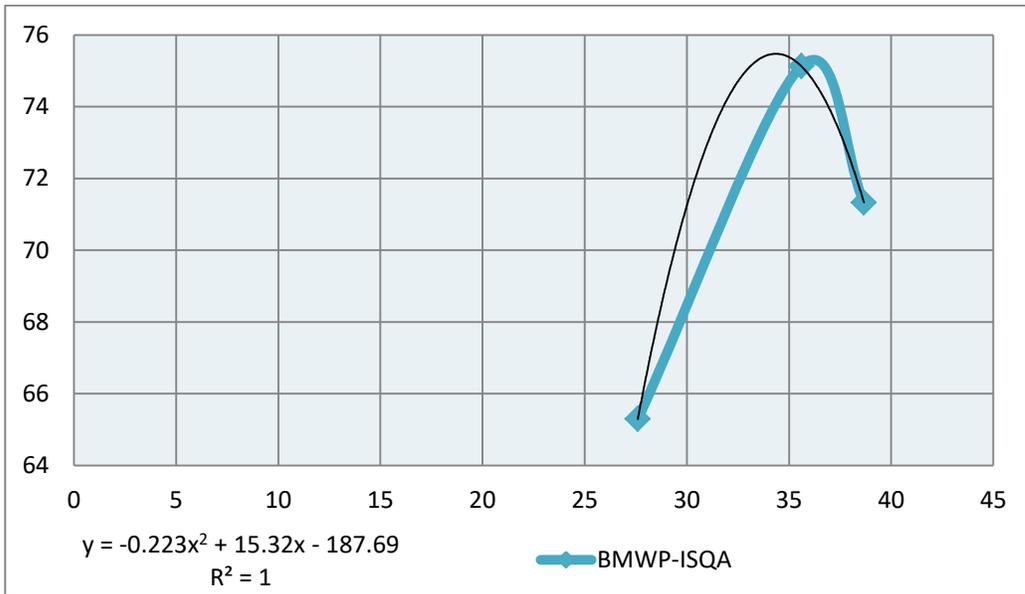
En la tabla anterior se muestra que no existe correlación lineal entre ninguno de los índices, por tanto, en las siguientes gráficas se modificó para encontrar su correlación.

Figura 8. **Correlación ISQA-ICOMI**



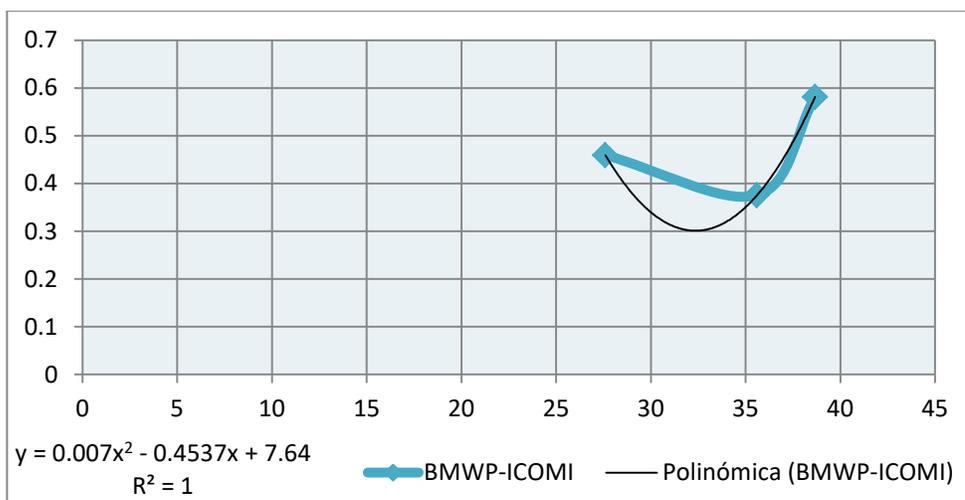
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Correlación BMWP-ISQA**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Correlación BMWP-ICOMI**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Ecuaciones de las correlaciones entre cada índice**

Índices	Tipo de correlación	R ²	Ecuación
ISQA-ICOMI	Polinomial de grado 2	1	y= -0,0074x ² +1,0265x-35,15
BMWP-ISQA	Polinomial de grado 2	1	y= -0,223x ² +15,32x-187,69
BMWP-ICOMI	Polinomial de grado 2	1	y= 0,007x ² -0,4537x+7,64

Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Época seca

Tabla XLV. **Resultados índice BMWP**

Muestreo	1	2	3	4	5	Promedio	Calidad
Parte alta	33	29	28	20	41	29,5	Calidad mala, muy contaminada
Parte media	45	57	62	60	52	55,2	Calidad mala, contaminada
Parte baja	25	44	36	52	60	43,4	Calidad mala, contaminada

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Resultados ICOMI**

Parte	ICOMI	Contaminación
Alta	0,82	Muy alta
Media	0,77	Alta
Baja	0,81	Muy alta

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Resultados ISQA**

Parte	ISQA	Calidad
Alta	43,48	Inadmisible
Media	49,23	Inadmisible
Baja	39,54	Inadmisible

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Análisis de varianza y F de Fisher del ICOMI**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,00727	2	0,0036	3,597	0,002	4,256
Dentro de los grupos	0,00241	9	0,0003			
Total	0,00967	11				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Análisis de varianza y F de Fisher del ISQA**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	53,053	2	26,526	1,147	0,360	4,256
Dentro de los grupos	208,220	9	23,36			
Total	261,273	11				

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Análisis de varianza y F de Fisher del BMWP**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1647,17	2	823,58	2,3	0,00265	4,26
Dentro de los grupos	601,75	9	66,86			
Total	2248,92	11				

Fuente: elaboración propia.

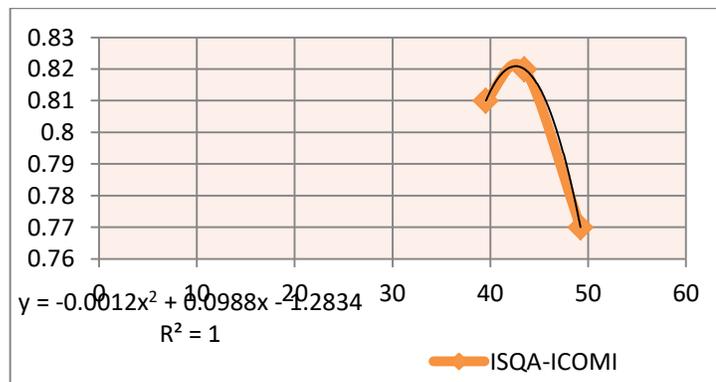
Tabla LI. **Cálculo de la correlación lineal**

Correlación	Coefficiente de correlación de Pearson (R)
ISQA-ICOMI	-0,72
ISQA-BMWP	0,55
BMWP-ICOMI	-0,73

Fuente: elaboración propia.

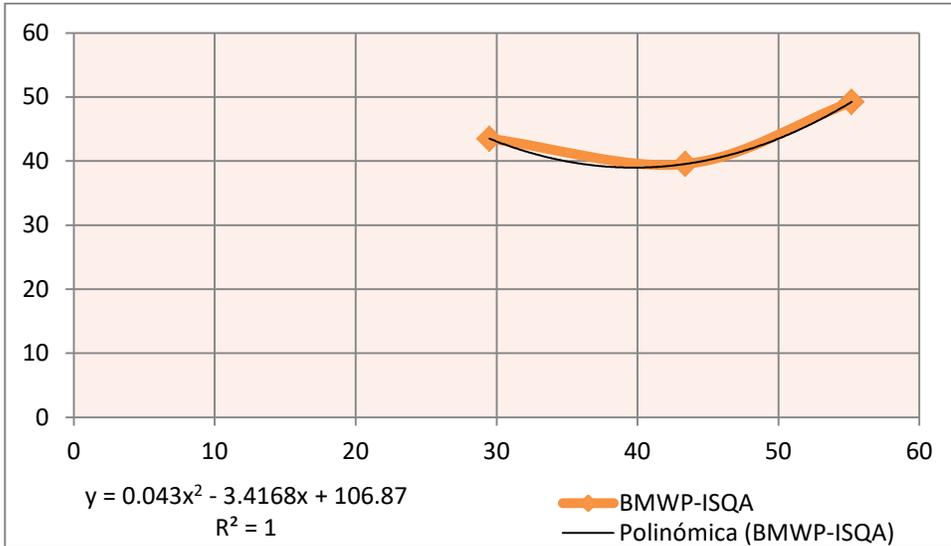
En la tabla anterior se muestra que no existe correlación lineal entre ninguno de los índices, por tanto, en las siguientes gráficas se modificó para encontrar su correlación.

Figura 11. **Correlación ISQA-ICOMI**



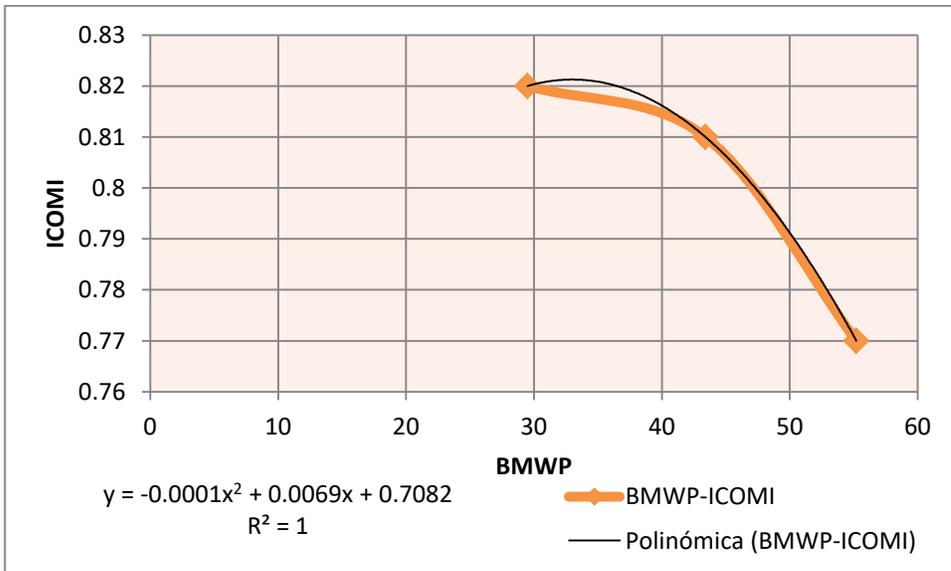
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Correlación BMWP-ISQA**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Correlación BMWP-ICOMI**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Ecuaciones de las correlaciones entre cada índice**

Índices	Tipo de correlación	R ²	Ecuación
ISQA-ICOMI	Polinomial de grado 2	1	$y = -0,0012x^2 + 0,0988x - 1,2834$
BMWP-ISQA	Polinomial de grado 2	1	$y = 0,043x^2 - 3,4168x - 106,87$
BMWP-ICOMI	Polinomial de grado 2	1	$y = -0,0001x^2 - 0,0069x + 0,7082$

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la toma de las muestras se utilizaron tres puntos, colocados en la parte alta, media y baja del río Teocinte. En la época lluviosa se realizaron 5 muestreos: el 24 de agosto de 2016 fue el primero muestreo; luego, se realizó del 21 de septiembre al 12 de octubre de 2016 (un día por semana). Se hizo de esta manera dado que se averió el equipo en el primer muestreo.

Cabe mencionar que en los primeros dos muestreos de ésta época, en la parte alta, no existen datos debido a que se inició muestreando en un punto diferente; se cambió el punto ya que existían problemas de acceso en el anterior.

En esta época, de acuerdo al índice BMWP-CR se evidenció que en la parte alta y media del río presentó una calidad del agua categorizada como mala, contaminada; esto se debe a que se identificó la mayoría de familias (parte media: 20 y parte alta: 16 familias) con puntaje de mediana a baja calidad. Las familias que más se encontraron fueron: Leptohyphidae, Baetidae (Ephemeroptera) e Hydropsychidae (Trichoptera) con puntaje 5 de calidad media y la familia Chironomidae (Diptera) con puntaje 2 de calidad baja. En la parte baja se obtuvo la calidad mala, muy contaminada por la misma causa, 16 familias fueron encontradas, en su mayoría con alta tolerancia a la contaminación.

En la parte baja se observó, en uno de los muestreos, que descargan directamente aguas residuales, puede que esta sea la causa que la calidad del agua del río disminuyera.

Según el ICOMI de la época lluviosa, se obtuvo, en la parte alta y baja, un grado de contaminación regular y en la parte media un grado de contaminación mínimo.

Debido a que el río Teocinte abastece a diferentes plantas potabilizadoras de agua, se consideró necesario hacer comparaciones de los valores de algunos parámetros conforme a normas de calidad de agua para consumo humano:

- La conductividad obtenida según las normas su valor recomendado para el consumo humano es de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en este caso no existe riesgo a la salud del consumidor con los datos obtenidos de conductividad. Según la OMS, es grato al paladar cuando los sólidos disueltos totales son menores a 600 mg/l, dado que este parámetro es directamente proporcional a la conductividad la palatabilidad es considerada buena. Según COGUANOR 29001-99, la conductividad se encuentra debajo del límite máximo aceptable para el consumo humano (750 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- La dureza obtenida en las tres partes (según la OMS) indica que son aguas blandas (<100 mg/l) y que su capacidad de amortiguación del pH es bajo y son más corrosivas para las tuberías. Según COGUANOR 29001 se encuentra debajo del LMA (100 mg/l)
- Por último, la alcalinidad obtenida en la parte alta y baja, según Massol (s/f) es regular y en la parte media la alcalinidad se categoriza como baja; es decir, su sistema amortiguador de ácidos es regular y escaso al igual que su fuente de reserva para la fotosíntesis.

Según el ISQA de la época lluviosa, en la parte alta y media se obtuvo una calidad regular, decir, la calidad del agua es ocasionalmente afectada y sus condiciones a veces no cumplen con los niveles deseados; en la parte baja se obtuvo una calidad admisible, es decir, su calidad esta frecuentemente afectada y sus condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.

En la época seca, al igual que en la lluviosa, se realizaron 5 muestreos; estos se hicieron en las fechas del 25 de enero al 22 de febrero de 2017 (un muestreo por semana).

El resultado del índice BMWP-CR indicó que en esta época en la parte baja y media del río, la calidad del agua se encuentra mala, contaminada; esto se debe a que la mayoría de familias identificadas (parte baja: 20 y parte media: 20) obtuvieron puntaje entre 1 y 5, de calidad regular a mala. Las familias que más se encontraron en estas dos partes fueron: Leptohyphidae, Baetidae (Ephemeroptera) e Hydropsychidae y Helicopsychidae (Trichoptera) con puntaje 5 de calidad regular y la familia Chironomidae (Diptera) con puntaje 2 de calidad mala. En la parte alta la calidad del agua se clasificó como mala, muy contaminada, 16 familias fueron encontradas, en su mayoría con alta tolerancia a la contaminación (puntajes entre 1 y 5). En la parte alta, las familias de las comunidades cercanas llegan a lavar la ropa a diario y esta puede ser una causa de la degradación de la calidad del agua.

En la época seca, los resultados obtenidos del ICOMI en la parte alta y baja indican que el grado de contaminación del agua es muy alta y en la parte media se clasifica como alta contaminación:

Las conductividades obtenidas según las normas CAPRE (1994), se encuentran arriba del valor recomendado para el consumo humano (400).

- $\mu\text{S/cm}$), en este caso existe riesgo a la salud del consumidor. Según COGUANOR 29001-99, la conductividad se encuentra debajo del límite máximo aceptable para el consumo humano ($750 \mu\text{S/cm}$).
- La dureza obtenida en las tres partes, según COGUANOR 29001, se encuentra arriba del LMA (100 mg/l) y debajo del LMP (500 mg/l); es decir, no es dañina para la salud del consumidor, pero si es percibida desde el punto de vista sensorial.
- Por último, la alcalinidad obtenida en las tres partes, es categorizada como regular; decir, su sistema amortiguador de ácidos es regular al igual que su fuente de reserva para la fotosíntesis.

Según el ISQA de la época seca, en las tres partes analizadas, se clasificó la calidad del río Teocinte como inadmisible; es decir, la calidad del agua es continuamente afectada y que sus condiciones no cumplen con los niveles deseados.

Se puede observar que en la época lluviosa existe una leve mejoría en la calidad del agua del río; según la Escuela Universitaria Politécnica de España los ríos tienen capacidad de regenerarse por sí mismos en el momento de admitir afluentes, en este caso la precipitación pluvial.

Según el análisis de varianzas la F de Fisher es menor a la F crítica calculada para todos los índices, es decir, las medias de los índices no difieren significativamente entre sí. El cambio de altura y distancia no afectan significativamente a los índices calculados. Por lo tanto, es factible analizar la comparación de los índices en las tres partes del río.

Un modelo de regresión, es un análisis estadístico el cual estima la relación que tienen una o más variables, utilizando una fórmula matemática para predecir una variable a partir de parámetros conocidos. En este estudio el modelo de regresión polinomial de grado 2 se adaptó mejor a los índices calculados que el modelo lineal.

Por último, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula, para ambas épocas, ya que no existe una correlación lineal entre ningún índice y por lo mismo no se puede explicar el desenvolvimiento directo de los macroinvertebrados bentónicos con respecto a la calidad fisicoquímica.

CONCLUSIONES

1. El índice de contaminación por mineralización indica que en la época lluviosa, en la parte alta y baja del río Teocinte la contaminación es clasificada como regular y en la parte media la contaminación es mínima; en la época seca existió una degradación en las tres partes, dando como resultado en la parte alta y baja la contaminación se clasificó como muy alta, y en la parte media como alta.
2. Según el índice simplificado de calidad del agua, en la época lluviosa, en la parte alta y media la calidad del agua del río Teocinte se clasificó como intermedia, y en la parte baja como admisible. En la época seca, existió una degradación considerable y se clasificó como inadmisibles en las tres partes analizadas.
3. Los resultados obtenidos según el índice BMWP-CR de la época lluviosa indican que existe en la parte alta y media una calidad mala, contaminada, y en la parte baja una calidad mala, muy contaminada. En la época seca, en la parte alta del río Teocinte, se clasificó la calidad del agua como mala, muy contaminada, en la parte baja y media se clasificó como mala, contaminada.
4. Debido a que no existe una correlación lineal entre el ICOMI y el ISQA, sino que su correlación es polinomial de grado dos, se acepta la hipótesis nula.

5. Debido a que no existe una correlación lineal entre el BMWP y el ISQA, sino que su correlación es polinomial de grado dos, se acepta la hipótesis nula.

6. Debido a que no existe una correlación lineal entre el BMWP y el ICOMI, sino que su correlación es polinomial de grado dos, se acepta la hipótesis nula.

RECOMENDACIONES

1. Agregar en futuros estudios otros índices de contaminación tales como el ICOMO (índice de contaminación por materia orgánica), el ICOSUS (índice de contaminación por sólidos suspendidos) y el ICOTRO (índice de contaminación trófica) ya que el ICOMI solo contempla contaminación de tipo inorgánica.
2. Para realizar un estudio más profundo de la calidad fisicoquímica del agua, es importante acompañar al ISQA con algún otro índice fisicoquímico de calidad. Por ejemplo, el ICA (índice de calidad del agua) que analiza nueve parámetros, entre estos los fosfatos y nitratos existentes en el agua.
3. El índice BMWP debe ser adaptado para Guatemala, ya que se podrían tener mejores resultados en las investigaciones biológicas de los cuerpos de agua.
4. Todas las municipalidades deberían de recopilar la información de la calidad del agua que cuentan en sus municipios, para poder ejecutar proyectos de protección y mejoramiento de manera adecuada dependiendo de los resultados obtenidos.
5. Se debe incentivar el uso del biomonitoreo mayoritariamente en áreas de escasos recursos, ya que es un método económico y fácil de utilizar.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACA. *Información sobre la cuenca del Henares, macroinvertebrados bentónicos*. [En línea]. <http://www.riohenares.org/index.php/riohenares/calidad-de-las-aguas/46-macroinvertebrados-bentonicos.html>. [Consulta: 2 de mayo de 2015].
2. ACUÑA CAMPOS, Esteban Stuardo. *Determinación de la calidad del agua en la subcuenca del río Quiscab, departamento de Sololá*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2013. 113. p.
3. APELLA, María C. y ARAUJO, Paula. *Microbiología de agua, conceptos básico*. [En Línea]. https://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/02_Capitulo_02.pdf. [Consulta: 15 de mayo de 2015].
4. ARRIOLA DE LEÓN RÉGIL, Ana Isabel. *Índices de calidad de agua en el río Pínula, cuenca del lago de Amatitlán*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 56 p.
5. American Water Works Association. *Agua su calidad y tratamiento*. Water21, México: 1968. 56 p.

6. CAÑAS ARIAS, Juan Sebastián. *Determinación y evaluación de índices de contaminación (ICOS) en cuerpos de agua*. [En línea]. <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/10901/1/articulo%20final.pdf>. [Consulta: 30 de mayo de 2015].
7. CAPRE. *Normas de calidad del agua para consumo humano*. [En línea]. http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/pdf/CAPRE_Normas_Regional.pdf. [Consulta: 2 de junio de 2015].
8. Carbotecnia. *Índice de saturación de Langellier*. [En línea]. <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/indice-de-langellier/>. [Consulta: 6 de junio de 2015].
9. _____. *Sólidos disueltos totales*. [En línea]. <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/solidos-disueltos-totales-tds/>. [Consulta: 6 de junio de 2015].
10. CARRERA REYES, Carlos; FIERRO PERALBO, Karol. *Manual de monitoreo, los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. [En línea]. agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300087851. [Consulta: 15 de junio de 2015].
11. COGUANOR. *Agua potable* [En línea]. <http://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2015/07/04-COGUANOR-NTG-29-001-1a-Revision.pdf>. [Consulta: 26 de junio de 2015].

12. DIGECA *Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales*. [En línea]. http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/de-33903reglamento_evaluacion_clasificacion_cuerpos_de_agua_0.pdf. [Consulta: 2 de julio de 2015].
13. El agua en Navarra. *Características microbiológicas*. [En línea]. http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Agua/Documentacion/Parametros/CaracteristicasMicrobiologicas.htm. [Consulta: 9 de septiembre de 2015].
14. Escuela Universitaria Politécnica. *Características físicas y organolépticas*. [En línea]. http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Caracteristicas_fisicas_y_organolepticas.asp. [Consulta: 9 de julio de 2015].
15. Escuela Universitaria Politécnica. *Los ríos*. [En línea]. http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Rios.asp. [Consulta: 15 de julio de 2015].
16. FERNÁNDEZ, P; DÍAZ, P. *Relación entre variables cuantitativas*. [En línea]. http://www.fisterra.com/mbe/investiga/var_cuantitativas/var_cuantitativas.asp#Bibliografía. [Consulta 24 de julio de 2015].
17. Franco, Irene. *Calidad del agua del canal de Chiquimulilla dentro del complejo de humedales Marino-Costeros Iztapa, Escuintla – La Candelaria, Taxisco, Santa Rosa, Guatemala*. Trabajo de

graduació. Faculta de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 116.p.

18. FROST, Jim. *Understanding analysis of variance ANOVA and the F-test*. [En línea]. <http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/understanding-analysis-of-variance-anova-and-the-f-test>. [Consulta: 30 de julio de 2015].
19. GARCÍA, Cristina. *Parámetros fisicoquímicos del agua*. [En línea]. <http://albeitar.portalveterinaria.com/noticia/12664/articulos-otros-temas/parametros-fisicoquimicos-del-agua.html>. [Consulta: 2 de septiembre de 2015].
20. IARNA. *Calidad del agua*. [En línea]. http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/3/3_Calidad_del_agua.pdf. [Consulta: 15 de septiembre de 2015].
21. IARNA. *Contaminación ambiental*. [En línea]. http://www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_08-3.6_clima.pdf. [Consulta: 24 de septiembre de 2015].
22. Inspiration. *Contaminación del agua*. [En línea]. <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/contaminacion/contaminacion-del-agua>. [Consulta: 30 de septiembre 2015].
23. _____. *Contaminación del suelo*. [En línea]. <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/contaminacion/contaminacion-del-suelo>. [Consulta: 2 de octubre de 2015].

24. _____. *Contaminación térmica*. [En línea]. <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/contaminacion/tipos-de-contaminacion/contaminacion-termica>. [Consulta: 6 de octubre de 2015].
25. ITIS. *Integrated taxonomic information system*. [En línea]. <https://www.itis.gov/>. [Consulta: 9 de octubre de 2015].
26. Lenntech. *Nitratos rotterdamseweg*. [En línea]. <http://www.lenntech.es/nitratos.htm>. [Consulta: 16 de octubre de 2015]
27. MARTÍNEZ, Camacho. *Coefficiente de correlación lineal de Pearson* [En línea]. <http://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>. [Consulta: 26 de mayo de 2015].
28. MARTÍNEZ ROJAS, Oswaldo Efraín. *Determinación de la calidad fisicoquímica del agua del Canal de Chiquimulilla en la Reserva Natural de Usos Múltiples, Monterrico*. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2012. 146 p.
29. MASSOL, Arturo. *Parámetros físico-químicos alcalinidad*. [En línea]. <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>. [Consulta: 20 de octubre de 2015].
30. METAS. *Medición de turbidez en la calidad del agua*. [En línea]. <http://www.metas.com.mx/guiametas/la-guia-metas-10-01-turbidez.pdf>. [Consulta: 24 de octubre de 2015].

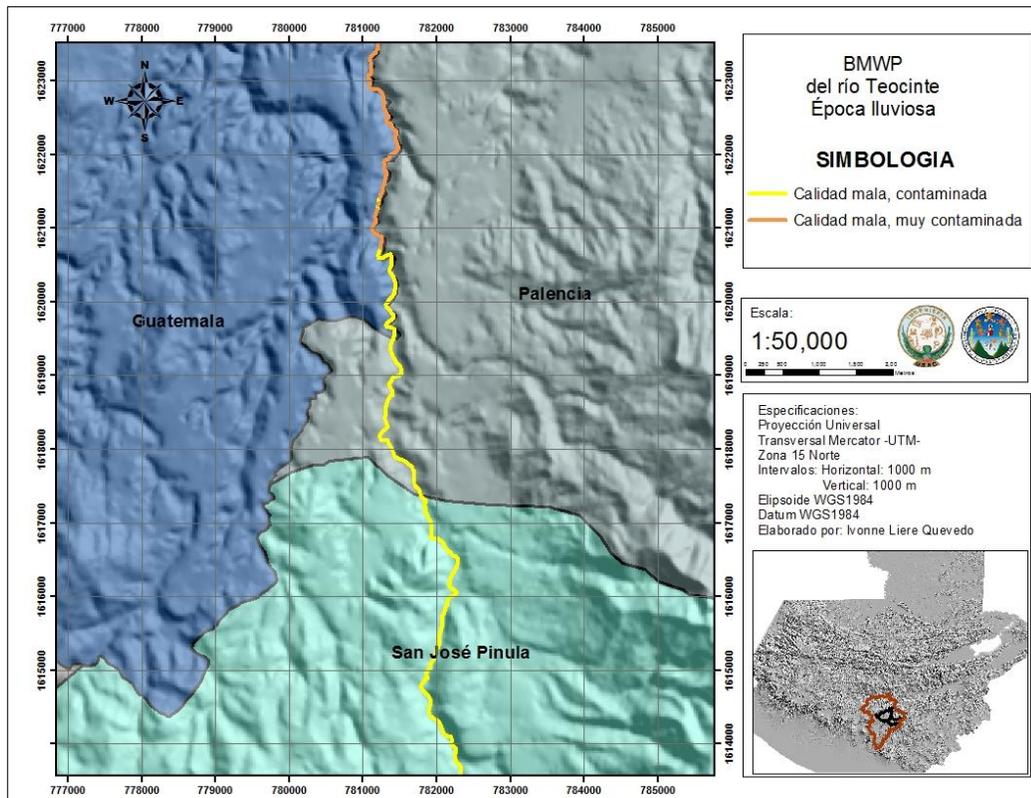
31. NIEVES, Antonio; DOMÍNGUEZ, Federico. *Probabilidad y estadística para ingeniería*. [En línea]. <http://www.mcgraw-hill.com.mx/pye01e/>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
32. Organización Mundial de la Salud. *Guía para la calidad del agua potable*. [En línea]. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lo wsres.pdf. [Consulta: 28 de octubre de 2015].
33. ONU. *Calidad del agua*. [En línea]. <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>. [Consulta: 30 de octubre de 2015].
34. PAYERAS, Antoni. *Parámetros de calidad de las aguas de riego*. [En línea]. [http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/parametros-de-calidad-de-las-aguas-de-riego/#Conductividad y Resistividad](http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/parametros-de-calidad-de-las-aguas-de-riego/#Conductividad%20y%20Resistividad). [Consulta: 31 de octubre de 2015].
35. PRTR. *Carbono orgánico total*. [En línea]. <http://www.prtr-es.es/Carbono-organico-total-COTComo-C,15663,11,2007.html>. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].
36. QUIJANO, Yovany. *Análisis de varianza de un factor*. [En línea]. https://www.youtube.com/watch?v=REV9CUnb_2U. [Consulta: 6 de noviembre de 2015].
37. RAMÍREZ, A; RESTREPO; VIÑA G. *Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y*

- aplicación.* [En línea].
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009. [Consulta: 9 de noviembre de 2015].
38. REYNAGA, Jesús. *Prueba de asociación de dos variables (o dos continuas sin distribución normal)*. [En línea].
http://www.facmed.unam.mx/deptos/salud/censenanza/planunico/spii/antologia/28_2_Spearman.pdf. [Consulta: 10 de noviembre de 2015].
39. RIVERA MÉNDEZ, Jorge Leonel. *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la parte alta de la cuenca Del Rio Naranjo, ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería. sanitaria y recursos hidráulicos. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 162 p.
40. ROLDÁN, Gabriel. *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*. Trabajo de gradación. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2002. 216 p.
41. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del agua*. 3ra. Ed. Colombia: Reviews, 2009. 136 p.
42. RWL, Water Group. *Parámetros fisicoquímicos del agua*. [En línea].
http://www.unitek.com.ar/productos-lecho-mixto.php?id_lib_tecnica=6. [Consulta: 11 de noviembre 2015].

43. SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua, evaluación y diagnóstico*. Medellín-Colombia: Universidad de Medellín 2011. 213 p.
44. SNET. *Índice de calidad del agua, ICA*. [En línea]. <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>. [Consulta: 13 de noviembre de 2015].
45. UDLAP. *Dureza del agua*. [En línea]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf. [Consulta: 15 de noviembre de 2015].
46. Universidad Politécnica de Cartagena. *Análisis de aguas*. [En línea]. https://www.upct.es/~minaeees/analisis_aguas.pdf. [Consulta: 20 de noviembre de 2015].
47. USGS. *A primer on water quality*. [En línea]. <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-027-01/>. [Consulta: 25 de noviembre de 2015].
48. USNLM. *Contaminación del aire*. [En línea]. <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/airpollution.html>. [Consulta: 30 de noviembre de 2015].

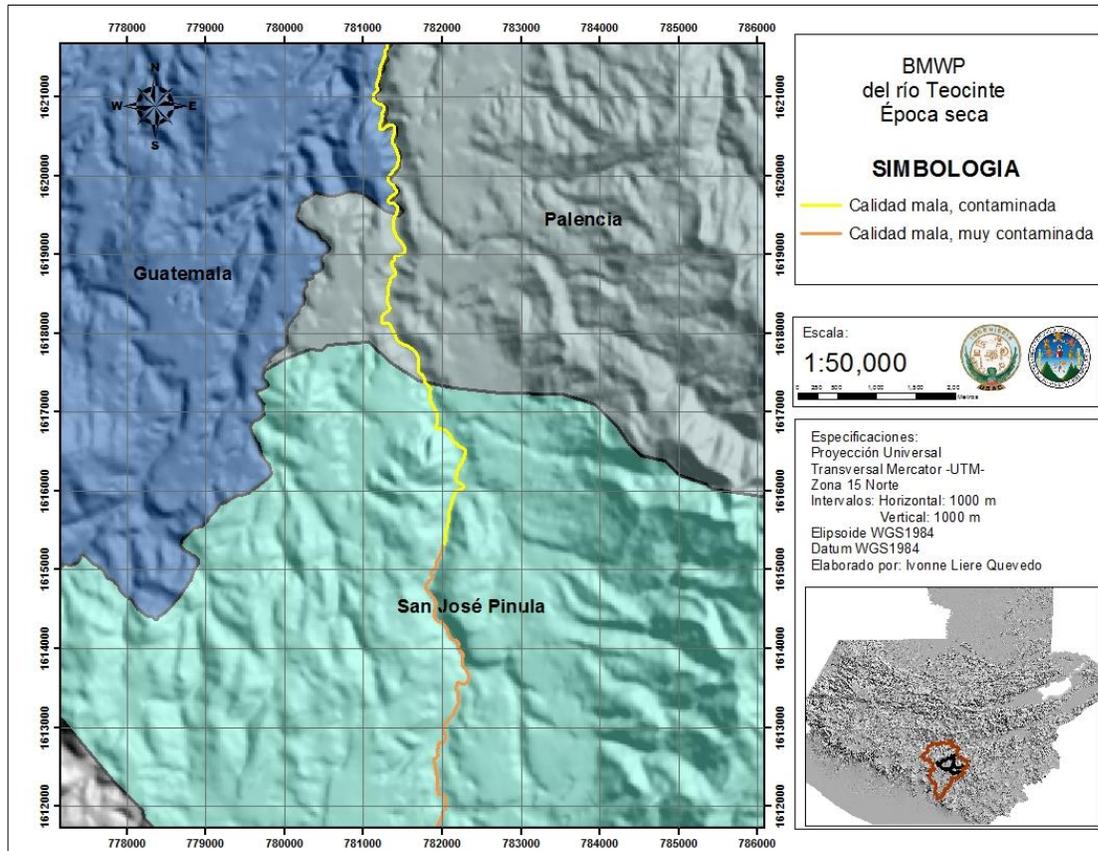
APÉNDICES

Apéndice 1. **BMWP de la época lluviosa del río Teocinte**



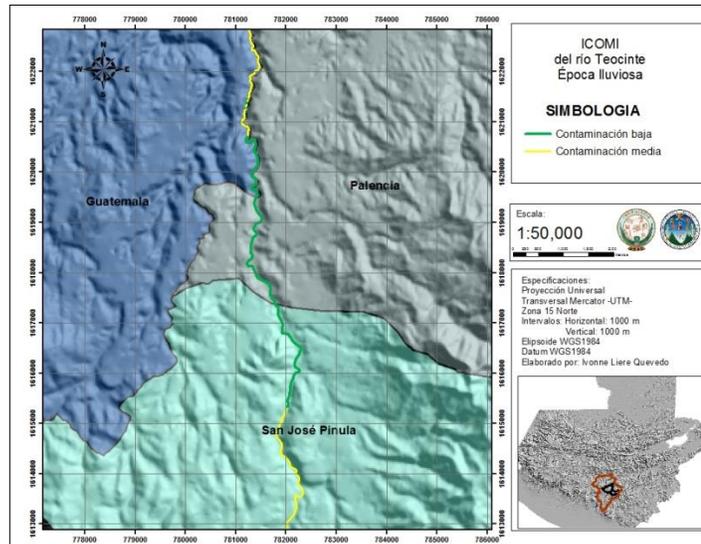
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **BMWP de la época seca del río Teocinte**



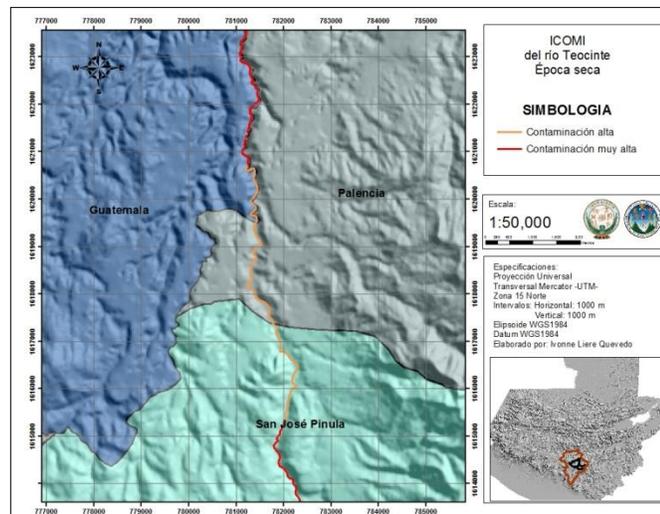
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. ICOMI de la época lluviosa del río Teocinte



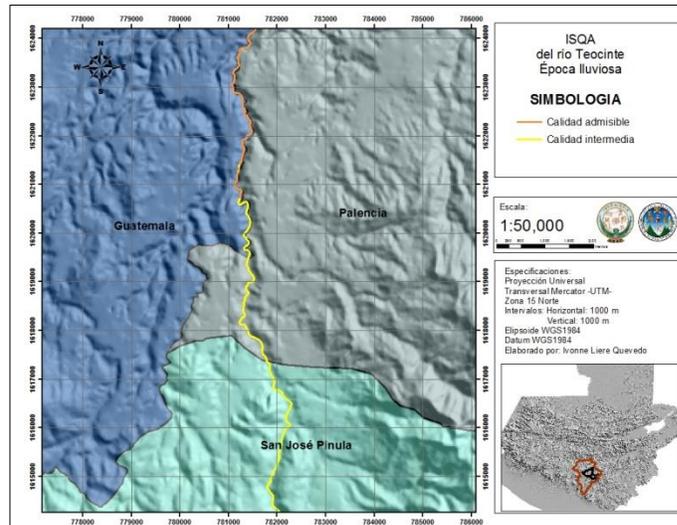
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. ICOMI de la época seca del río Teocinte



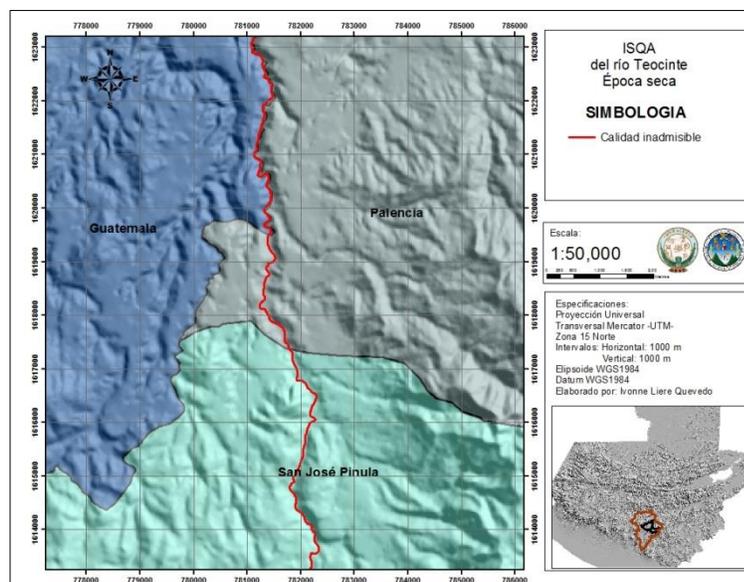
Fuente: elaboración propia.

Apéndice. 5. ISQA de la época lluviosa del río Teocinte



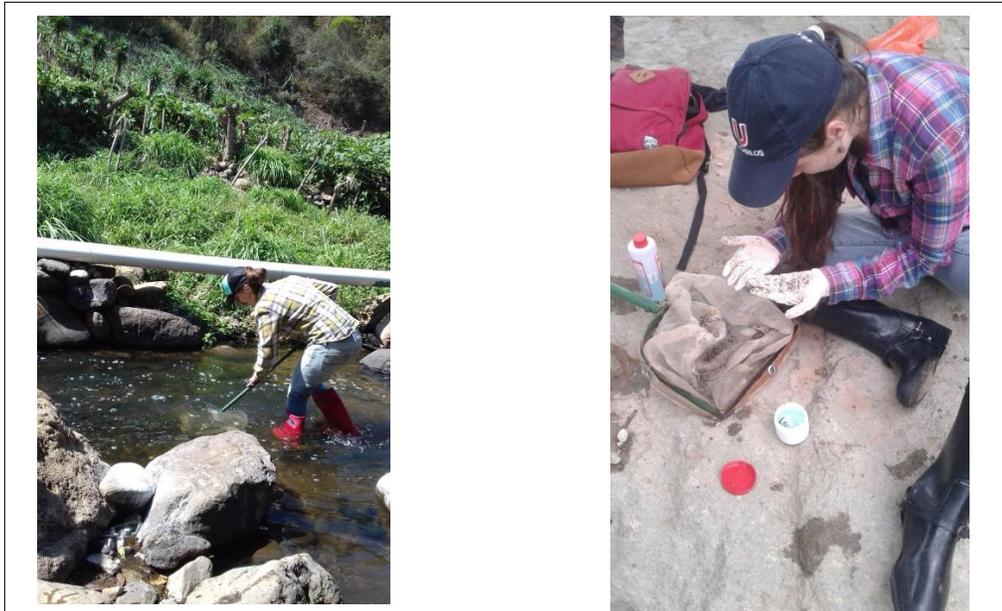
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. ISQA de la época seca del río Teocinte



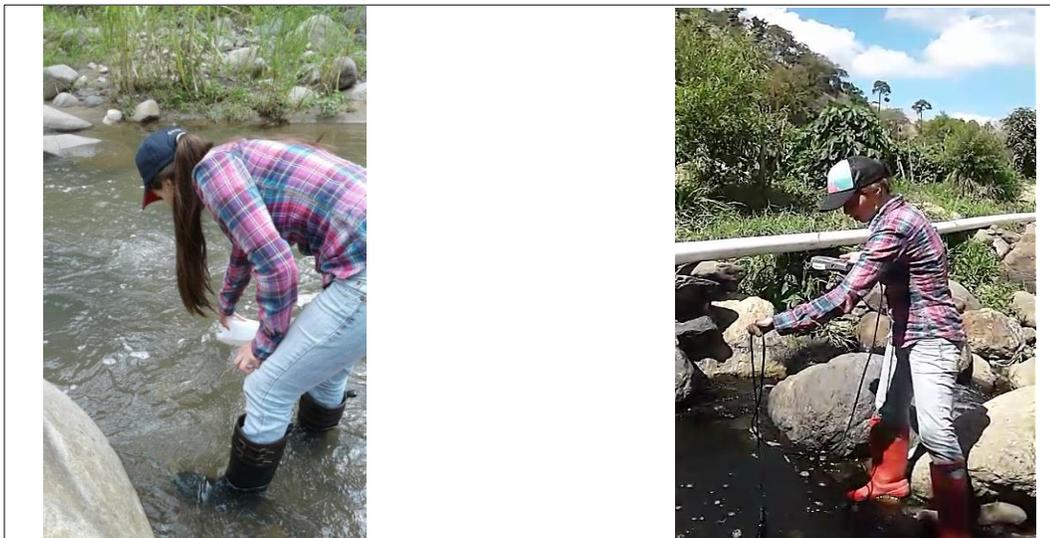
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Recolección de macroinvertebrados en el río Teocinte**



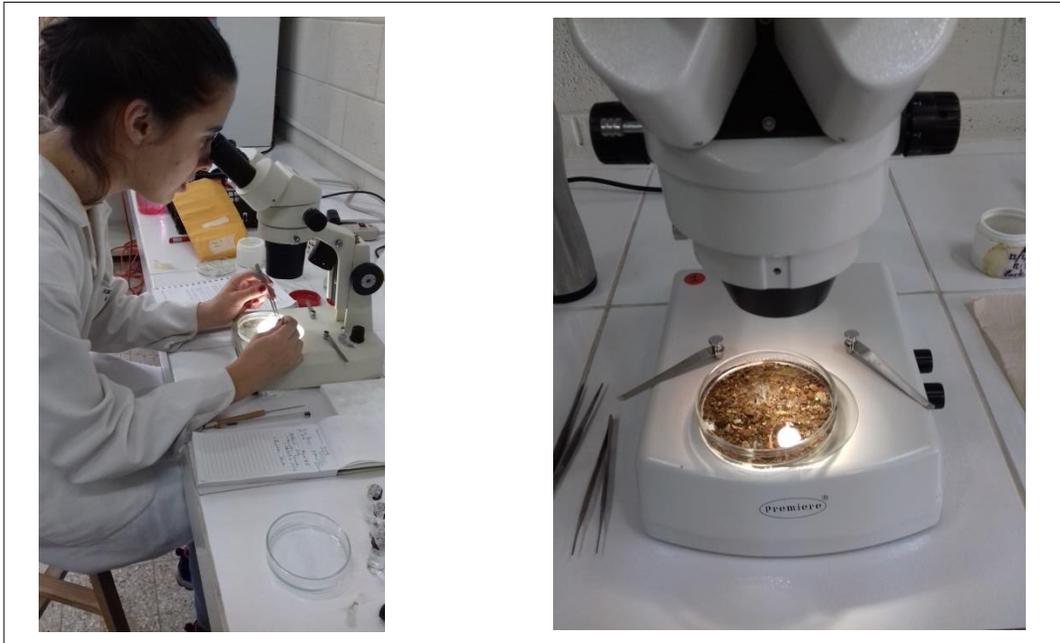
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Recolección de agua y parámetros fisicoquímicos *in situ***



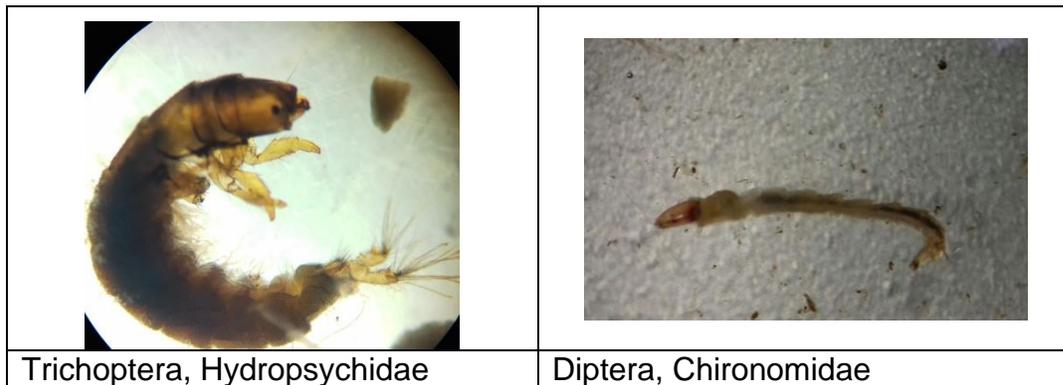
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Identificación de macroinvertebrados en el laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Familias de macroinvertebrados más comunes
obtenidos en las muestras**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Familias de macroinvertebrados más comunes
obtenidos en las muestras**

	
Ephemeroptera, Baetidae	Ephemeroptera, Leptohyphidae

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Rangos de alcalinidad

RANGO	ALCALINIDAD (mg/L CaCO ₃)
BAJA	< 75
MEDIA	75 - 150
ALTA	> 150

Fuente: MASSOL, Arturo. *Parámetros físico-químicos: alcalinidad* <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alkalinidad.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2015.

Anexo 2. Parámetros físico-químicos de las normas CAPRE

Parámetro	Unidad	Valor Recomendado	Valor máximo Admisible
Temperatura	°C	18 a 30	
Concentración de Iones Hidrógeno	Valor pH	6.5 a 8.5 (a)	
Cloro Residual	mg/L	0.5 a 1.0 (b)	(c)
Cloruros	mg/L	25	250
Conductividad	µS/cm	400	
Dureza	mg/L CaCO ₃	400	
Sulfatos	mg/L	25	250
Aluminio	mg/L		0.2
Calcio	mg/L CaCO ₃	100	
Cobre	mg/L	1.0	2.0
Magnesio	mg/L CaCO ₃	30	50
Sodio	mg/L	25	200
Potasio	mg/L		10
Sólidos Disueltos Totales	mg/L		1000
Zinc	mg/L		3.0

Fuente: CAPRE. *Normas de calidad del agua para consumo humano* http://biblioteca.enacalhumano.com.ni/bibliotec/Libros/pdf/CAPRE_Normas_Regional.pdf. Consulta: 12 de noviembre de 2015.

Anexo 3. Características químicas que debe tener el agua para consumo humano según COGUANOR NTG 29001

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	----

a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia.
b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.

Fuente: COGUANOR. *Agua para consumo humano (agua potable)*. <http://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2015/07/04-COGUANOR-NTG-29-001-1a-Revision.pdf>. Consulta

13 de noviembre de 2015.