CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE EL SANEAMIENTO AMBIENTAL Y LA CALIDAD DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO AQUIARES, TURRIALBA, COSTA RICA

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Marcos Antonio Hughes Arrocha

Turrialba, Costa Rica

2020

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

***MAGISTER SCIENTIAE* EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:

Alejandro Imbach, Dr.H.C.
Codirector de tesis

Laura Benegas, Ph.D.
Codirectora de tesis

Ney Ríos, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado

Marcos Antonio Hughes Arrocha
Candidato

Biografía

El autor Marcos Antonio Hughes Arrocha nació en Colón, provincia caribeña del país de Panamá. Hijo de Marcos Antonio Hughes Ceballos y Gladys Esther Arrocha Ortíz, a quienes amo con todo mi corazón y vieron crecer a mi persona en las riberas del lago Gatún, en la comunidad de Limón, perteneciente al corregimiento de Limón del lago, distrito de Colón.

Empecé mis estudios de primaria en la Escuela Efraín Tejada Urriola, cuya vista permite observar el majestuoso lago Gatún, lugar de muchas de mis historias como morador de ese hermoso escenario, desde primero hasta sexto grado. En el año 2000, realicé mis estudios de secundaria hasta el 2005, en el Colegio Abel Bravo donde obtuve el bachiller en Ciencias.

En el 2011 culminé mis estudios de Licenciatura en Biología con énfasis en Biología Ambiental en la Universidad Nacional de Panamá. En el 2012, obtuve un profesorado de Segunda Enseñanza con orientación en Biología Ambiental en la Universidad Especializada de las Américas. En el año 2014 obtuve un Posgrado en Docencia Superior e Investigación en la Universidad Nacional de Panamá.

He participado en varios seminarios y congresos científicos, incluso siendo invitado por parte del Ministerio de Educación de Panamá (MEDUCA) como expositor en el 2017, en el I Congreso Científico “Un enfoque Creativo, Contextualizado y Sostenible”.

En enero del 2019, llegué al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, para cursar estudios en la maestría de Manejo Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, con el objetivo de mejorar mi nivel académico y profesional para compartir el conocimiento adquirido con mis estudiantes y las comunidades. Mi deseo es aportar a mi país en temáticas de gestión y manejo de los recursos naturales a nivel de cuencas hidrográficas, pues Panamá cuenta con la bendición de abundante recurso hídrico que forman parte de la economía y desarrollo del país; por ejemplo, contamos con muchos ríos que cruzan nuestro territorio, lagos en varias zonas que son fuente de alimento para habitantes de comunidades aledañas a los embalses y en especial la conservación y protección del Canal de Panamá, principal fuente de ingreso del PIB de mi amado Panamá.

Con el fin de fortalecer mi preparación didáctica y en las ciencias para el servicio del sistema educativo y social, culmino este estudio de maestría, que ha desarrollado en mí los más grandes valores de solidaridad, protección al medio ambiente, trabajo en conjunto con los gobiernos locales y la gran oportunidad de servicio y convivencia con profesionales de distintas partes de América Latina en beneficio de la protección del recurso hídrico.

Dedicatoria

A Dios, por ser el dueño de mi vida, del Universo, creador de la Tierra, el agua, la naturaleza, la luz. Sin su ayuda, consuelo, amor y su Espíritu en mí no podría estar vivo en medio de la convulsa época a nivel general y mundial, la cual nos tocó vivir en el lugar de estudio CATIE con la pandemia del Covid-19.

Dios, creador de los cielos y la tierra, cumplió su propósito y sueño en mí, al permitirme estudiar en CATIE, centro de estudios de tan alto nivel internacionalmente.

A mis padres, Marcos Antonio Hughes Ceballos y Gladys Esther Arrocha Ortíz, quienes siempre me impulsaron y motivaron para continuar este reto con fe y dedicación, pensando que el día de mañana sería mejor. A mi hermano, Eric Hughes y su familia, por ser parte del proceso de estudio al preocuparse, orar por mí y estar pendiente de mi salud y avance. A mi novia, María Isabel por apoyarme y animarme en medio de los momentos difíciles que afronte en la maestría, sin ti hubiese sido mucho más complicado alcanzar la meta.

A mis abuelos paternos, Elvia Ceballos (q.p.d) y Marcos Hughes García (q.p.d) y maternos, Clemencia Ortíz (q.p.d) y Ernesto Arrocha (q.p.d), pues siempre me dieron lo mejor, su tiempo, consejos y cariño, lucharon por sus familias y nunca dejaron de creer en sus generaciones, mi abuelo el tigre Marcos Hughes (q.p.d) mil gracias por su liderazgo innato, espíritu de servicio a favor de las comunidades y nuestra familia.

A mis alumnos en Panamá, a los cuales les quiero compartir el conocimiento adquirido para que sean personas que aporten valores positivos a nuestra provincia de Colón y nuestro país, ya que mi deseo es que prosperen y que sus familias salgan adelante.

Agradecimientos

A Dios, por guiarme y sostenerme en todo este periodo de estudio.

A mi familia paterna (el familión Hughes) y la materna (los Arrochas), a mi novia María Isabel Varela y familia, por su apoyo incondicional en toda esta etapa. A mis tíos, primos, a mis pastores y miembros de la iglesia, en mi amada comunidad de Limón y en Turrialba, quienes nunca dejaron de orar por mí, por fortaleza cuando me sentía enfermo, cansado y decaído, de veras mil gracias, pues por su apoyo y fuerza logré alcanzar por fin la victoria, como esboza las gloriosas notas del Himno Nacional de mi amada patria.

A mis profesores asesores, Alejandro Imbach, Laura Benegas y Ney Ríos, por guiarme en la temática elegida, ya que con sus aportes y sabiduría pude reinventarme en miras de formarme como investigador.

A mis compañeros de chilinkis, Estefany, el Tigre, Fabi, Majito, Poly y mi Cary, por tantos momentos compartidos, a mis compañeros de maestría, Cristina (Mi chombis), Eduardo y Cesar, por cada momento de retos, risas y vivencias dentro y fuera de las aulas. Sería incapaz de dejar de mencionar a mis compañeros, amigos y hermanos de toda la generación 2019-2020, con los cuales compartí muchas vivencias, giras, tiempo de estudio, juegos, fiestas y comidas. Esos momentos me ayudaron a completar la maestría con muchísimos recuerdos de cada nación hermana, plasmando en mi persona la importancia de valorarnos como hermanos, de veras mil gracias por todo.

A Abad Conde, por siempre mostrarse amigo y hermano, pues en los momentos difíciles, al comienzo de la maestría, sacaba de su tiempo para explicarme, hermano boliviano nunca olvidare ese gesto de solidaridad que demuestra lo grande que es usted, un hombre siempre dispuesto a servir, gracias por todo hermano, Dios lo cuide a usted y a toda la familia allá en su hermosa patria.

A mi hermano, el mero Toro del bajo Aguán (Alberto Iraheta), de Sonaguera, Colón, Honduras, por ser mi maestro en Sistema de Información Geográficas, hermano gracias pues con paciencia y corrección, lograste plasmar en mí el reto de aprender estas herramientas de mucho valor en nuestras áreas de estudio. Mil gracias por todo hermano, deseo que Dios te bendiga siempre.

A Don Juancito Rojas, el hombre grande de Aquiares y su esposa Doña Cristina Aguilar, por recibirnos en su casa en la etapa de exploración de la microcuenca, por usted Don Juancito logré conocer la majestuosa catarata del río Aquiares y su historia. Muchas gracias por los días de café compartidos junto a mis amigos Luis y Caridad, fueron momentos imborrables que quedaran grabados en este servidor de por vida.

A mi directora, Gricelda Brenes Vado del CEBG República del Paraguay en mi amada provincia de Colón, siempre estaré agradecido por el apoyo durante el tiempo de estudio, gracias por animarme a continuar y por mostrarme que “si todos queremos juntos podemos”.

Al Centro de Investigación de Servicios Químicos y Microbiológicos CEQIATEC de la Universidad Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el acompañamiento en la toma de muestras de parámetros fisico-químicos y biológicos en la microcuenca del río Aquiares. A Sarita y su apoyo en el Laboratorio de la Universidad de Costa Rica en la identificación de los macroinvertebrados.

Agradecerles profundamente a los representantes de las juntas directivas de las ASADAS dentro de la microcuenca del río Aquiares, por brindarme el apoyo incondicional en los procesos de recolección datos y entrevistas relacionadas al papel de los acueductos rurales en la conservación del agua. En especial a Ricardo González administrador de la Asada de Mora, y las demás ASADAS que componen la microcuenca del río Aquiares en la hermosa Turrialba, como lo son la ASADA Carmen Lira, ASADA El Mora, ASADA nuevo Horizontes, ASADA Santa Cruz, ASADA Sictaya, ASADA Torrealba y la ASADA Aquiares.

A las instituciones públicas como La Municipalidad de Turrialba, SENASA, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), MINAE, Ministerio de Salud, SENARA por su ayuda en la recolección de datos estadísticos.

Contenido

Biografía III

Dedicatoria IV

Agradecimientos V

Listado de Figuras X

Lista de Acrónimos, Abreviaturas y Unidades XII

Artículo. Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del río Aquiares, Turrialba, Costa Rica. XIII

1. Introducción 1

2. Metodología 4

2.1 Ubicación del área de estudio 4

2.1.2 Ubicación de puntos de muestreo en el río Aquiares 4

2.1.3 Descripción de puntos de muestreo 7

2.2 Biomonitoreo de calidad de agua superficial en el río Aquiares 9

2.2.1 Fase de campo 10

2.2.2 Identificación de macroinvertebrados en laboratorio 11

2.2.3 Análisis de datos y cálculo del índice BMWP-CR 11

2.3 Monitoreo de calidad del agua en el río Aquiares 11

2.3.1 Toma de muestras de parámetros físico-químicos y biológicos en el río Aquiares 12

2.3.2 Determinación de puntos de muestreo de análisis físico-químicos y biológicos 18

2.4 Relación del índice biótico BMWP-CR con el monitoreo de análisis de parámetros fisicoquímicos y biológico de calidad de aguas del río Aquiares 18

2.5 Identificación y evaluación de las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares 21

3. Resultados 22

3.1 Biomonitoreo de calidad de aguas en el río Aquiares 22

3.1.1 Descripción de resultados según el índice biótico BMWP-CR 27

3.2 Monitoreo de análisis físico-químicos de calidad de aguas del río Aquiares 32

3.3 Relación del índice biótico BMWP-CR con el monitoreo de análisis de parámetros fisicoquímicos y biológico de calidad de aguas del río Aquiares 37

3.4 Identificación y evaluación de las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares 42

3.4.1 Percepción de las Instituciones 44

3.4.3 Percepción de las ASADAS 45
3.4.4 Percepción de posibles fuentes de contaminación 46
4. Discusión 47
4.1 Biomonitoreo de calidad de aguas en el río Aquiares según el índice BMWP-CR.... 47
4.2 Monitoreo de calidad de aguas del río Aquiares 49
4.3 Relación del índice biótico BMWP-CR con el monitoreo de análisis físico-químicos y biológicos de calidad de agua en el río Aquiares 53
4.4 Identificación y evaluación de las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares 54
5. Conclusiones 55
6. Recomendaciones 57
7. Referencias bibliográficas 58
8. Anexos 63

Listado de cuadros

Cuadro 1. Ubicación de puntos de muestreo de evaluación de calidad en el río Aquiares… 6

Cuadro 2. Parámetros utilizados con límites permitidos, por el reglamento para la determinación de la calidad de aguas superficiales según clase de agua en Costa Rica. 12

Cuadro 3. Parámetros físico-químicos utilizados en el monitoreo de calidad de agua superficial en el río Aquiares. 14

Cuadro 4. Fórmulas para el cálculo del subíndice (SI), según la propuesta ICA de Calvo-Brenes para indicadores de la calidad del agua del río Aquiares, a través de una estandarización de la concentración de cada indicador. Fuente (Calvo-Brenes 2019). 19

Cuadro 5. Índice biótico BMWP-CR, cantidad de organismos, presencia de órdenes y familias de macroinvertebrados bentónicos encontrados en puntos de muestreo (P1-P12), en la microcuenca del río Aquiares. 23

Cuadro 6. Comportamiento del índice BMWP-CR, uso del suelo y calidad de agua según puntos de biomonitoreo de macroinvertebrados en la microcuenca del río Aquiares. 31

Cuadro 7. Resultados de DBO y DQO según puntos de monitoreo de calidad de agua en el río Aquiares. 33

Cuadro 8. Resumen de resultados de parámetros físico-químicos y biológicos, según puntos de muestreo en el río Aquiares. 35

Cuadro 9. Valor de índices BMWP’CR-ICA, usos de suelo según puntos de muestreo en la microcuenca del río Aquiares. 38

Listado de Figuras

Figura 1. Ubicación de la microcuenca del río Aquiares. 4
Figura 2. Distribución espacial de puntos de muestreo a lo largo del río Aquiares. 5
Figura 3. Biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos en el río Aquiares. 11
Figura 4. Toma de muestras de análisis físico-químicos y biológicos en los sitios de la investigación en el río Aquiares. 13
Figura 5. Puntos de muestreo de análisis fisico-químicos y biológicos de calidad de aguas en el río Aquiares..... 18
Figura 6. Resultado del biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos con la aplicación del índice biótico BMWP-CR en puntos de muestreo en la microcuenca del río Aquiares. 22
Figura 7. Resultados del índice BMWP-CR, cobertura y uso del suelo en la microcuenca del río Aquiares según puntos de biomonitoreo. 29
Figura 8. Posibles fuentes de contaminación por producción pecuaria en la microcuenca del río Aquiares. 30
Figura 9. Presencia de órdenes de macroinvertebrados bentónicos por puntos de muestreo a lo largo del río Aquiares. 32
Figura 10. Puntos de muestreo de relación de los índice BMWP'CR con el índice ICA propuesto por (Calvo-Brenes 2013). 37
Figura 11. Relación de los índices BMWP-CR-ICA en los diferentes puntos de muestreo de la microcuenca del río Aquiares 41
Figura 12. Posibles fuentes de contaminación del sector industrial en la microcuenca del río Aquiares. 42
Figura 13. Posibles fuentes de contaminación por producción animal en la microcuenca del río Aquiares. 43
Figura 14. Posibles fuentes de contaminación por producción de cultivos en la microcuenca del río Aquiares. 43
Figura 15. Posibles fuentes de contaminación indicadas por las instituciones (eje X las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca y en el eje Y los resultados de las percepciones de las instituciones en %). 44

Figura 16. Percepción de las instituciones con referencia a la calidad del agua del río Aquiares (eje X la percepción de la calidad del agua del río y en el eje Y los resultados de las percepciones de las instituciones en %). 45
Figura 17. Percepción de las ASADAS con referencia a la calidad del agua del río Aquiares (eje x percepción sobre la calidad del agua del río Aquiares y en el eje Y los resultados de las percepciones de las ASADAS en %). 46

Lista de anexos

Anexo 1. Cálculo del subíndice ICA por parámetros en puntos de muestreo de la microcuenca del río Aquiares, según la propuesta de Guillermo Calvo Brenes para aguas superficiales de Costa Rica. 63
Anexo 2. Biomonitoreo de calidad de agua a través de macroinvertebrados bentónicos en el río Aquiares 64
Anexo 3. Muestreo de análisis físico-químicos y biológicos de calidad de aguas. 66
Anexo 4. Actores clave en toma de decisiones en la microcuenca entrevistados. 66
Anexo 5. ASADAS 67
Anexo 6. Usuarios no familiares del agua en la microcuenca encuestados 68

Lista de Acrónimos, Abreviaturas y Unidades

APHA: American Public Health Association

ASADAS: Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios

AWWA: American Water Works Association

BMWP-CR: Biological Monitoring Working Party- modificado para Costa Rica

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CEQIATEC: Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos

CF: Coliformes fecales

DBO: Demanda biológica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

ICA: Índice de Calidad de Agua

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica

MEDUCA: Ministerio de Educación

µm: Micrómetros

mg/L: Miligramos por litro

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica

µS/m: Conductividad Eléctrica

mL: Mililitro

N: Nitrógeno

NMP/100 mL: Número más probable

OD: Oxígeno Disuelto

OMS: Organización Mundial de la Salud

P: Fósforo

pH: Potencial de Hidrógeno

PIB: Producto Interno Bruto

SD: Sólidos disueltos

SENARA: Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento

SENASA: Servicio Nacional de Salud Animal

WEF: The World Economic Forum

Artículo. Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del río Aquiares, Turrialba, Costa Rica.

Hughes Marcos[1], Imbach Alejandro[2], Benegas Laura[2], Ríos Ney[3]

Resumen

La contaminación en la microcuenca del río Aquiares, ubicado en Turrialba, Costa Rica, es el principal foco de interés. La presente investigación aborda el problema en la búsqueda de una relación entre la calidad del agua y todas las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca usando el biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos y aplicando el índice BMPW-CR, el análisis fisicoquímico y la información biológica asociado con las condiciones de calidad del agua. El monitoreo biológico se realizó en 12 puntos de muestreo a lo largo de la microcuenca del río Aquiares mientras que el análisis fisicoquímico se realizó en 9 de los 12 puntos de muestreo. Cada punto de muestreo fue georreferenciado y mapeado usando un sistema de información geográfico. Un modelo de elevación digital fue empleado para retratar las diferencias en altitud, pendiente y zonas de vida dentro de la microcuenca. Resultados obtenidos del índice biótico BMPW-CR muestran la existencia de 1,551 individuos distribuidos en 13 órdenes y 33 familias, donde *Libellulidae, Hydropsychidae, Baetidae, Simuliidae y Elmidae* son las familias que prevalecen. Los órdenes de mayor prevalencia son Odonato, Dípteros, Efemeróptera, Tricoptera, Coleóptera, y Hemíptera. En general, el índice biótico BMPW-CR mostró calidad regular del agua con una gran densidad de material eutrófico con contaminación moderada en 8 de los 12 puntos muestreados. Los puntos de muestreo 1, 2 y 3 evidenciaron bajos índices de BMPW-CR indicando aguas contaminadas, probablemente causadas por contaminación proveniente de personas que habitan los poblados en las zonas bajas de la microcuenca. Sin embargo, el punto 9, localizado en la sección media de la microcuenca, mostró un valor bajo del índice BMPW-CR como indicador de una baja calidad de agua probablemente causado por fuentes de contaminación difusa como la eliminación de aguas residuales provenientes de la agricultura o actividades agrícolas resultantes de la parte alta de la microcuenca. Nueve análisis fisicoquímicos y análisis biológicos se utilizaron para comprobar la calidad del agua, entre ellos pH, coliformes fecales y nitrógeno, los cuales evidenciaron contaminación por coliformes fecales en los puntos de muestreo 1 y 2 cuando éstos son comparados con los niveles permitidos en la regulación de agua superficial de Costa Rica. La presencia de altos niveles de DBO en 5 puntos de muestreo y DQO en 7 de los 9 puntos indican contaminación de fuentes orgánicas. En general, 5 puntos de muestreo revelaron que el río Aquiares está sufriendo cambios que pueden cambiar la composición natural de la cuenca.

Palabras claves: macroinvertebrados bentónicos, calidad del agua, índice biótico BMPW-CR, río Aquiares, parámetros fisicoquímicos, cuencas hidrográficas, contaminación difusa.

Article Water quality assessment in the Aquiares river micro basin in Turrialba, Costa Rica.

Hughes Marcos[1], Imbach Alejandro[2], Benegas Laura[2], Ríos Ney[3]

Abstract

Contamination of the Aquiares river micro basin, located in Turrialba Costa Rica, is a primary concern. The present research addressed this problem seeking a relationship between water quality and all possible sources of contamination in the basin by using biomonitoring of benthonic macroinvertebrates and applying the use of BMPW-CR index, Physico-chemical analysis and biological information associated with water quality conditions. The biological monitoring was performed at 12 different sampling points along the Aquiares river basin, whereas the Physico-chemical analysis, in 9 of the 12. Each sampling point was georeferenced and mapped using a geographical information system. A digital elevation model was used to portray differences in altitude, slopes, and life zones within the micro basin. Results from the biotic index BMPW-CR showed the existence of 1551 individuals, distributed in 13 orders and 33 families, where *Libellulidae, Hydropsychidae, Baetidae, Simuliidae y Elmidae* families were the most prevalent. Orders with a higher prevalence of families were Odonata, Dípterous, Ephemeroptera, Trichoptera, Coleoptera, and Hemíptera. In general, the BMWP-CR biotic index showed regular quality water with a high density of eutrophic material, with moderate pollution in 8 of the 12 points sampled. Sampling points 1, 2, and 3 showed low BMPW-CR indexes, indicating polluted waters, probably caused by contaminations from people in towns at the lower sections of the micro basin. However, the sampling point 9, located in the middle section of the basin, showed a low BMPW-CR index, an indicator of poor water quality, likely caused by a diffuse pollution source such as wastewater disposal from farming or agricultural activities coming from the upper part of the micro basin. Nine Physico-chemical and biological analyses used to ascertain water quality such as pH, fecal coliforms, and Nitrogen evidenced fecal coliform pollution on sampling points 1 and 2 when compared to the respective permitted limits on superficial water regulation in Costa Rica. The presence of high DBO levels in 5 sampling sites and DQO in 7 of 9, indicated organic pollution sources. Overall, 5 sampling points revealed that Aquiares river is suffering changes that can modify the basin's natural composition.

Key words: benthonic macroinvertebrates, water quality, biotic index BMPW-CR, Aquiares river, physiochemical parameters, watersheds, diffuse pollution.

1. Introducción

La humanidad ha tenido un factor en común a lo largo de la historia, el cual es la presencia o ausencia del agua para su subsistencia. Dependiendo de la presencia, abundancia y calidad de este recurso se manifiesta la posibilidad de mejoramiento agrícola, social, industrial, sanitario y de la calidad de vida. Igualmente, cuando dicho recurso está ausente o es de baja calidad se relaciona con pobreza, guerras, enfermedades y estancamiento económico (Sommer 2000).

En la actualidad, se observa que los cuerpos de aguas superficiales se encuentran expuestos a diversas fuentes de contaminación natural, desde carga de material específico disuelto y presencia de material orgánico natural y de principio antropogénico (efluentes de aguas residuales caseras, escorrentías del sector agrícola, descargas de procesos industriales, entre otros (Lozada *et al.* 2009). Como tal, la contaminación se define como una modificación causada por actividades humanas en componentes químicos, bilógicos y físicos del agua. Los niveles de variación en los componentes implican daño, el deterioro en temas de calidad del agua percibe el aporte de sustancias químicas y otros contaminantes como: nutrientes, microrganismos, grasas, sedimentos, pesticidas y aceites (Bravo *et al.* 2013).

La contaminación puede ser puntual o difusa, la contaminación puntual se origina de una fuente de contaminación identificada, puede ser aguas residuales, productos químicos, entre otros. Al hablar de contaminación difusa se hace referencia a la introducción de contaminantes al curso de agua superficial o subterránea, este tipo de contaminación puede darse de manera continua o intermitente, la intermitente es la más común, debido a que se relaciona con actividades agrícolas a través de fertilizantes e insecticidas, prácticas que provocan pérdidas de nutrientes por lixiviación y arrastre (Alfaro y Salazar 2005).

De acuerdo con la OMS, aproximadamente 2.4 mil millones de personas, en todo el mundo, viven en condiciones insalubres. Sus prácticas de higiene son tan malas que su nivel de exposición a riesgos de incidencia y diseminación de enfermedades infecciosas es altísimo. El agua almacenada en la vivienda, generalmente, está contaminada debido al manejo domiciliario inadecuado y sus escorrentías tienden a modificar los cuerpos de aguas. Esta realidad es evidente en los últimos años, pues la OMS ha estado a la vanguardia del saneamiento ambiental y de las acciones para la higiene y ha desarrollado materiales clave para los encargados de formular políticas y para los técnicos que trabajan en estos temas (OMS 2019).

A nivel de cuencas, el agua es considerada el recurso integrador, por ende, la delimitación de su hidrografía es considerada como un sistema ecológico a gran escala, capaz de interactuar desde lo ecológico hasta lo social, demostrando que es un sistema

complejo, sujeto a la dinámica de los “hidrosistemas” relacionados con el clima, la biología, hidrobiología, geología, incluyendo procesos sociales y biológicos que tienen lugar en su territorio (UNESCO 2010).

Costa Rica posee cuencas hidrográficas en su vertiente pacífica y atlántica, siendo en esta última donde se ubica el río Reventazón, el cual posee una longitud de 145 Km, posicionándose como el tercer río más largo del país con desembocadura a la cuenca Parismina del caribe costarricense. El río Aquiares forma parte de esta cuenca hidrográfica con evidentes problemas relacionados con la contaminación del agua (Mora y Alvarado 1997).

La cuenca del río Reventazón cuenta con diversos ríos, donde destacan el río Aquiares y el río Turrialba como parte de la cuenca. Estos cuerpos de aguas están formados por una red de drenaje superficial con forma dendrítica desde su parte más alta 3,318 msnm, y zonas bajas de aproximadamente 580 msnm, con un efluente de agua superficial estable, predominando en algunos sectores ribereños con poca cobertura vegetal y terrenos muy empinados (Ballestero y López Lee 2017).

Al pasar los años, estos cuerpos de agua reflejan en sus riberas un crecimiento poblacional con una huella marcada en temas de degradación de recursos naturales, específicamente en valores asociados a calidad química, física y microbiológica del agua (Cuadra Jirón 2006).

Los indicadores físico-químicos y microbiológicos de calidad de agua superficial deben ser manifestados en escenarios de sostenibilidad de recursos naturales, a través de parámetros que indican el origen de los tipos de contaminantes: biológicos, químicos y físicos. Los indicadores en los análisis de calidad de agua deben seleccionarse según la investigación a realizar, con orientación a los diferentes usos de suelo en la zona (Brugnoli 1999).

Los insectos acuáticos son el grupo con mayor abundancia en los medios hidro-ecológicos con permanencia estable en los cuerpos de aguas superficiales, con una sensibilidad marcada a cambios del ambiente, ejerciendo roles establecidos de alimentación para otros miembros de las cadenas tróficas. Por las razones mencionadas han sido objeto de estudio en los cuerpos de aguas superficiales (Ramírez *et al.* 1998).

Los macroinvertebrados de agua dulce son organismos evidentes al ojo humano capaces de ser retenidos a través de una malla aproximadamente de 125 µm. Estos animales habitan en ambientes de ríos y quebradas con flujo permanente, son el grupo con mayor diversidad en los ecosistemas lóticos y juegan un papel importante en todos los niveles tróficos, como depredadores y fuente alimenticia de consumidores terrestres y acuáticos, al

igual que en los procesos de descomposición de detritos y reciclado de nutrientes (Hanson *et al.* 2010).

Es de gran interés analizar la posible relación de las fuentes de contaminación con la calidad de agua en la microcuenca del río Aquiares, ya que este río actúa como tributario del río Turrialba y éste forma parte de la cuenca del río Reventazón, por ello, se debe minimizar el impacto de contaminantes en estos cuerpos de agua a nivel superficial. A lo largo de la microcuenca se observan agentes contaminantes, resultado de aguas residuales del sector agrícola, ganadero, comercial, agroindustrial, y domiciliar (OMS 2018).

Los resultados permiten generar acciones en temas de manejo y protección del recurso hídrico superficial, su conservación y uso adecuado, a través de distintas estrategias, que convoquen el esfuerzo de las instituciones públicas, empresa privada, actores claves y la sociedad civil. Además, facilitan identificar las modificaciones que sufren los factores fisico-químicos y biológicos útiles en calidad de agua, latentes en nuestro ambiente, donde a través de ellos se observa una variación en valores indicativos de posibles problemas de saneamiento ambiental (Aznar 2001).

El propósito del estudio se fundamenta en evaluar la calidad del agua superficial del río Aquiares, a través de análisis físico-químicos, biológicos y la estructura y composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, empleando el índice biótico BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party-Costa Rica). Esta investigación permite analizar la relación entre las posibles fuentes de contaminación a lo largo de la microcuenca, con la calidad del agua superficial del río Aquiares. De igual forma, aporta información importante sobre la carga de contaminación de esta microcuenca a la subcuenca del río Turrialba, y ésta a su vez a la cuenca del río Reventazón, información útil en la toma de decisiones a actores clave en temas de manejo y gestión de los recursos naturales a través de monitoreo asociado a calidad de agua superficial, teniendo un panorama claro sobre el grado de perturbación e integridad ambiental a nivel de la cuenca hidrográfica.

2. Metodología

2.1 Ubicación del área de estudio

La microcuenca del río Aquiares pertenece a la subcuenca del río Turrialba, cuenca del río Reventazón. Está localizada entre las coordenadas 9°54´ a 10°10´ Latitud Norte y 83°45´ a 83°48´ Longitud Oeste. La microcuenca cuenta con zonas bajas de aproximadamente 560 msnm 1,476 msnm en zonas medias y en zonas altas de 3,318 msnm en las laderas del volcán Turrialba. La ubicación administrativa de la microcuenca del río Aquiares, corresponde a la provincia de Cartago, abarcando básicamente áreas del cantón de Turrialba en los distritos de Santa Rosa, Santa Cruz, y pequeñas áreas del distrito de Turrialba. El área total de la microcuenca es de 2,580 ha (25.80 km^2) representando el 10.2% del área de la subcuenca del río Turrialba. La precipitación varía entre 2,050 y 3,500 mm anuales con niveles de temperaturas que oscilan entre 19°C a 30 °C. En la figura 1 se presenta la ubicación de la microcuenca del río Aquiares.

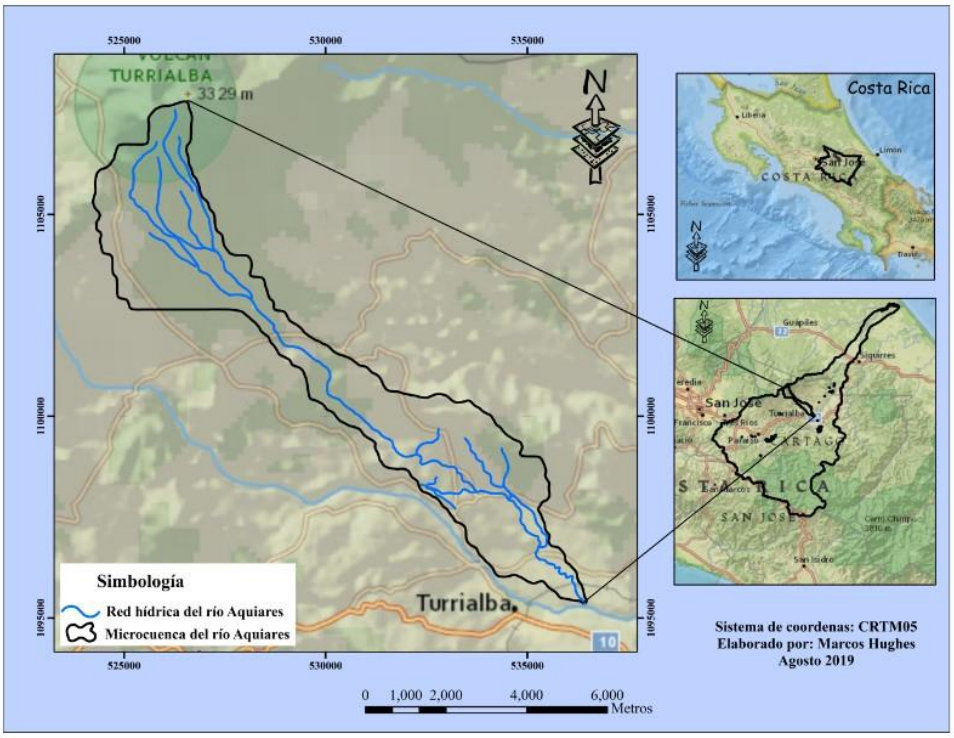

Figura 1. Ubicación de la microcuenca del río Aquiares.

2.1.2 Ubicación de puntos de muestreo en el río Aquiares

Para determinar los puntos de muestreo, se realizó un modelo de elevación digital tomando en cuenta las cotas de pendiente y las zonas de vida en la microcuenca, definiendo 18 puntos de muestreo distribuidos a lo largo del cauce principal del río Aquiares. Se

realizó un recorrido de validación de los puntos de muestreo, verificando un acceso seguro para la realización de los muestreos. La ubicación geográfica de los puntos de muestreo es presentada en el cuadro 2 y su ubicación espacial en la figura 2.

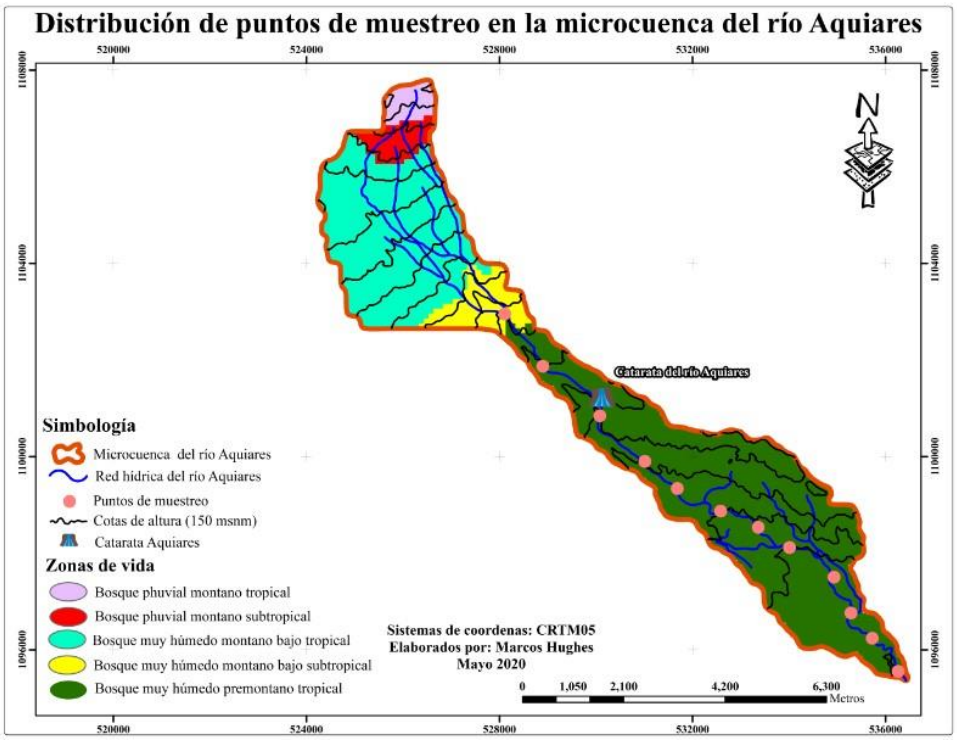

Figura 2. Distribución espacial de puntos de muestreo a lo largo del río Aquiares.

Se logró acceder a 12 de los 18 puntos de muestreo distribuidos en el río Aquiares, con representación en la sección alta, media y baja de la microcuenca. En la etapa de validación, reconocimiento y exploración de campo para comprobar la ubicación de los sitios de muestreo, se logró coincidir con la ubicación exacta de varios de los puntos de muestreo. Sin embargo, en algunos de los sitios requirió reubicar los puntos de muestreo, por dificultad de acceso, ya que el río Aquiares es bastante encajonado con pendientes muy pronunciadas.

En el cuadro 1 se describen los puntos de muestreo con su ubicación geográfica, según la sección de la cuenca y zonas de vidas.

Cuadro 1. Ubicación de puntos de muestreo de evaluación de calidad en el río Aquiares.

Puntos de biomonitoreo	**Ubicación geográfica** **Latitud y Longitud**	**Sección de la microcuenca**	**Zonas de vida**
P-1 Previo a la intercepción con subcuenca del río Turrialba	**N** 9°54’22.46” **O** 83°40’4.91”	Baja	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-2 Barrio Carmen Lira	**N** 9°54’43.12” **O** 83°40’15.23”	Baja	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-3 Barrio el Mora	**N** 9°54’55.84” **O** 83°40’35.37”	Baja	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-4 Antiguo Beneficio del café-La Isabel	**N** 9°55’12.93” **O** 83°40’41.98”	Baja	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-5 Tanque de abastecimiento de Asada el Mora	**N** 9°55’36.94” **O** 83°40’59.02”	Baja	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-6 Antiguo Beneficio-Puente Santa Rosa	**N** 9°55’52.06” **O** 83°41’33.90	Media	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-7 Calle el bambú	**N** 9°56’9.63” **O** 83°41’49.66”	Media	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-8 Verbena Sur	**N** 9°56’18.18”	Media	Bosque muy húmedo premontano tropical

	O 83°42’16.59”		
P-9 Lechería Calle blanco	**N** 9°56’32.93” **O** 83°42’43.52”	Media	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-10 Puente de cruce de ganado-Aquiares	**N** 9°57’5.87” **O** 83°43’25.57”	Media	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-11 Drenaje Santa Cruz-Las virtudes	**N** 9°57’51.83” **O** 83°44’11.15	Alta	Bosque muy húmedo premontano tropical
P-12 Puente la pastora	**N** 9°58’10.46" **O** 83°44'24.33"	Alta	Bosque muy húmedo montano bajo subtropical

2.1.3 Descripción de puntos de muestreo

Para describir las características biofísicas de la microcuenca, se resaltan las siguientes condiciones físicas de cada punto de muestreo:

P-1 Previo a la intercepción con subcuenca del río Turrialba

Primer punto de muestreo (P-1): Se encuentra ubicado en la sección baja de la microcuenca del río Aquiares, previo a la intersección con la subcuenca del río Turrialba. Este sitio presenta una elevación de 590 msnm. Las coordenadas geográficas corresponden a 9°54'22.46" de Latitud Norte y 83°40'4.91" de Longitud Oeste.

P-2 Barrio Carmen Lira

Segundo punto de muestreo (P-2): Se encuentra ubicado en la sección baja de la microcuenca del río Aquiares, adyacente al barrio de Carmen Lira, cerca de la estructura de la planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad, la cual fue destruida por la crecida del río un par de años atrás. Las coordenadas geográficas corresponden a 9°54'43.12"de Latitud Norte y 83°40'15.23" de Longitud Oeste.

P-3 Barrio el Mora

Tercer punto de muestreo (P-3): Este punto de muestreo se ubica en la parte baja de la microcuenca, detrás del cuartel de la policía rural del barrio El Mora, en el lugar se observa un drenaje de aguas grises con vertido al río. Las coordenadas geográficas corresponden a 9°54'55.84" de Latitud Norte y 83°40'35.37" de Longitud Oeste.

P-4 Antiguo Beneficio del café-La Isabel

Cuarto punto de muestreo (P-4): El punto de muestreo se encuentra ubicado diagonal al antiguo beneficio del café La Isabel, en el lugar se ubican áreas de potreros, cultivos de cañas y café. Las coordenadas geográficas corresponden a 9°55'12.93" de Latitud Norte y 83°40'41.98" de Longitud Oeste.

P-5 Tanque de abastecimiento de Asada el Mora

Quinto punto de muestreo (P-5): Se encuentra ubicado detrás del tanque de abastecimiento de agua potable de la Asada el Mora, en el lugar se halla áreas extensas de cultivo de caña y potrero. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°55'36.94" de Latitud Norte y 83°40'59.02" de Longitud Oeste.

P-6 Antiguo Beneficio-Puente Santa Rosa

Sexto punto de muestreo (P-6): Se ubica diagonal al puente del antiguo beneficio Santa Rosa en el lugar observamos áreas de potrero y algunas casas aledañas al cuerpo de agua. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°55'52.06" de Latitud Norte y 83°41'33.90 de Longitud Oeste.

P-7 Calle el bambú

Séptimo punto de muestreo (P-7): Se encuentra ubicada diagonalmente al tanque de rebalse del acueducto de la comunidad, en el lugar observamos áreas de cultivo de café y un drenaje de aguas grises con vertido al río. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°56'9.63" de Latitud Norte y 83°41'49.66"de Longitud Oeste.

P-8 Verbena Sur

Octavo punto de muestreo (P-8): Se encuentra ubicado 400 m este de la carretera de verbena sur, en el sitio hay áreas de cultivo de café y prácticas de extracción de arena del río. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°56'18.18" de Latitud Norte y 83°42'16.59" de Longitud Oeste.

P-9 Lechería Calle garita

Noveno punto de muestreo (P-9): Se encuentra ubicado 200 m este de la lechería de la familia Gómez, en el sector de río claro calle garita, el lugar muestra una modificación del río para reorientar su cauce. En la zona predomina la actividad ganadera como prioridad en la parte oeste, y en el sector este encontramos áreas de cultivos de café del beneficio Aquiares. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°56'32.93" de Latitud Norte y 83°42'43.52" de Longitud Oeste.

P-10 Puente de cruce de ganado-Aquiares

Décimo punto de muestreo (P-10): Se ubica en la sección media de la microcuenca a unos 300 m norte de la catarata del río Aquiares, diagonal al puente de cruce de ganado desde las zonas del Carmen y San Rafael hacia los terrenos de la finca del beneficio Aquiares. En el lugar predominan las áreas de ganadería y cultivos de café de la finca Aquiares. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°57'5.87" de Latitud Norte y 83°43'25.57" de Longitud Oeste.

P-11 Drenaje Santa Cruz-Las virtudes

Undécimo punto de muestreo (P-11): Se ubica en la sección alta de la microcuenca a unos 400 m sur del puente Santa Cruz la pastora, en el lugar se observa un drenaje de aguas residuales proveniente de las comunidades de Santa Cruz y las virtudes. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°57'51.83" de Latitud Norte y 83°44'11.15" de Longitud Oeste.

P-12 Puente río Aquiares santa cruz

Duodécimo punto de muestreo (12): Se ubica 200 m sur del puente del río Aquiares en Santa Cruz en la sección alta de la microcuenca, en el lugar se observan rocas gigantes probablemente producto de la actividad volcánica de la zona. Las coordenadas geográficas del sitio corresponden a 9°58'10.46" de Latitud Norte y 83°44'24.33" de Longitud Oeste.

2.2 Biomonitoreo de calidad de agua superficial en el río Aquiares

Se realizó un recorrido de validación de los sitios de muestreo en la microcuenca, verificando un acceso seguro para la realización de los muestreos. Definiéndose así 12 puntos de muestreo con distribución a lo largo del río Aquiares, representados en la sección alta, media y baja de la microcuenca. El biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos se inició desde los puntos con mayor concentración antropogénica, hasta la sección alta de la microcuenca.

La metodología utilizada fue guiada a través de la estructura y composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, permitiendo evaluar la calidad de las aguas del río Aquiares, empleando el índice BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party-Costa Rica). Esta metodología es orientada a analizar la relación entre las posibles fuentes de contaminación a lo largo de la microcuenca, con la calidad del agua superficial del río Aquiares. Para la ubicación de cada punto de muestreo, se utilizaron las coordenadas geográficas arrojadas en la tabla de atributos del modelo de elevación digital. De igual forma, se utilizaron imágenes de la página satelital SAS Planet para la creación del mapa de porcentaje de cobertura y uso del suelo en la microcuenca del río Aquiares, la misma se intentó de manera supervisada y no supervisa para ver las diferencias entre ambas. Este procedimiento fue realizado para sustentar la toma de decisión en cada punto del biomonitoreo de calidad de agua.

2.2.1 Fase de campo

La recolecta de los macroinvertebrados acuáticos se realizó utilizando una red tipo D con base de 0.30 m con una malla de 500 micras, también se utilizó una red con mallas de confección casera con un tamaño muy similar a la recomendada (Kohlmann *et al.* 2007).

La red D en cada punto de muestreo se colocó en el fondo, contra corriente y se procedió a la remoción del sustrato con la mano libre y los pies, esto permitió la captura de los organismos atrapados en la red y de esta forma, contar con los individuos muestreados. Esta metodología fue replicada en los 12 puntos muestreados. La recolección de las muestras fue establecida por los diferentes hábitats (corriente, hojarasca, y vegetación de orillas), cada muestreo fue estimado con un tiempo de duración de 15 minutos con una división de tres submuestras con duración de 5 minutos cada una según hábitat. El material depositado en la red fue colocado en una bandeja blanca, para favorecer la visualización de los organismos recolectados, para luego depositarlos en un envase con alcohol al 70%, con su respectiva etiqueta. De esta manera, fueron trasladadas las muestras al laboratorio para su identificación correspondiente, en la figura 3 se muestra el ejercicio del biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos.

Figura 3. Biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos en el río Aquiares.

2.2.2 Identificación de macroinvertebrados en laboratorio

Para la identificación de los macroinvertebrados bentónicos, se utilizó el laboratorio de fitoprotección del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). En el proceso se utilizaron lupas y estereoscopios, con el fin de identificar y distribuir correctamente los organismos encontrados según los diferentes taxones. Las familias de macroinvertebrados bentónicos fueron seleccionadas con la ayuda de claves taxonómicas del índice BMWP-CR de calidad de aguas, de la Universidad de Costa Rica y la Universidad EARTH. La identificación de los individuos en laboratorio se realizó al día siguiente, de la jornada de muestreo en campo para evitar la descomposición de los organismos colectados.

2.2.3 Análisis de datos y cálculo del índice BMWP-CR

El valor de tolerancia utilizado fue guiado por el índice BMWP-CR, y las guías de identificación del BMWP-CR (Springer, M. *et al.* 2007) (Vázquez, D. *et al*. 2010). De esta forma, se obtuvieron los datos al sumar valores de intolerancia según las familias colectadas en cada punto de muestreo.

2.3 Monitoreo de calidad del agua en el río Aquiares

El monitoreo de calidad de aguas se realizó a través de análisis físico-químicos en 9 de los 12 puntos de muestreo ubicados en el cauce principal del río Aquiares, en cada punto se recopilaron muestras de nueve parámetros físico-químicos por el laboratorio CEQIATEC del Tecnológico de Cartago. El cuadro 2 muestra los límites permitidos de parámetros

fisico-químicos y biológicos utilizados en el monitoreo, según el reglamento de aguas superficiales de Costa Rica.

Cuadro 2. Parámetros utilizados con límites permitidos, por el reglamento para la determinación de la calidad de aguas superficiales según clase de agua en Costa Rica.

Parámetros	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
Potencia de hidrógeno (pH)	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5	6.0 a 9.0	5.5 a 9.5	5.5 a 9.5
Nitratos (NO_3-) (mg N/L)	<5	5 a <10	10 a <15	15 a <20	>20
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	<20	20 a <25	25 a <50	50 a <100	100 a 300
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	<20	20 a 1,000	1,000 a 2,000	2,000 a 5,000	>1,000
Sólidos Disueltos (mg/L)	<250	250 a <500	500 a 1,000	>1,000	>1,000

Fuente: MINAE, 2007.

2.3.1 Toma de muestras de parámetros físico-químicos y biológicos en el río Aquiares

Las muestras de los análisis fisico-químicos y biológicos fueron tomadas insitu, por un funcionario del laboratorio CEQIATEC del Instituto Tecnológico de Cartago, Costa Rica, este laboratorio utiliza la metodología del Standard Método for the Examination of Water and Wastewater 20th ed. 1,998-. APHA-AWWWA-WEF, de los Estados Unidos de América. Los parámetros de oxígeno disuelto, pH y conductividad fueron tomados con la ayuda de una sonda Hanna en cada punto de muestreo, para parámetros como DBO, DQO, SD, P, N y coliformes fecales, se colectó agua en botellas de vidrio, metal y plástico para luego ser procesados en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Cartago.

Estos análisis de aguas superficiales están acreditados ante el ente Costarricense de Acreditación, según la Norma ISO 17025. Luego, las muestras fueron trasladadas al

laboratorio CEQIATEC ubicado en el Instituto Tecnológico de Cartago para el procesamiento según el procedimiento utilizado en cada parámetro. En la figura 4 se muestra la toma de los parámetros utilizados en el monitoreo de agua superficial.

Figura 4. Toma de muestras de análisis físico-químicos y biológicos en los sitios de la investigación en el río Aquiares.

Con la ayuda de los parámetros físico-químicos y biológicos se buscó identificar las posibles causas y orígenes de la contaminación en las diferentes secciones de la microcuenca del río Aquiares. Pues en la microcuenca se observan áreas con presencia del sector industrial (beneficios y hoteles), antropogénicas (barrios y comunidades rurales) y del sector agropecuario (cultivos y fincas), cada una de estas áreas ejercen una presión al recurso integrador de la cuenca el agua. En el cuadro 3 se describen los parámetros utilizados en el monitoreo de aguas superficiales.

Cuadro 3. Parámetros físico-químicos utilizados en el monitoreo de calidad de agua superficial en el río Aquiares.

Parámetros	**Definición**	**Importancia de uso**	**Fuentes bibliográficas**
Nitrógeno Total (mg/L)	El nitrógeno es un compuesto que puede estar en forma de nitrato o nitrito, llega a los cuerpos de agua a través de escorrentías de aguas residuales domésticas, industriales y del sector agrícola.	Son muy buenas fuentes de nitrógeno las aguas desechadas producto de un mal tratamiento de sistemas sépticos y de prácticas agrícolas.	Mitchell et al. 1991
Fósforo (mg/L)	Un elemento que forma parte de animales y plantas, el cual se adhiere a la materia orgánica de los organismos, es un elemento esencial en la composición de los seres vivos. El límite permitido para consumo humano en fuentes de agua superficiales en Costa Rica es de 0.1 mg/l.	El exceso de fósforo es asociado a los procesos de eutroficación, esto provoca que se enriquezcan las aguas con carga orgánica de carácter antropogénico. Los cultivos son sostenidos en gran manera por productos fosfatados que terminan en los cuerpos de agua.	MINAE. 2003
Demanda biológica de oxígeno DBO (mg/L)	Es sinónimo de materia orgánica biodegradable. Este parámetro es utilizado en la determinación de tratamientos eficaces en aguas residuales.	Es muy utilizado para detectar la reducción de oxígeno disuelto producto de aguas residuales de actividad antropogénicas y de minerales como nitratos, sulfuros y	Boardman. 2011 Mitchell *et al.* 1991

Parámetros	Definición	Importancia de uso	Fuentes bibliográficas
		cloruros en los cuerpos de agua.	
Demanda química de oxígeno DQO (mg/L)	Se encarga de medir las cargas de contaminantes en términos de oxidación química utilizando agentes oxidantes. No específicamente mide el contenido orgánico e inorgánico en la muestra, sino la cuantía de oxígeno emplazado para la oxidación.	Los niveles de DQO siempre serán mayores a los de DBO y su diferencia aumenta con la presencia de sustancias tóxicas que hacen la muestra resistente a los procesos degradativos.	Pepper *et al.* 2006
Sólidos disueltos (mg/L)	Son capaces de ser filtrados por 0.45 µm, son compuestos de sólidos disueltos y coloidales. Son divididos por fracciones de 10 a 1 µm de diámetros, los disueltos están en moléculas en el agua.	Son muy buen indicadores de sales disueltas en una muestra, por ende, actúan como residuos remanentes seguido de la evaporación del agua. Son arrastrados por escorrentías de procesos del sector agrícola.	Sierra. 2011
		Las disminución o ausencia de las moléculas de oxígeno en el cuerpo de agua influye en la comunidad de especies	

Parámetros	Definición	Importancia de uso	Fuentes bibliográficas
Oxígeno disuelto (mg/L)	Representa la cuantía de moléculas de oxígeno que se encuentran disueltas en el agua.	acuáticas. Los niveles de oxígeno disuelto en los cuerpos de aguas son reducidos por la presencia de bacterias y organismos que descomponen la materia orgánica.	Brooks *et al.* 2013
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	Son bacilos Gram-negativos, aeróbicos o anaeróbicos facultativos no esporulados que, capaces de ser filtrados por una membrana, producen colonias dentro de un periodo de 22 a 26 horas cuando se incuban en un medio de cultivo específico para coliformes fecales a 44.5 ± 0.2 °C dentro de 24 ± 2 horas.	Indican la presencia de excremento de animales en los cuerpos de agua, producto de desechos directos de mamíferos y aves. Las bacterias coliformes, son causantes de enfermedades.	OPS. 1999 Prieto. 2008
Potencial de hidrógeno (pH)	Es la concentración de iones de hidrógeno en el agua, indicando un comportamiento como ácido o alcano. Es una medida utilizada para interpretar solubilidad en los	Determina la actividad del ión hidrógeno capaz de afectar directa o indirectamente la actividad de otros constituyentes presentes en el agua, la disposición del pH constituye un parámetro de	Mitchell *et al.* 1991

Parámetros	Definición	Importancia de uso	Fuentes bibliográficas
	compuestos químicos.	importancia para la descripción de los sistemas biológicos y químicos de las aguas naturales.	
Conductividad (µS/m)	La conductividad se define como la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad. Las unidades son Siemens por metro µS/m	La conductividad de las aguas naturales se ubica dentro 10 µS/m a los 350 µS/m, dependiendo de la geología.	ANZECC. 2000

2.3.2 Determinación de puntos de muestreo de análisis físico-químicos y biológicos

Para determinar los puntos de muestreo, se realizó un modelo de elevación digital considerando las zonas de vida. En la figura 5 se muestran los 9 puntos de muestreo.

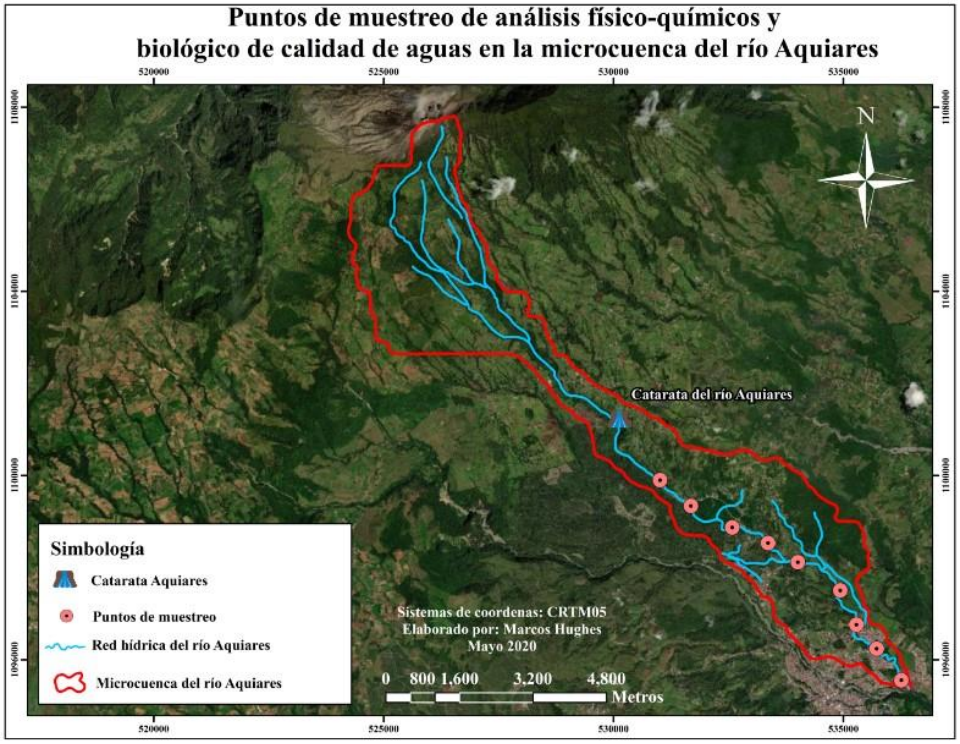

Figura 5. Puntos de muestreo de análisis fisico-químicos y biológicos de calidad de aguas en el rio Aquiares.

2.4 Relación del índice biótico BMWP-CR con el monitoreo de análisis de parámetros fisicoquímicos y biológico de calidad de aguas del río Aquiares

Con el objetivo de relacionar los resultados obtenidos, se realizó una comparación del índice biótico BMWP-CR, con los análisis de parámetros físico-químicos y biológicos de calidad de agua, aplicando una aproximación de la nueva propuesta de subíndice ICA realizada por el Dr. Guillermo Calvo Brenes del Tecnológico de Cartago en el 2013, dicha propuesta es aplicada a las condiciones de las aguas superficiales de Costa Rica. La relación fue realizada del punto de muestreo 1-9 con el objetivo de evaluar la calidad del agua superficial del río Aquiares con aplicación de estos dos índices en la microcuenca. En el cuadro 4 se muestra las fórmulas y pasos a seguir por parámetro para el cálculo del subíndice.

Cuadro 4. Fórmulas para el cálculo del subíndice (SI), según la propuesta ICA de Calvo-Brenes para indicadores de la calidad del agua del río Aquiares, a través de una estandarización de la concentración de cada indicador. Fuente (Calvo-Brenes 2019).

INDICADOR	AUTOR	FÓRMULA
Nitrógeno Nitratos (NO3)	Propuesta nueva Calvo Brenes	SI =10 para X ≥ 23 SI $= a + bx + cx^2 + dx^3$ donde a=99.29607 b=0.4259834 c= -0.4072464 d= $9.420290*10^{-3}$
Oxígeno disuelto	Propuesta nueva Calvo Brenes	SI $= \frac{ax^b}{c^b+x^b}$ donde a=141.0464 b=2.283152 c=5.30566 SI =10 para X < 1.75 SI =100 SI >100
pH	Cude	SI =10 para X < 4 SI $= +2.628e^{+0.5200X}$ para 4 ≤ X < 7 SI =100 para 7 ≤ X ≤ 8.0 SI$100e^{-0.5188(X-8)}$para 8 < X ≤ 11.0 SI =10 para X > 11
Coliformes fecales	Propuesta nueva Calvo Brenes	SI =100 para X ≤ 1 SI = -3.6298ln(x) + 100.32 para 1 < X ≤ 1,000 SI = $9.3566(\ln(x))^2 - 178.55\ln(x) + 86.182$ para 1,000 < X

INDICADOR	AUTOR	FÓRMULA
		≤ 15,000 SI =10 para X > 15,000
Conductividad	Stoner	SI = +100 – 0.0002X^2 para X < 700 SI = 0 para X ≥ 700
Fósforo	Propuesta nueva Calvo Brenes	SI $= a + bx + cx^2 + dx^3$ donde a=99.759 b= -291.678 c=354.29 d = -145.089 SI =10 para X > 1.2
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Propuesta nueva Calvo Brenes	SI $= \frac{ab+cx^d}{b+x^d}$ donde a=98.84689 b=235.2236 c = -4.829346 d=2.470089 SI =10 para X > 20
Sólidos suspendidos	Propuesta nueva Calvo Brenes	SI $= \frac{a+bx}{1+cx+dx^2}$ donde a = 100.1271 b = -0.2002545 c=1.04527*10–2 d=2.384969*10^{-5} SI =10 para X > 800

2.5 Identificación y evaluación de las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares

Para lograr identificar las posibles fuentes de contaminación a lo largo de la microcuenca, se realizaron recorridos en la zona de estudio y 14 entrevistas a actores clave tomadores de decisiones en la microcuenca (Instituciones y Asadas). Las instituciones entrevistadas fueron: La Municipalidad, MINAE, MAG, Ministerio de Salud, Senasa y Senara, cada entrevista fue realizada con la ayuda de un protocolo semiestructurado con el objetivo de identificar las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca y la percepción de la calidad del agua superficial del río Aquiares. En las entrevistas se les solicitó una ayuda a los funcionarios de las instituciones, para referenciar y ubicar las posibles fuentes de contaminación ligadas al sector agropecuario en las diferentes secciones de la microcuenca.

Las Asadas entrevistadas fueron: El Mora, Carmen Lira, Nuevo Horizontes, Sictaya, Torrealba, Santa Rosa, Santa Cruz y Aquiares, cada una de estas Asadas, cuentan con nacientes en la delimitación de la microcuenca. Luego de contar con información de las 60 posibles fuentes de contaminación en la microcuenca, por producción pecuaria, industrial y agrícola. Se confeccionó una encuesta con referencia a los usuarios no familiares del agua en la microcuenca, para tener una percepción del uso del recurso hídrico en los diferentes sectores productivos, lastimosamente solo se completaron 5 encuestas por motivo de la pandemia.

3. Resultados

3.1 Biomonitoreo de calidad de aguas en el río Aquiares

Los resultados obtenidos muestran un total de 1,551 individuos, pertenecientes a 13 órdenes y 33 familias, en el cuadro 5 se presentan la cantidad de organismos y familias de macroinvertebrados según el índice BMWP-CR, por sitio de muestreo. En la figura 6 se muestran los resultados del biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos con aplicación del índice bióticos BMWP-CR por punto de muestreo a lo largo del río Aquiares.

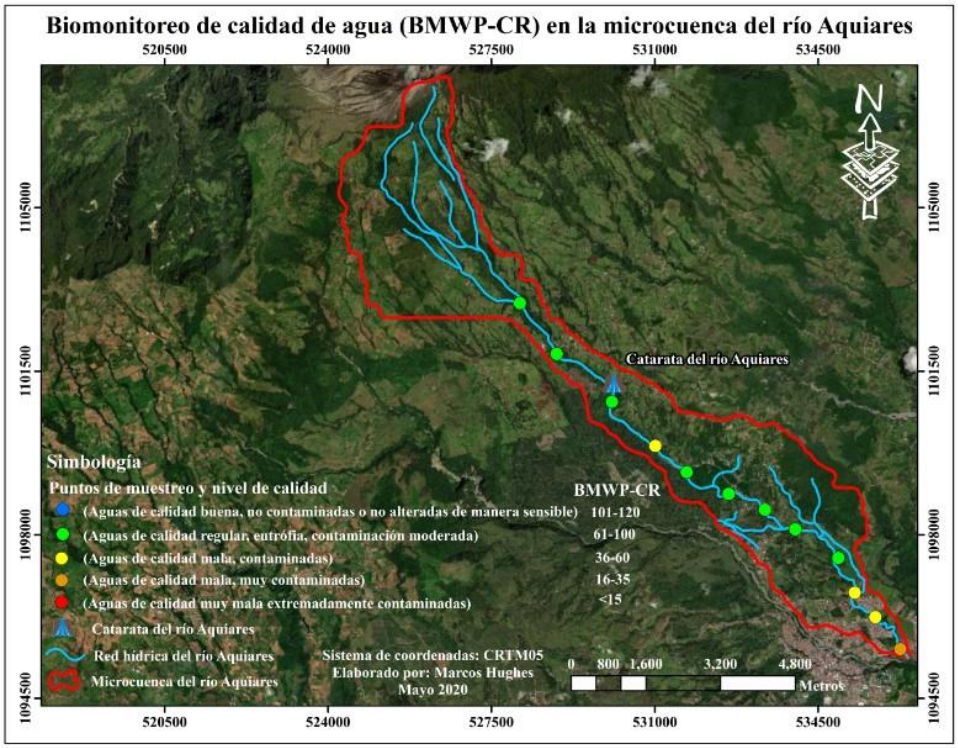

Figura 6. Resultado del biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos con la aplicación del índice biótico BMWP-CR en puntos de muestreo en la microcuenca del río Aquiares.

Cuadro 5. Índice biótico BMWP-CR, cantidad de organismos, presencia de órdenes y familias de macroinvertebrados bentónicos encontrados en puntos de muestreo (P1-P12), en la microcuenca del río Aquiares.

PUNTO	ÓRDENES ENCONTRADOS	FAMILIAS	CANTIDAD DE ORGANISMOS	ÍNDICE BMWP-CR
1	Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Mesogastropoda, Odonata, Annelida, Trichoptera	*Simuliidae, Hydropsychidae, Belostomatidae, Libellulidae, Thiridae, Oligochaeta, Coenagrionidae, Baetidae*	54	32
2	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Mesogastropoda, Odonata, Trichoptera, Tricladida	*Thiaridae, Hydropsychidae, Planariidae, Chironomidae, Naucoridae, Libellulidae, Coenagrionidae, Baetidae, Calopterygidae, Simuliidae, Helicopsychidae, Elmidae*	68	52
3	Coleóptera, Decápoda, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Mesogastropoda, Odonata, Annelida, Trichoptera	*Thiaridae, Corydalidae, Hydropsychidae, Naucoridae, Elmidae, Leptophlebiidae, Oligochaeta, Coenagrionidae, Libellulidae, Palaemonidae, Simuliidae, Baetidae*	72	56
4	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Mesogastropoda, Odonata, Annelida, Trichoptera, Tricladida, Tubificida	*Corylidae, Belostomatidae, Oligochaeta, Tubifex, Planariidae, Calopterygidae, Libellulidae, Baetidae, Gerridae, Hidrobiidae, Elmidae, Naucoridae, Hidropsychidae, Simuliidae, Chironomidae, Leptophlebiidae, Caenagrienidae*	119	67

PUNTO	ÓRDENES ENCONTRADOS	FAMILIAS	CANTIDAD DE ORGANISMOS	ÍNDICE BMWP-CR
5	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Mesogastropoda, Odonata, Annelida, Trichoptera, Tricladida, Tubificida	*Corydalidae, Libellulidae, Thiaridae, Naucoridae, Hydropsychidae, Planariidae, Psychodidae, Coenagrionidae, Elmidae Philopotamidae, Simuliidae, Leptophlebiidae, Tubifex, Baetidae, Leptohyphidae, Oligochaeta, Hidrobiosidae*	185	82
6	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Odonata, Annelida, Trichoptera, Tubificida	*Libellulidae, Oligochaeta, Corydalidae, Baetidae, Naucoridae, Leptohyphidae, Hydropsychidae, Elmidae Coenagrionidae, Simuliidae, Tubifex, Belostomatidae, Hidrobiosidae, Philopotamidae, Ptilodactylidae, Chironomidae*	144	76
7	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Odonata, Trichoptera, Tubificida	*Tipulidae, Corydalidae, Ptilodactylidae, Naucoridae, Belostomatidae, Simuliidae, Libellulidae, Elmidae, Tubifex, Coenagrionidae, Calopterygidae, Chironomidae, Baetidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Hydrobiosidae*	159	76
8	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Odonata, Annelida, Trichoptera,	*Hydropsychidae, Ptilodactylidae, Oligochaeta, Belostomatidae, Libellulidae, Planariidae, Corydalidae, Naucoridae, Simuliidae,*	181	81

PUNTO	ÓRDENES ENCONTRADOS	FAMILIAS	CANTIDAD DE ORGANISMOS	ÍNDICE BMWP-CR
	Tricladida, Tubificida	*Coenagrienidae, Tubifex, Baetidae, Elmidae, Calopterygidae, Leptohyphidae, Chironomidae, Hydrobiosidae, Psychodidade*		
9	Coleóptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Odonata, Annelida, Trichoptera, Tubificida	*Corydalidae, Libellulidae, Coenagrionidae, Baetidae, Elmidae, Tubifex, Oligochaeta, Naucoridae, Hydropsychidae, Gerridae, Belostomatidae, Calopterygidae, Caenidae*	57	49
10	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Odonata, Trichoptera	*Corydalidae, Baetidae, Coenagrionidae, Ptilodactylidae, Hydrobiosidae, Naucoridae, Libellulidae, Hidropsychidae Elmidae, Philopotamidae, Chironomidae, Simuliidae, Megapodagrionidae, Leptohyphidae, Dryopidae, Leptophlebiidae, Psychodidae*	194	93
11	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Hemíptera, Megalóptera, Mesogastropoda, Odonata, Annelida, Trichoptera	*Oligochaeta, Simuliidae, Corydalidae, Chironomidae, Hydropsychidae, Tubifex, Hydrobiidae, Libellulidae, Baetidae, Leptohyphidae, Elmidae, Hydrobiosidae, Coenagrionidae, Polycontropodidae, Dytiscidae, Guerridae, Psychodidae*	155	70

PUNTO	ÓRDENES ENCONTRADOS	FAMILIAS	CANTIDAD DE ORGANISMOS	ÍNDICE BMWP-CR
12	Coleóptera, Díptera, Ephemeróptera, Megalóptera, Odonata, Annelida, Plecóptera, Trichoptera	*Corydalidae, Simuliidae, Hydropsychidae, Perlidae, Ptilodactylidae, Libellulidae, Tubifex, Oligochaeta, Baetidae, Elmidae, Chironomidae, Hydrobiosidae, Leptohyphidae, Tipullidae*	163	71

3.1.1 Descripción de resultados según el índice biótico BMWP-CR

Los resultados obtenidos muestran con mayor distribución las familias Hydropsychidae, Baetidae y Libellulidae en relación con los doce puntos de muestreo. Seguidos de las familias Elmidae y Simuliidae con distribución en 11 puntos de muestreo, posiblemente por el amplio rango de hábitos alimenticios de estos organismos. Los órdenes con mayor presencia de familias según puntos de muestreo fueron Odonata, Díptera, Ephemeróptera, Trichoptera, cada uno con una distribución según los diversos hábitats encontrados en los ecosistemas lóticos.

En el punto de muestreo 8 se identificaron 18 familias de macroinvertebrados, siendo el sitio con mayor presencia de familia encontrada, en relación con los 11 puntos de muestreo restantes, con una calidad de aguas regular eutróficas con contaminación moderada. En términos de porcentaje, el 54 % de las familias identificadas se ubican en este punto de muestreo.

Los puntos de muestreo 5, 10 y 11, presentaron patrones similares con relación a la presencia de familias de macroinvertebrado identificados, en cada uno de los puntos mencionados se identificaron 17 familias de macroinvertebrados con una calidad de aguas regular, eutróficas con contaminación moderada.

El punto de muestreo 10 es el que registró mayor puntaje referente a la diversidad de familias en todo el biomonitoreo de calidad de agua, por ende, es el sitio que presenta mejor calidad del agua, según la valoración del índice BMWP-CR. Es probable que esta condición se deba a la catarata del río Aquiares, ubicada unos 300 m previos a este punto de muestreo, contribuyendo a mejorar las condiciones físico-químicas y biológicas del agua producto del porcentaje de pendiente. Por tal razón, se observan variaciones en el índice BMWP-CR bien marcadas en los puntos de muestreos de mayor gradiente altitudinal, en relación con los de la sección baja de la microcuenca, donde se registran índices muchos más bajos.

En los puntos de muestreo 4, 6 y 7 también hay una similitud en la diversidad de familias de macroinvertebrados bentónicos encontrados, con la presencia de 16 familias por cada sitio de muestreo. Estos puntos de muestreo presentaron una calidad de aguas regular, eutróficas con contaminación moderada.

El punto de muestreo 12 mostró un total de 14 familias de macroinvertebrados bentónicos identificados, con una calidad de aguas regular, eutrófica con contaminación moderada. Siendo este punto de muestreo el de mayor altura con 1,560 msnm en nuestro biomonitoreo de calidad de agua. Sin embargo, es el único punto de muestreo que registró la presencia de la familia *Perlidae* del orden *Plecóptera* habituales en ríos con alturas pronunciadas, son considerados como uno de los grupos con mayor sensibilidad a la

degradación del hábitat y del enriquecimiento por carga orgánica producto de aguas residuales, pues es un grupo de organismos muy sensibles a las deficiencias de oxígeno en cuerpos de aguas lóticos y lénticos con una alimentación variada según su estadio de vida, desde detritívoros en etapas juveniles hasta carnívoros en etapa adulta. Habitan debajo de las piedras entre la vegetación o a orillas de los cuerpos de agua, estas condiciones los hacen un grupo de organismos de ambientes acuáticos con poca degradación.

El punto de muestreo 9 mostró una presencia de 13 familias de macroinvertebrados identificados, con aguas de calidad mala contaminadas. Este punto de muestreo presenta un valor bajo en relación con el índice BMWP-CR, lo que indica un impacto de contaminantes a la calidad biológica del agua, esto revela que los organismos encontrados presentan tolerancia a ciertos niveles de contaminación. Posiblemente, el cuerpo de agua está siendo impactado por efluentes con carga de contaminantes, desde actividades antropogénica hasta las actividades del sector productivo, pues en el lugar se han identificado escorrentías de aguas residuales provenientes de la parte alta. La baja abundancia de familias en el sitio posiblemente influenciada por la disminución del cauce, producto de la modificación ejercida para ampliar las áreas de potreros.

Los puntos de muestreos 2 y 3 presentaron una presencia de 12 familias, según la cantidad de macroinvertebrados bentónicos colectados, con una valoración de aguas de calidad mala contaminadas. A diferencia del punto de muestreo 1, el cual presentó la menor presencia de familias de macroinvertebrados bentónicos en relación con los puntos muestreados, con 8 familias identificadas según la muestra, con una valoración de aguas de calidad muy mala a muy contaminadas.

Estos puntos de muestreo se ubican en la parte baja de la microcuenca con una concentración antropogénica que ejerce presión, por la presencia de los barrios aledaños al río, como Carmen Lira y el Mora, el primero en mención con un sistema de vertido directo de aguas grises y residuales sin tratamiento alguno, previo a las descargas. Los puntos de muestreo de macroinvertebrados bentónicos en la sección baja de la microcuenca, son los que presentan menor valoración en relación con el índice BMWP-CR, con aguas de calidad mala a muy contaminadas producto de las diversas fuentes de contaminación.

Capaz de modificar la composición natural de las comunidades acuáticas, situación que se refleja en la presencia de organismos características de tolerancia a ambientes acuáticos contaminados, y con poco oxígeno. En la figura 7, se resalta la ubicación de los puntos de muestreo con el resultado del biomonitoreo de macroinvertebrados bentónicos a lo largo de la microcuenca del río Aquiares.

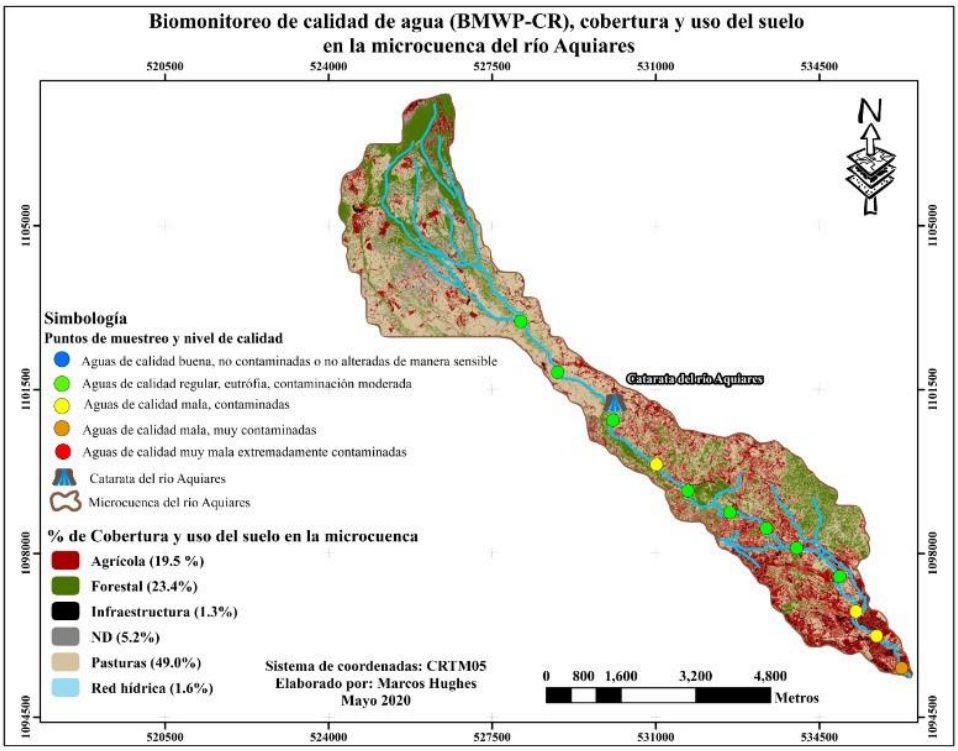

Figura 7. Resultados del índice BMWP-CR, cobertura y uso del suelo en la microcuenca del río Aquiares según puntos de biomonitoreo.

Los resultados del biomonitoreo de calidad de agua a través de macroinvertebrados bentónicos, muestran que la mayor abundancia de familias con relación a los puntos de muestreo, se ubican en sitios con presencia de bosques ribereños. En la figura 7 se presentan los puntos de muestreo con el porcentaje de cobertura y usos de suelo existentes en la microcuenca.

Por tal razón, la mayoría de los sitios de muestreados indican una calidad regular con inicio de contaminación de las aguas clasificándolas como case III, con organismos que presentan tolerancia media a la contaminación. La contaminación en los cuerpos de aguas es alterada por descargas de los diferentes sectores productivos a nivel de la cuenca, siendo la contaminación por producción animal muy marcada en muchos cuerpos de aguas superficiales, modificando la composición biológica de los cuerpos de aguas. En la figura 8 se muestran las posibles fuentes de contaminación por producción pecuaria en la microcuenca.

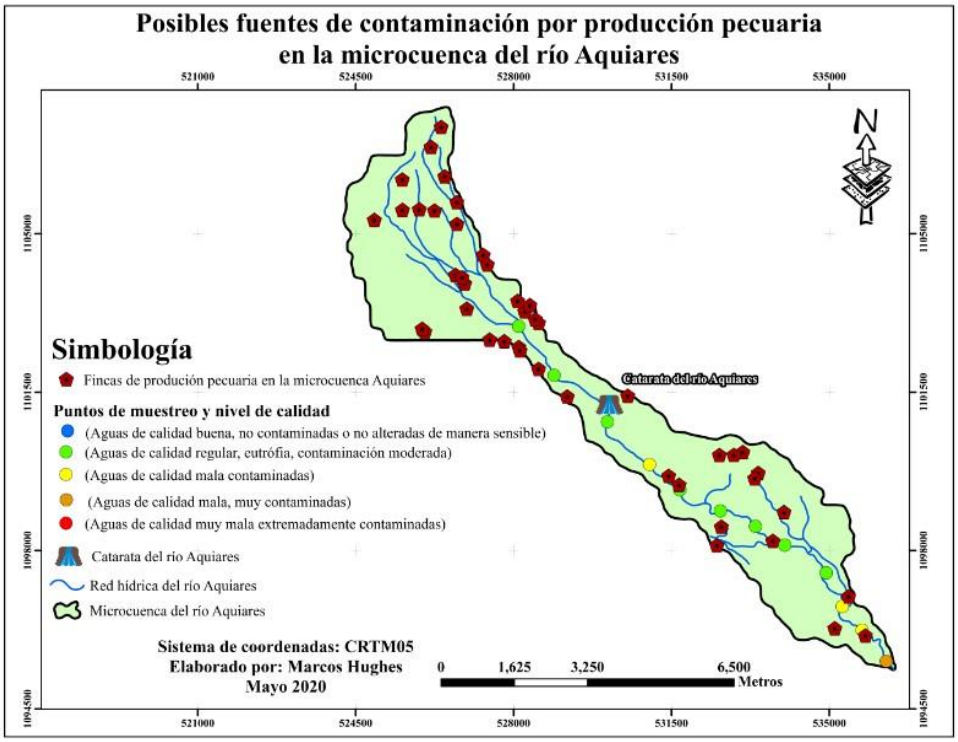

Figura 8. Posibles fuentes de contaminación por producción pecuaria en la microcuenca del río Aquiares.

En 8 de los 12 puntos de muestreo de calidad de agua en la microcuenca del río Aquiares, se observan valores altos del índice BMWP-CR dentro del rango de 61-100 valorizando las aguas de calidad regular, eutróficas con contaminación moderada. En el cuadro 6, se describe el comportamiento del índice biótico BMWP-CR, puntos del biomonitoreo y calidad de agua según usos de suelo en la microcuenca del río Aquiares.

Cuadro 6. Comportamiento del índice BMWP-CR, uso del suelo y calidad de agua según puntos de biomonitoreo de macroinvertebrados en la microcuenca del río Aquiares.

PM	BMWP' CR	Calidad de agua	Agr	For	Infr	ND	Past	Red híd	Total, general
1	32	Naranja	Muy mala	15.3	0.3	2.5	0.2	10.8	1.6
2	52	Amarillo	Mala	35.4	1.1	7.3	2.1	20.7	2.5
3	56	Amarillo	Mala	35.5	1.4	5.6	1.2	24.4	2.5
4	67	Verde	Regular	32.3	5.7	0.7	0.5	34.0	2.2
5	82	Verde	Regular	29.8	9.5	1.4	1.0	34.6	2.2
6	76	Verde	Regular	16.8	17.1	0.8	1.5	34.9	2.1
7	12	Verde	Regular	31.9	8.7	1.2	1.5	38.1	2.5
8	81	Verde	Regular	16.1	23.1	0.6	1.5	33.8	2.1
9	49	Amarillo	Mala	12.9	21.3	0.1	0.8	32.1	2.0
10	93	Verde	Regular	11.2	19.9	0.2	2.2	42.5	2.5
11	70	Verde	Regular	7.7	2.2	0.8	0.7	46.6	2.1
12	71	Verde	Regular	3.4	12.2	0.1	1.8	54.3	3.2

El punto de muestreo 4, fue el único sitio donde se registró la presencia de los 13 órdenes encontrados en el biomonitoreo de calidad de agua, según la ausencia o presencia de familias de macroinvertebrados bentónicos identificados por puntos de muestreo en el río Aquiares. En la figura 9 se muestra el comportamiento de los órdenes de macroinvertebrados encontrados en relación con los puntos de muestreo en el río Aquiares.

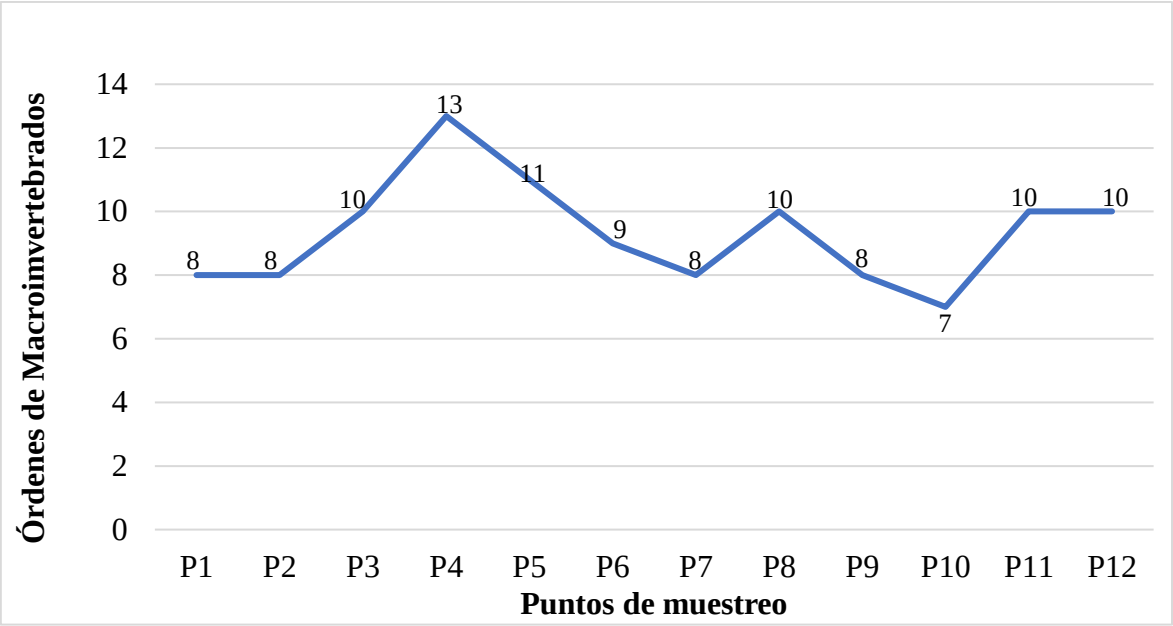

Figura 9. Presencia de órdenes de macroinvertebrados bentónicos por puntos de muestreo a lo largo del río Aquiares.

3.2 Monitoreo de análisis físico-químicos de calidad de aguas del río Aquiares

Para el análisis de calidad de aguas superficial en el río Aquiares, se consideraron 9 parámetros físico-químicos y biológicos, colectando muestras en 9 sitios de muestreo distribuidos en las secciones media y baja de la microcuenca. El comportamiento de los parámetros utilizados en el muestreo se describe a continuación:

Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento del nitrógeno en relación con los límites permitidos que van de 5 a <10, según el reglamento de aguas superficiales de Costa Rica para las clases de agua I y II, a excepción del punto de muestreo 8 (7.9 mg/L). Posiblemente, en este punto, el cuerpo de agua está siendo impactado, por escorrentías de diferentes sectores productivos de la zona, y de comunidades de la parte alta, ejerciendo una presión a través de algún tipo de contaminante sobre el área con una carga orgánica, capaz de modificar la composición química del agua a través de este elemento en el cuerpo de agua.

Los niveles de fósforo según los resultados obtenidos en los 9 puntos de muestreo se mantienen dentro de los límites internacionales permitidos, los mismos establecen que los niveles de fósforo en aguas naturales superficiales deben ser <1. Todos los sitios de muestreo registraron valores dentro de los límites mencionados.

La demanda bioquímica de oxígeno presentó valores elevados en relación con los límites permitidos en 5 puntos de la investigación. Se considera que la concentración de

DBO por encima de 10 mg/L es característica de aguas con niveles altos de contaminación, y valores por debajo de los 3 mg/L se considera como aguas con una contaminación nula. Los resultados muestran una demanda bioquímica de oxígeno elevada, con rangos de 36 a 45 mg/L en 5 de los puntos de muestreo, situación que muestra un aporte de materia orgánica alta en los puntos de muestreo 9 y 8 posiblemente de aguas residuales del sector productivo o antrópico de la zona (contaminación puntual). La secuencia de los sitios de muestreo evidencia en el punto 7 un registro <3 mg/L indicando una mejoría, posiblemente, producto de algún tributario capaz de diluir la carga orgánica.

Sin embargo, en los puntos de muestreo 6, 5, y 4 se observan niveles altos de DBO y DQO (contaminación puntual), probablemente, por escorrentías de aguas residuales provenientes del área de Santa Rosa, donde el punto de muestreo 6 se encuentra próximo a la comunidad de Santa Rosa y al Beneficio, seguramente estos sitios de muestreo se encuentren afectados por escorrentías de las residencias y del procesamiento del café, con aportes de carga orgánica capaz de modificar el flujo natural del agua. En el cuadro 7 se muestran los resultados de los parámetros de DBO y DQO según los puntos del monitoreo de calidad de agua.

Cuadro 7. Resultados de DBO y DQO según puntos de monitoreo de calidad de agua en el río Aquiares.

Puntos de muestreo / **Parámetros**	**P-1**	**P-2**	**P-3**	**P-4**	**P-5**	**P-6**	**P-7**	**P-8**	**P-9**
DBO (mg/L)	< 3	< 3	< 3	(45 ± 6)	(45 ± 0.7)	(37 ± 0.6)	< 3	(37 ± 0.6)	(36 ± 0.6)
DQO (mg/L)	(14 ± 1)	(33 ± 3)	(34 ± 3)	(60 ± 6)	(43 ± 4)	(36 ± 4)	(36 ± 4)	< 10	(62 ± 6)

La demanda química de oxígeno es un parámetro muy relacionado con los niveles de demanda biológica de oxígeno, sin embargo, en los puntos de muestreo 2, 3, 4, 5, 6 y 9 se observan valores por encima de los límites permitidos, según el reglamento de agua superficial de Costa Rica. El reglamento de aguas superficiales establece que los niveles de DQO permitidos para las clases de agua I y II deben estar <20 a 25 y en los puntos mencionados están por encima de los límites. El resultado obtenido indica que los sitios de muestreo están siendo impactados por la presencia de sustancias tóxicas, haciendo la muestra de agua biológicamente resistente a la degradación por aportes de contaminantes.

Otro parámetro de la investigación fue los sólidos disueltos, y cuyo resultado se encuentran dentro de los límites permitidos 250 a <500, según el reglamento de aguas superficiales de Costa Rica del año 2007. De acuerdo con los valores obtenidos, éstos

indican que el cuerpo de agua no percibe una alta concentración de minerales, gases y otros elementos capaces de modificar la composición biológica y química del agua.

El oxígeno disuelto obtenido en los 9 puntos de muestreo registró valores por encima de 5mg/L, lo que indica que existe una disponibilidad de oxígeno adecuado para la vida de las comunidades acuáticas. Posiblemente, la presencia del gradiente altitudinal en la microcuenca sea un factor determinante en los valores obtenidos, ya que aporta mayor porcentaje de oxigenación al cuerpo de agua.

El potencial de hidrógeno (pH) presentó valores dentro del rango establecidos por la normativa de aguas superficiales con registros que van de 7.98 a 8.54. Estos niveles no representan un peligro de alcalinidad ni de acidez que afecten la composición natural de los sitios estudiados, incluso las comunidades acuáticas que se desarrollan en el recurso hídrico.

La conductividad en los puntos de muestreo tuvo un comportamiento entre 146 µS/cm y 214 µS/cm, niveles que se presentan en la mayoría de las aguas dulces naturales, ya que las aguas dulces por lo general presentan una conductividad entre los 10 µS/cm a los 350 µS/cm, indicando que los valores registrados manifiestan que el cuerpo de agua presenta una conductividad dentro de los rangos establecidos.

Los resultados obtenidos para los coliformes fecales registraron valores altos en los puntos de muestreo 1 y 2, en contraste con los demás puntos de muestreo, los cuales registran valores bajos. Probablemente por la presión antropogénica de barrios ubicados en la sección baja de la microcuenca del río Aquiares, como Carmen Lira y el Mora, el primero en mención con un vertimiento directo de aguas residuales sin tratamiento alguno previo a las descargas, situación que aporta una carga de contaminación utilizada por las bacterias termotolerantes.

La evaluación de la calidad del agua en el río Aquiares a lo largo del tramo estudiado, muestra un deterioro a medida que se llega a la sección baja de la microcuenca, donde los barrios aledaños al cuerpo de agua ejercen un aporte a través de cargas de contaminación, con registro de coliformes fecales altos en los sitios de muestreo 2 y 1. De igual forma, los niveles de DBO y DQO mostraron registros altos relacionados en 5 de los 9 puntos de muestreo, en relación con los límites permitidos. Es posible que los niveles observados se deban al aporte de nutrientes y contaminantes derivados de actividades agrícolas, industriales y antrópicas en la microcuenca y al manejo inadecuado de aguas con carga orgánica vertidas sin tratamiento alguno al río Aquiares.

El cuadro 8 presenta un resumen de los parámetros de los análisis físico-químicos y biológicos, según puntos de muestreo.

Cuadro 8. Resumen de resultados de parámetros físico-químicos y biológicos, según puntos de muestreo en el río Aquiares.

	Parámetros físico-químicos y biológicos de calidad de aguas								
Puntos de muestreo	**N (mg/L)**	**P (mg/L)**	**DBO (mg/L)**	**DQO (mg/L)**	**SD (mg/L)**	**OD (mg/L)**	**CF (NMP/100 mL)**	**pH**	**C (µS/cm)**
P-1	2.1 ± 0.3	< 1	< 3	*14 ± 1	194 ± 3	7.96 ± 0.05	*>1,600	8.14	214
P-2	1.9 ± 0.3	< 1	< 3	*33 ± 3	195 ± 3	7.56 ± 0.05	*>1,600	8.24	203
P-3	2.1 ± 0.3	< 1	< 3	*34 ± 3	190 ± 3	7.08 ± 0.05	540	8.21	201
P-4	3.2 ± 0.3	< 1	*45 ± 6	*60 ± 6	166 ± 3	7.54 ± 0.05	350	8.54	198
P-5	3.7 ± 0.3	< 1	*45 ± 0.7	*43 ± 4	223 ± 3	7.57 ± 0.05	920	8.5	203
P-6	3.4 ± 0.3	< 1	*37 ± 0.6	*36 ± 4	166 ± 3	7.80 ± 0.05	79	8.1	199
P-7	3.4 ± 0.3	< 1	< 3	*36 ± 4	159 ± 3	7.58 ± 0.05	350	8.35	172

P-8	*7.9 ± 0.3	< 1	*37 ± 0.6	< 10	186 ± 3	7.70 ± 0.05	350	8.35	164
P-9	2.8 ± 0.3	< 1	*36 ± 0.6	*62 ± 6	147 ± 3	7.66 ± 0.05	350	7.98	146

Fuente: Elaboración propia.

*Valores que superan los límites permitidos en aguas superficiales naturales.

3.3 Relación del índice biótico BMWP-CR con el monitoreo de análisis de parámetros fisicoquímicos y biológico de calidad de aguas del río Aquiares

La relación de los índices BMWP'CR e ICA en el punto de muestreo 1, manifiesta una contaminación incipiente según la propuesta de ICA (Calvo-Brenes. 2013), demostrando que existe una alteración por contaminantes en el cuerpo de agua, sin embargo, el ambiente lótico puede recuperarse naturalmente siempre que exista un cese de actividades que aporten deterioro al recurso hídrico. En este sitio de muestreo, el índice biótico BMWP'CR revela poca diversidad de taxones con presencia de familias tolerantes a niveles de contaminación alta en los cuerpos de agua, posiblemente producto de fuentes con disposición de vertidos al cauce principal del río Aquiares, producto de los barrios aledaños en la sección baja de la microcuenca como el Mora y Carmen Lira, este último no posee sistema de tratamiento de aguas servidas, por el colapso de la misma por una crecida del río hace algunos años atrás.

El índice biótico BMWP-CR agrega valores bajos en este sitio de muestreo valorando las aguas como aguas de calidad muy malas, producto de los niveles de contaminación en el lugar. En la figura 10 se presenta la relación de los puntos de muestreos con los resultados de los índices BMWP'CR-ICA en la microcuenca del río Aquiares.

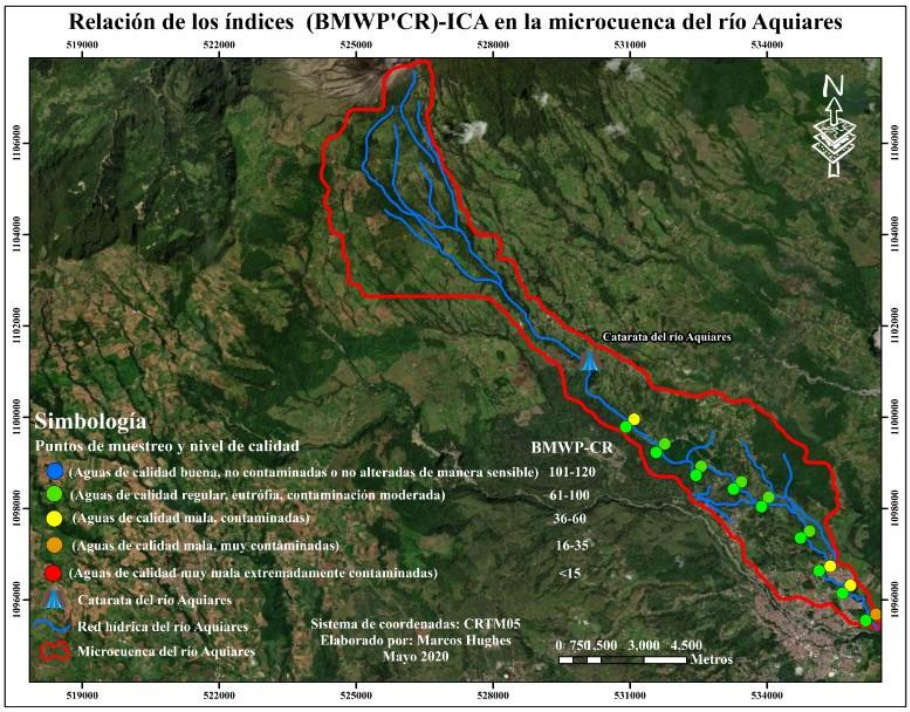

Figura 10. Puntos de muestreo de relación de los índice BMWP'CR con el índice ICA propuesto por (Calvo-Brenes 2013).

El punto de muestreo 2, de igual forma, presenta niveles de contaminación incipiente según el índice de calidad de agua ICA, en este punto de muestreo el índice BMWP-CR muestra una mejoría, observándose mayor diversidad de taxones de macroinvertebrados bentónicos visibles en una mayor valoración según este índice biótico. Aún los niveles contaminación son altos en este sitio de muestreo, valorando las aguas con calidad mala como producto de la influencia de aguas residuales del sector antrópico de la sección baja de la microcuenca. En el cuadro 9 se aprecia la ponderación de los índices BMWP'CR-ICA relacionados con los usos de suelo próximos, según puntos de muestreo en la microcuenca del río Aquiares.

Cuadro 9. Valor de índices BMWP'CR-ICA, usos de suelo según puntos de muestreo en la microcuenca del río Aquiares.

Puntos de muestreo	Índice ICA	Calidad de agua	Código de color	Uso de suelo próximo	Índice BMWP'CR	Calidad de agua	Código de color
P-1	70.5	Contaminación incipiente	Verde	Infr/Agr	32	Muy mala	Naranja
P-2	70.4	Contaminación incipiente	Verde	Infr/Pas	52	Mala	Amarrillo
P-3	72.6	Contaminación incipiente	Verde	Infr	56	Regular	Amarrillo
P-4	73.9	Contaminación incipiente	Verde	Agr/Pas	67	Regular	Verde
P-5	69.3	Contaminación incipiente	Verde	Agr/Pas	82	Regular	Verde
P-6	74.9	Contaminación incipiente	Verde	Infr/Agr/ Pas	76	Regular	Verde
P-7	74.9	Contaminación incipiente	Verde	Infr/Agr	76	Regular	Verde
P-8	72.7	Contaminación incipiente	Verde	Agr/Pas	81	Regular	Verde
P-9	76.0	Contaminación incipiente	Verde	Infr/Agr/ Pas	49	Mala	Amarrillo

Usos de suelo próximos: Infraestructura (Infr), Agrícola (Agr), Pastos (Pas).

El punto de muestreo 3 ubicado en el sector del barrio El Mora, presenta una calidad de agua con contaminación incipiente según la valoración del índice ICA, mientras que el índice biótico BMWP-CR valora las aguas en este sitio de muestreo como aguas de calidad mala por la presencia de poca diversidad de taxones minimizados por la influencia de contaminantes en el cuerpo de agua, permitiendo la dominancia de grupos con mayor tolerancia a los niveles de contaminación. Los resultados del punto de muestreo 4, son diferentes a los obtenidos anteriormente, pues el índice ICA valora las aguas con contaminación incipiente y el índice BMWP-CR como aguas con contaminación regular coincidiendo en que el cuerpo de agua presenta niveles de eutroficación, producto de contaminantes vertidos al cuerpo de agua.

El punto de muestreo 5 se ubica a unos metros del tanque de almacenamiento de agua potable de la ASADA el Mora, en terrenos de la finca la Isabel. Este sitio, de igual forma, presenta una relación positiva según los resultados obtenidos en los índices BMWP-CR e ICA con contaminación regular moderada según la presencia de mayor diversidad de taxones según el muestreo de macroinvertebrados bentónicos en el lugar, con identificación de 17 familias mostrando un incremente en la diversidad de grupos de insectos acuáticos según el gradiente altitudinal.

En el lugar de muestreo predominan usos agrícolas y pastoreo con su huella a través de materia orgánica al cuerpo de agua. El cuadro 7 muestra la similitud existente en los resultados obtenidos en ambos índices según los puntos de muestreo 6 y 7, producto a que la ponderación es similar en ambos resultados. En la figura 11 se muestra la relación de ambos índices según puntos de muestreo, revelando que el cuerpo de agua está recibiendo una carga de contaminación con niveles de eutroficación o contaminación incipiente por aportes de contaminantes desde comunidades y producción agrícola hasta por actividades de pastoreo evidentes en estos sitios de la investigación.

El punto de muestreo 8 presenta mayor gradiente altitudinal, por ende, mayor diversidad de taxones según los resultados de macroinvertebrados bentónicos con aplicación del índice BMWP-CR con una valoración de aguas regular con contaminación moderada. Este sitio de muestreo es influenciado por áreas de cultivos de café y zonas dedicadas a ganadería de doble propósito, el índice ICA valora las aguas con contaminación incipiente coincidiendo con el nivel de calidad de aguas regulares en ambos índices.

En el punto de muestreo 9 se observan áreas dedicadas a ganadería de doble propósito y zonas de cultivos de café en ambos lados del cauce principal del río Aquiares. En la sección izquierda áreas de la finca Aquiares y en el derecho cafetales en áreas de verbena sur, calle Banco. El índice biótico BMWP-CR en este sitio de muestreo valoró las aguas con calidad mala revelando la presencia de contaminantes posiblemente de escorrentías del sector agropecuaria y antrópico del lugar.

El ICA ponderó las aguas en este sitio de muestreo, como aguas con contaminación incipiente asociándola a contaminación regular. Los resultados obtenidos en los puntos de muestreo a lo largo de la microcuenca presentan una relación positiva en 5 de los 9 sitios de muestreo. Valorando el cuerpo de agua con contaminación regular o incipiente con niveles de eutroficación marcados.

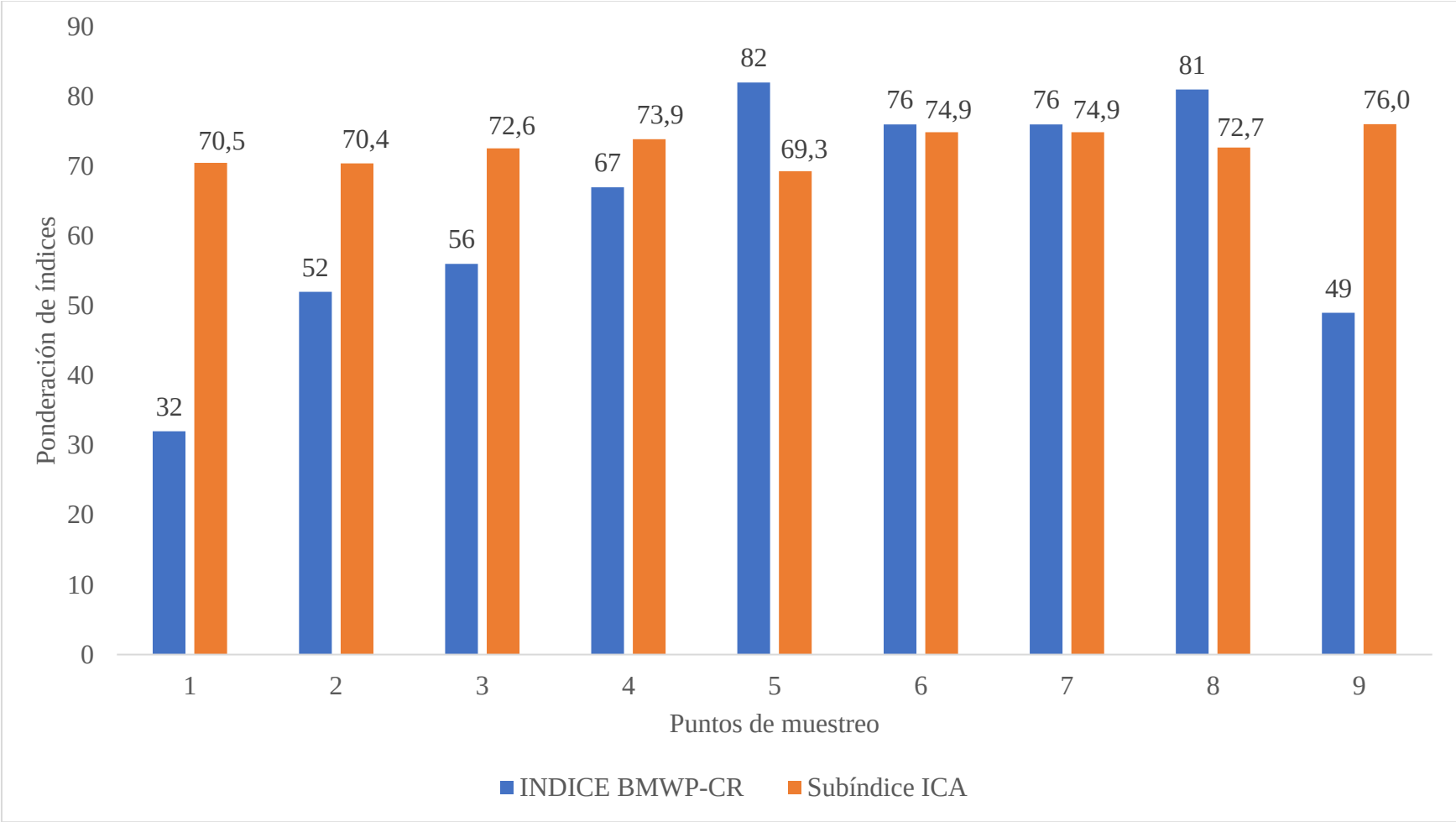

Figura 11. Relación de los índices BMWP-CR-ICA en los diferentes puntos de muestreo de la microcuenca del río Aquiares

3.4 Identificación y evaluación de las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares

Se identificaron 60 posibles fuentes de contaminación a lo largo de la microcuenca, algunas de ellas fueron identificadas a través de un listado de referencias, producto de entrevistas a actores clave relacionados a toma de decisión en la microcuenca (Asadas e instituciones del estado), otras se identificaron a través de recorridos en el área de estudio. Estas posibles fuentes de contaminación son principalmente las producidas por actividades urbano-domésticas, por actividades industriales (hoteles y beneficios) resaltadas en la figura 12.

Figura 12. Posibles fuentes de contaminación del sector industrial en la microcuenca del río Aquiares.

Los entrevistados afirman que la producción pecuaria y agrícola, se distribuye en las tres secciones de la microcuenca. Sin embargo, es mucho más marcada en las secciones medias y altas de la cuenca posiblemente por las condiciones de la zona, las posibles fuentes de contaminación antes mencionadas son mostradas en las figuras 13 y 14.

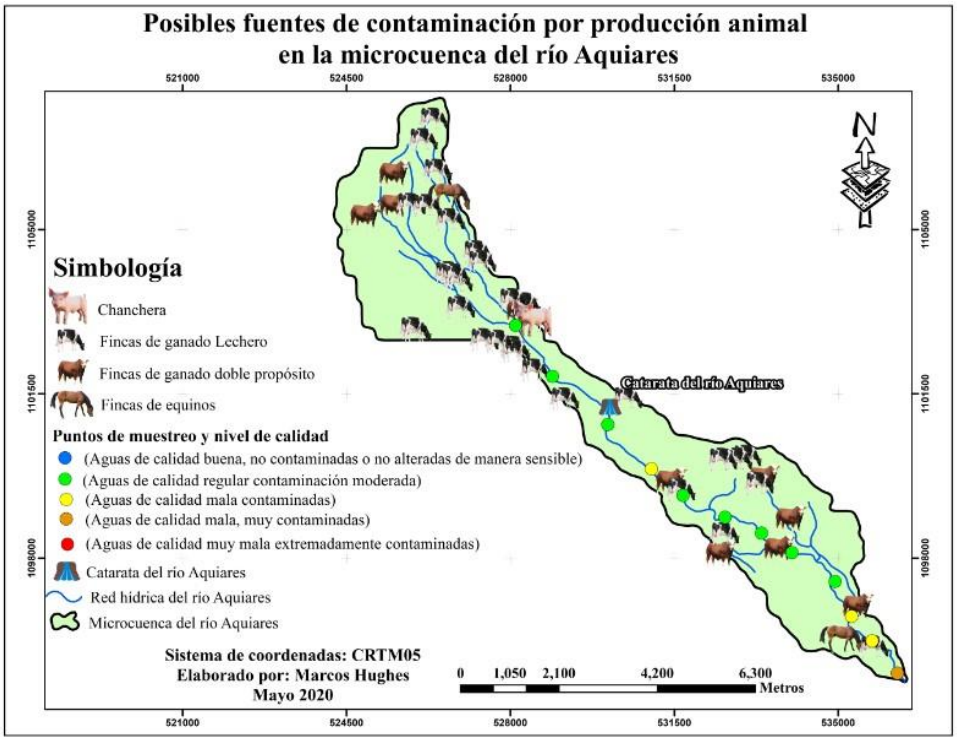

Figura 13. Posibles fuentes de contaminación por producción animal en la microcuenca del río Aquiares.

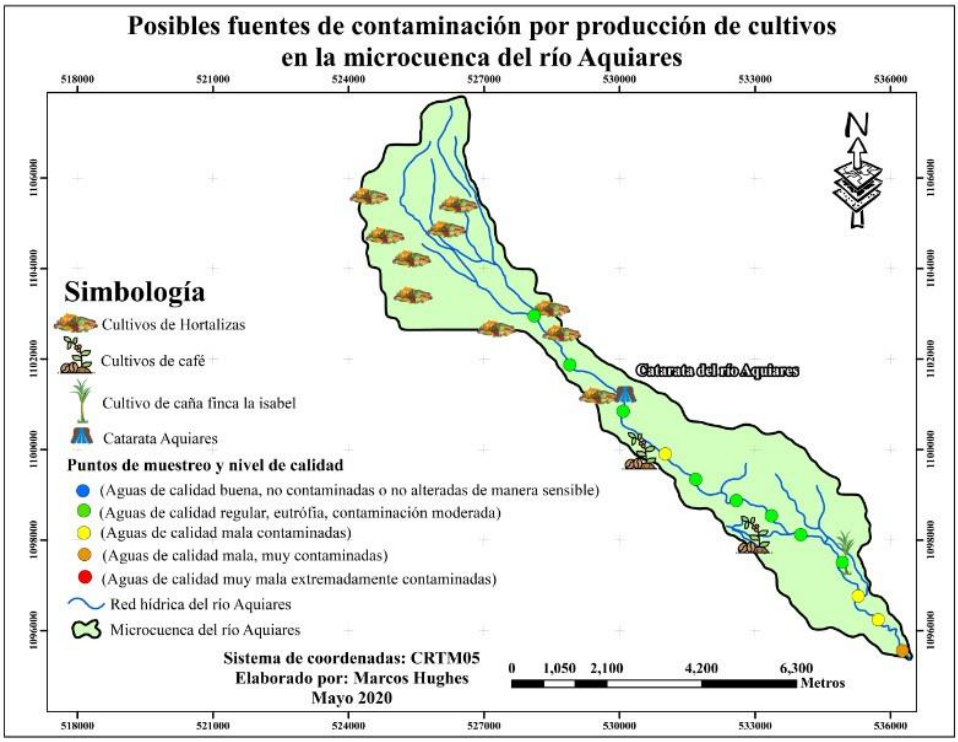

Figura 14. Posibles fuentes de contaminación por producción de cultivos en la microcuenca del río Aquiares.

La percepción sobre las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca es detallada a continuación.

3.4.1 Percepción de las Instituciones

Los entrevistados indicaron que las principales fuentes de contaminación por actividades productivas en la microcuenca se derivan de la producción agropecuaria con un 50%, 33.33% la atribuyen a la actividad industrial presente en la zona, un 8.34% adjudican la contaminación a urbanizaciones o barrios aledaños al cuerpo de agua y un 8.33% indican que los niveles de contaminación son producto de otras fuentes (figura 15).

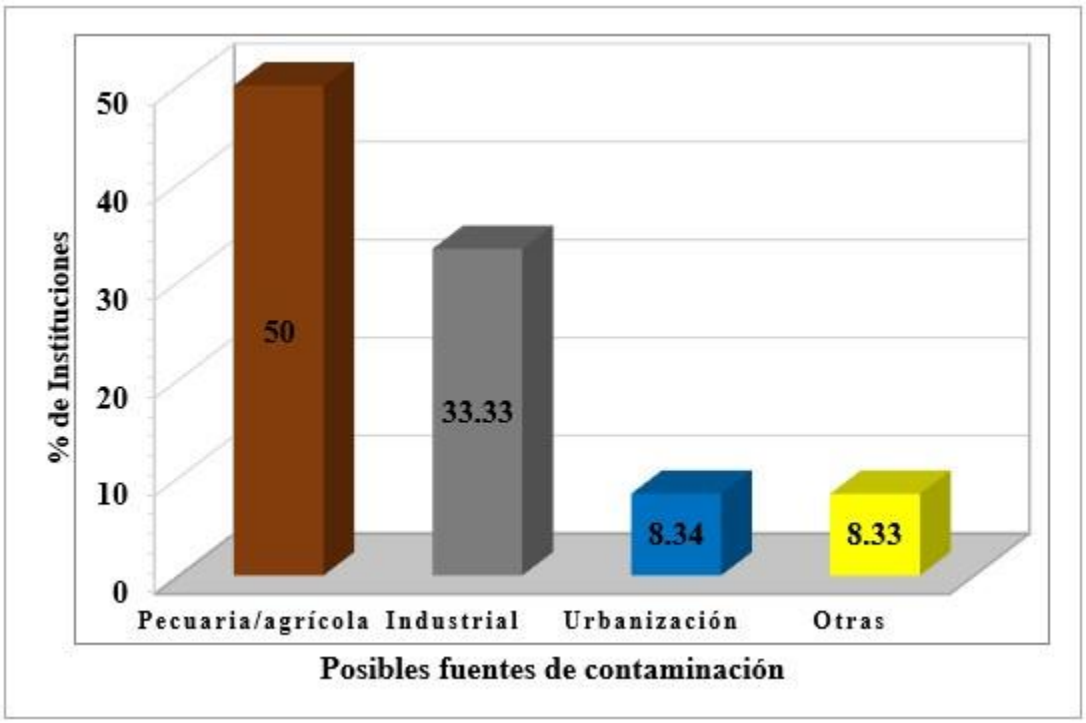

Figura 15. Posibles fuentes de contaminación indicadas por las instituciones (eje X las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca y en el eje Y los resultados de las percepciones de las instituciones en %).

El 66.67% de las instituciones entrevistadas consideran que la calidad del agua es regular, y apenas un 16.66% buena (figura 16), ya que el 67% han observado cambios en el olor y color del agua, así como también variaciones en el nivel del agua del río, 50% han indicado que hay menos aguas en el río y el otro 50% indican que la reducción de nivel depende de la época, y el 67% de los entrevistados consideran que el cambio es causado por el cambio climático. Con referencia a temas de capacitación, el 50% indica haber recibido capacitación en los diferentes temas, tales como contaminación de agua por actividades humanas, tratamiento de aguas residuales, cloración y calidad de agua potable.

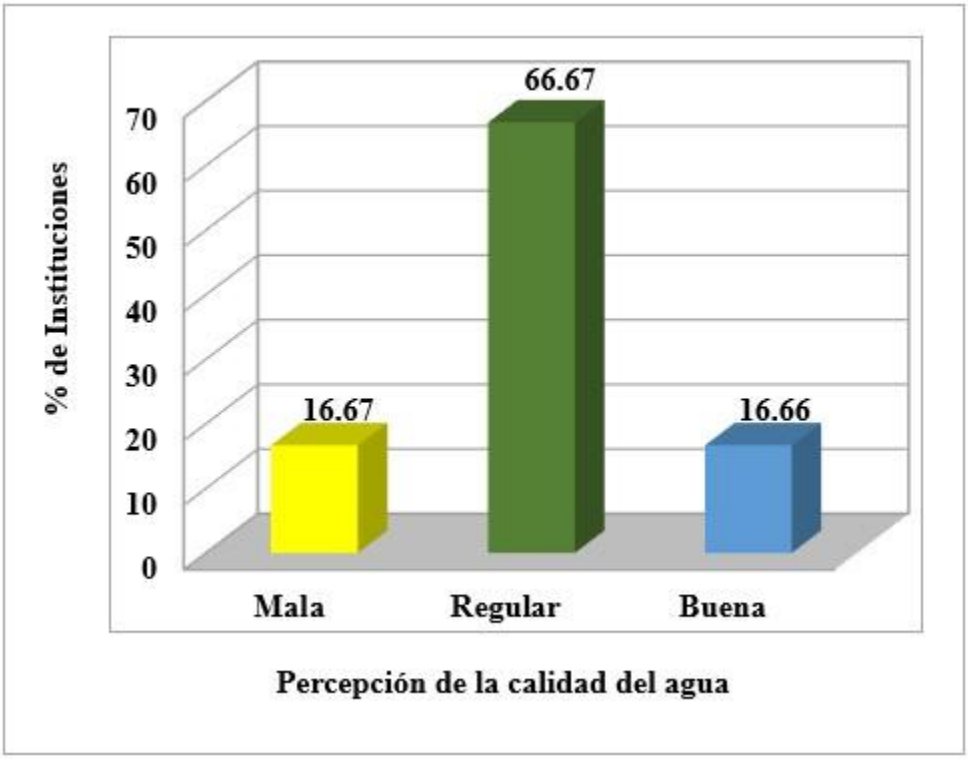

Figura 16. Percepción de las instituciones con referencia a la calidad del agua del río Aquiares (eje X la percepción de la calidad del agua del río y en el eje Y los resultados de las percepciones de las instituciones en %).

3.4.3 Percepción de las ASADAS

El 50% de las personas entrevistadas de las Asadas consideran que el agua superficial del río Aquiares tiene una calidad regular, y un 25% considera que el agua es mala (figura 17), ya que han notado que los cambios de olor y color del agua son evidentes, así como también la reducción del nivel del agua en el río, donde el 57% de los entrevistados indican que el principal factor se encuentra asociado a temas de cambio climático, y un 28% a la deforestación y al crecimiento poblacional.

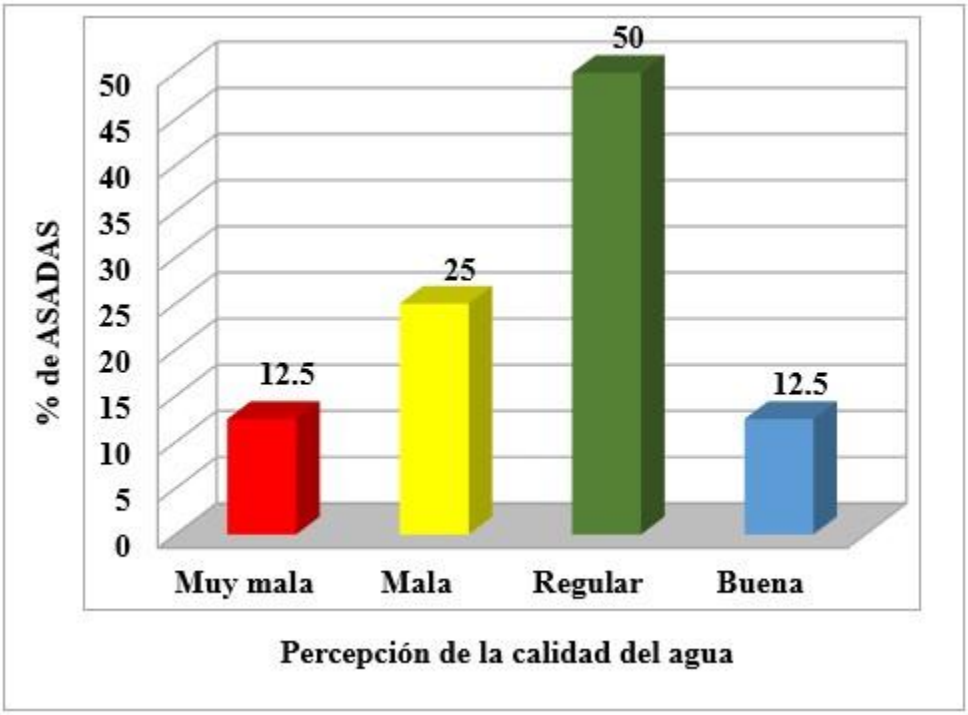

Figura 17. Percepción de las ASADAS con referencia a la calidad del agua del río Aquiares (eje x percepción sobre la calidad del agua del río Aquiares y en el eje Y los resultados de las percepciones de las ASADAS en %).

Las ASADAS tienen conocimiento de ciertos indicadores asociados a calidad de agua, donde un 62.5% utilizan indicadores (físico-químicos), 25% indicadores bacteriológicos con aforos y 12.5 % a reportes trimestral operacionales efectuados por el AyA. En cuanto a la capacitación sobre temas de contaminación y calidad del agua el 87% indica haber tomado alguna capacitación asociada al tema. El 43% menciona que la capacitación recibida es orientada a calidad de agua potable y tratamiento de aguas residuales, 28.6% en temas de cloración, y 14.3% en temas de protección de nacientes.

3.4.4 Percepción de posibles fuentes de contaminación

Las encuestas realizadas abordaron preguntas sobre el uso y almacenamiento del agua en los locales y sobre la percepción de la calidad del agua superficial del río Aquiares; por ejemplo: ¿Cree que ha cambiado la cantidad y calidad de agua del río en los últimos años? Sí (4) 21.05 % y No (1) 5.26 %. Todos los encuestados coincidieron que el río Aquiares ha presentado cambios por diversos factores, algunos los atribuyen a los efectos del cambio climático visibles en la reducción de la cantidad de agua del río y otros a los niveles de deforestación y contaminación producto del sector agropecuario y de las comunidades aledañas al cuerpo de agua.

4. Discusión

4.1 Biomonitoreo de calidad de aguas en el río Aquiares según el índice BMWP-CR

Los resultados obtenidos muestran con mayor distribución, las familias *Hydropsychidae, Baetidae y Libellulidae* en relación con los doce puntos de muestreo, posiblemente por el amplio rango de hábitos alimenticios de estos organismos, desde carnívoros a detritívoros de materia orgánica. Según Roldan (2003), las familias *Hydropsychidae, Baetidae, y Libellulidae* tienen la capacidad de presentar mayor distribución según los diversos microambientes encontrados en el cuerpo de agua. Esto se debe a la dominancia de estas familias a ambientes lóticos y lénticos, estos organismos habitan debajo y adheridos a troncos, orillas con vegetación y rocas, actúan como indicadores de buena y mediana calidad de agua con moderada presencia de oxígeno y materia orgánica en descomposición (Auquilla *et. al* 2005). Los órdenes con mayor presencia de familias según puntos de muestreo fueron Odonata, Díptera, Ephemeróptera, Trichoptera cada uno con una distribución según los diversos hábitats encontrados en los ecosistemas lóticos.

Wallace *et al.* (1996), establecen que las variables del ambiente pueden cambiar según los gradientes de altura, por ejemplo, los niveles de temperatura de las aguas en que se observan fluctuaciones en los patrones de distribución y abundancia de los insectos acuáticos. Por tal razón, se observan variaciones en el índice BMWP-CR bien marcadas en los puntos de muestreos de mayor gradiente altitudinal, en relación con los de la sección baja de la microcuenca, donde se registran índices muchos más bajos.

En el punto de muestreo 12 se identificaron un total de 14 familias de macroinvertebrados bentónicos, con una calidad de aguas regular, eutrófica con contaminación moderada. Siendo este punto de muestreo el de mayor altura con 1560 msnm en nuestro biomonitoreo de calidad de agua. Sin embargo, es el único punto de muestreo que registró la presencia de la familia *Perlidae* del orden Plecóptera habituales en ríos con alturas pronunciadas, son considerados como uno de los grupos con mayor sensibilidad a la degradación del hábitat y del enriquecimiento por carga orgánica producto de aguas residuales (Zúñiga 2010).

Según Rojas y Zúñiga de Cardoso (1995), el género Anacroneuria (*Perlidae*) es un grupo de individuos muy sensibles a las deficiencias de oxígeno en cuerpos de aguas que actúan como receptores de aguas residuales, pues estos organismos habitan debajo de las piedras entre la vegetación o en las orillas de los cuerpos de agua con niveles mínimos de eutroficación. Para Gutiérrez y Fonseca (2010), la biología de estos organismos muestra una depredación en estadios maduros, sin embargo, en estadios más pequeños tienden a ser

omnívoros y detritívoros alimentándose de hojas habituales en el lecho de los cuerpos de agua.

El punto de muestreo 9 mostró una presencia de 13 familias de macroinvertebrados identificados, con aguas de calidad mala contaminadas. Este punto de muestreo presenta un valor bajo en relación con el índice BMWP-CR, lo que indica un impacto de contaminantes a la calidad biológica del agua, esto revela que los organismos encontrados presentan tolerancia a ciertos niveles de contaminación. Posiblemente, el cuerpo de agua está siendo impactado por efluentes que aportan carga de contaminantes desde actividades antropogénica hasta las actividades del sector productivo, pues en el lugar se han identificado escorrentías de aguas residuales provenientes de la parte alta, donde se ubican comunidades como Verbena Norte y Santa Cruz con actividades agropecuarias que posiblemente estén aportando efluentes con contaminantes al cuerpo de agua.

Para Chaves (2007), los valores bajos de abundancia están muy asociados a las fluctuaciones e inestabilidad de hábitat ejercidos, muchas veces, por las variaciones del cauce y cargas de contaminantes. Los resultados de Chaves (2007) son parecidos a los encontrados en este punto de muestreo del estudio, pues en el sitio se observa una baja abundancia de familias posiblemente influenciada por la disminución del cauce, producto de la modificación ejercida para ampliar las áreas de potreros.

Los puntos de muestreos 2 y 3 presentaron una presencia de 12 familias según la cantidad de macroinvertebrados bentónicos colectados, con una valoración de aguas de calidad mala contaminadas. A diferencia del punto de muestreo 1, el cual presenta la menor presencia de familias de macroinvertebrados bentónicos con relación a los puntos muestreados, con 8 familias identificadas según la muestra, con una valoración de aguas de calidad muy mala a muy contaminadas. Según Roldán (2003), las alteraciones antropogénicas limitan la presencia de poblaciones de insectos acuáticos, debido a descargas de material orgánico capaces de condicionar los niveles de oxígeno en el cuerpo de agua.

El estudio propuesto por Roldan (2003) fue realizado en la subcuenca alta del río Vínces, en el cantón Quevedo, provincia Los Ríos, Ecuador. El muestreo evidenció que los sitios de estudio en el cuerpo de agua son fuertemente contaminados al atravesar las zonas urbanas producto de actividades antropogénicas. La calidad del agua fue muchísima menor en áreas con influencia de descargas de aguas residuales, ponderando puntuaciones bajas en el índice BMWP-CR. El estudio realizado por Roldan (2003), presenta resultados similares a los puntos muestreados en la parte baja del estudio en el río Aquiares, donde se observa una huella antropogénica marcada a través de descargas de barrios o urbanizaciones ubicadas en la sección baja de la cuenca.

Según Marchamalo *et al.* (2020*)*, en la cuenca volcánica del río Birrís en el Irazú, los puntos de muestreo de macroinvertebrados bentónicos en la sección alta de la microcuenca, son los que presentan mayor diversidad de familias con una elevada valoración del índice biótico BMWP-CR, producto del gradiente altitudinal en los sitios de muestreos, actuando como estrategia de auto purificación de las aguas con abundancia de oxígeno y una reducción de la carga de contaminantes que llega al cuerpo de agua. Sin embargo, en la sección media y baja de la microcuenca los taxones de macroinvertebrados tolerantes a la contaminación parecen verse favorecidos por los impactos de los barrios que aporten contaminantes al cuerpo de agua. Los resultados obtenidos por Marchamalo *et al.* (2020*)* en estaciones de muestreo en el río Birrís, volcán Irazú, son parecidos a los encontrados en la microcuenca del río Aquiares, ya que los impactos más severos son ejercidos en la sección de la microcuenca con mayor densidad poblacional, por la presencia de los barrios aledaños al río, como Carmen Lira y el Mora, el primero con un sistema de vertido directo de aguas grises y residuales sin tratamiento alguno, previo a las descargas.

4.2 Monitoreo de calidad de aguas del río Aquiares

Nitrógeno (mg/L)

Existe un buen comportamiento del nitrógeno y sus formas (NO_3 y NO_2), con relación a los límites permitidos que van de 5 a <10, según el reglamento de aguas superficiales de Costa Rica para las clases de agua I y II, a excepción del punto de muestreo 8 (7.9 mg/L), aledaño a este punto de muestreo predominan cultivos de café de los sectores de Verbena Sur y Aquiares, posiblemente escorrentías de dichos sectores sean los responsables de los niveles elevados de nitrógeno en el sitio de muestreo. Según Pacheco *et al.* (2006), niveles altos de compuestos de nitrógeno en aguas superficiales están relacionados con actividades humanas como, agricultura y la disposición de desechos de humanos y de animales. Esto indica que el cuerpo de agua en este punto está siendo impactado (contaminación difusa), por escorrentías de diferentes sectores productivos de la zona, y de comunidades de la parte alta, provocando una presión a través de niveles con eutroficación sobre el área, modificando la composición química del agua a través de valores elevados de este elemento en el cuerpo de agua.

Fósforo (P)

El fósforo es un elemento esencial en los ciclos biológicos de los cuerpos de agua, se encarga de actuar como agente limitante en el crecimiento de algas y plantas acuáticas en agua dulce, por ende, su concentración es aplicada en la identificación de problemas relacionados a eutroficación y contaminación a través de productos fosfatados (USDA 1999). Pérez y Rodríguez (2008), concluyen que un ambiente acuático con concentraciones de fósforo <0.05 mg/L no presenta contaminación, y un cuerpo de agua que presenta 0.051 mg/L a 0.100 mg/L es tipificada como agua regular. Sin embargo, >1 mg/L es considerado

un cuerpo de agua de estado hipereutrófico con una calidad muy mala para la vida acuática. Los niveles de fósforo en los resultados obtenidos en los 9 puntos de muestreo se mantienen dentro de los límites en aguas naturales superficiales. Según Hooda *et al.* (2000), los niveles de fósforo en aguas naturales superficiales deben ser <1. Todos los sitios de muestreo registraron valores dentro de los límites mencionados.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno presentó valores elevados con relación de los límites permitidos en 5 puntos de la investigación. Se considera que la concentración de DBO por encima de 10 mg/L es característica de aguas con niveles altos de contaminación, y valores por debajo de los 3 mg/L se considera como aguas con una contaminación nula (Rivera et. al 2004). El punto de muestreo 9 muestra una valoración de demanda bioquímica de oxígeno de (36 ± 0.6), revelando un aporte de materia orgánica alta en el sitio investigado, posiblemente producto de aguas residuales del sector pecuario y antropogénico de la zona. El punto de muestreo 8 registra un incremento en los niveles de DBO (37 ± 0.6), posiblemente por descargas de áreas destinadas a ganadería identificadas en esta zona.

El punto de muestreo 7 registró <3 mg/L indicando una mejoría posiblemente producto de algún tributario capaz de diluir la carga de contaminación. Sin embargo, en los puntos de muestreo 6, 5, y 4 se observan niveles altos de DBO y DQO, posiblemente por escorrentías de aguas residuales provenientes del área de Santa Rosa, aportando una carga orgánica que modifica la composición natural del recurso hídrico. Los resultados obtenidos son similares a los presentados por Mora-Alvarado (1995), en estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventazón, con niveles de DBO elevados en zonas aledañas al sector antrópico, productivo (pecuario y agrícola), con aportes de materia orgánica que modifica la composición de las aguas.

Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es un parámetro muy relacionado con los niveles de demanda biológica de oxígeno, por tal razón observamos valores altos en los puntos de muestreo 2, 3, 4, 5, 6 y 9. Según Hooda *et al.* (2000), se asocian niveles altos de DQO al incremento del pastoreo, concentración antropogénica y vertidos orgánicos e inorgánicos. Cada una de estas condiciones es visible en los sitios de muestreo, situación que explica los valores por encima de los límites permitidos según el reglamento de agua superficial de Costa Rica. El reglamento de aguas superficiales establece que los niveles de DQO permitidos para las clases de agua I y II según su uso, deben estar <20 a 25 y en los puntos mencionados están por encima de los límites.

Los valores de DQO son similares a los reportados por Auquilla *et al.* (2005), en la subcuenca Jabonal en provincia de Punta Arenas. Donde niveles altos de DQO se registraron en sitios con pasturas dedicados a ganadería, precisamente el punto de muestreo 9 de nuestro estudio registró (62 ± 6), este sitio de muestreo presenta áreas de ganadería y cultivo de café hacia la sección baja de la microcuenca, aportando sustancias orgánicas de aguas residuales de diferentes sectores con contaminación puntual y difusa. Probablemente. la carga de contaminantes es diluida producto de tributarios en los puntos 8 y 7. Sin embargo, en el punto de muestreo 6 se vuelve a percibir valores altos de DQO hasta el punto 2, revelando el aporte de vertidos de aguas residuales con carga orgánica e inorgánica que modifican la composición natural del cuerpo de agua.

Sólidos disueltos (mg/L)

Según MINAE (2007), con referencia al reglamento de aguas superficiales de Costa Rica. Los sólidos disueltos en aguas superficiales naturales deben registrar límites de 250 a <500 *(mg/L)*. Los valores obtenidos están dentro 147-223 (mg/L*)*, indicando que el cuerpo de agua no está percibiendo una alta concentración de minerales, gases y otros elementos capaces de modificar su composición natural a través de sólidos vertidos al cuerpo de agua.

Oxígeno disuelto (mg/L)

El oxígeno disuelto obtenido en los 9 puntos de muestreo registró valores de 7.08-7.96 mg/L lo que indica que existe una disponibilidad de oxígeno adecuado para la vida de las comunidades acuáticas. Según Alfaro *et al*. (2015), la concentración de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua superficial debe ser mayor a 5 mg/L y 70% en términos de porcentajes para garantizar la supervivencia de las comunidades biológicas y evitar la muerte de los peces. Posiblemente la presencia del gradiente altitudinal en la microcuenca sea un factor determinante en los valores obtenidos, ya que este aporta mayor porcentaje de oxigenación al cuerpo de agua. Según Marchamalo *et al.* (2018), en la cuenca alta del volcán Irazú a través de biomonitoreo con macroinvertebrados en el río Birrís, resalta que una elevada pendiente en los cuerpos de aguas contribuye a los procesos de autodepuración del recurso hídrico, permitiendo una recuperación natural en los cuerpos de agua con rápidos y cascadas .

Potencial de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno (pH), es un parámetro esencial en los procesos biológicos, donde gran cantidad de organismos logran sobrevivir en rangos específicos de pH (Kannel *et al.* 2007). El muestreo presentó valores dentro de límites establecidos por la normativa de aguas superficiales (MINAE 2007), con registros que van de 7.98 a 8.54 (Cuadro 5). Según Mitchell *et al.* (1991), el potencial de hidrógeno en los cuerpos de aguas es un parámetro de relevancia para los sistemas biológicos y químicos de las aguas naturales. Debido a que

muchas reacciones metabólicas dentro de los organismos requieren un margen específico de potencial de hidrógeno, por ejemplo, en cambios extremos en la escala de pH de (2 o13), ocurren daños en agallas, esqueletos y aletas de organismos acuáticos. Los niveles obtenidos en el muestreo no representan un peligro de alcalinidad ni de acidez que afecten la composición natural de los sitios estudiados, y por ende de las comunidades acuáticas que se desarrollan en el río.

Conductividad (µS/cm)

La conductividad es un parámetro orientado a la medición de la capacidad que tienen los cuerpos de agua en conducir corriente eléctrica, este parámetro varía según sólidos presentes especialmente las sales minerales. Por tal razón, la conductividad en los cuerpos de agua indica concentraciones de iones, producto de fuentes de contaminantes asociados a sólidos totales presentes en el agua (Chapman 1996). Los niveles de conductividad en los puntos de muestreo presento un comportamiento entre 146 y 214 µS/cm, niveles que se presentan en la mayoría de las aguas dulces naturales. Según ANZECC (2000), las aguas dulces por lo general presentan una conductividad entre los 10 µS/cm a los 350 µS/cm los valores manifiestan que el cuerpo de agua presenta una conductividad dentro de rangos observados en aguas naturales.

Coliformes fecales (NMP/100 mL)

Los resultados obtenidos para los coliformes fecales registraron valores altos en los puntos de muestreo 9, 2 y 1 en contraste con los demás puntos de muestreo, en los cuales se resaltan valores bajos con una mejor calidad de agua. El punto de muestreo 9 posiblemente esté recibiendo una carga de materia orgánica de aguas residuales del sector pecuario por la ubicación de fincas y de comunidades de la parte alta de cuenca, la cual es utilizada por las bacterias termotolerantes en sus funciones.

En la sección baja del río Aquiares, la presión antropogénica es la determinante con una reducción de los bosques riparios aledaños al cuerpo de agua, los cuales juegan un papel muy determinante relacionado a la filtración y retención de contaminantes, producto del crecimiento poblacional de barrios ubicados aledaños al río Aquiares como Carmen Lira y el Mora, el primero con un vertimiento directo de aguas residuales sin tratamiento alguno previo a las descargas.

Según Mora *et al.* (2000), la presión antropogénica de poblados próximos a los ríos es causal del aumento en la carga de contaminantes utilizados por bacterias termotolerantes o fecales en su ciclo biológico. Los resultados obtenidos son similares a los presentados por Mora *et al.* (2000), según estaciones de muestreo en la cuenca del río Tempisque, donde los puntos T1 y T2, ubicados previo a la desembocadura son los que reciben el mayor aporte de contaminantes, producto de la presión antropogénica ejercida a través de descargas de aguas residuales de comunidades que habitan en la sección baja de la cuenca.

Los resultados obtenidos revelan que la calidad del agua en el río Aquiares a lo largo del tramo estudiado, muestra un deterioro a medida que llegamos a la sección baja de la microcuenca. Esta condición podría estar relacionada por la falta de alcantarillado sanitario en algunos barrios de la sección baja, donde el aumento de la población es evidente.

El contenido de coliformes fecales o termotolerantes es uno de los factores de mayor efecto significativo en la calidad del agua del cauce principal de la microcuenca. De igual forma, los niveles de DBO y DQO coincidieron con registros altos en 5 de los 9 puntos de muestreo, con relación a los límites permitidos en aguas naturales superficiales, indicando la presencia de materia orgánica con aportes de contaminación producto de fuentes puntuales y difusas en las tres secciones de la microcuenca.

4.3 Relación del índice biótico BMWP-CR con el monitoreo de análisis físico-químicos y biológicos de calidad de agua en el río Aquiares

La relación de los índices BMWP-CR e ICA en la microcuenca del río Aquiares, muestra una disminución de la calidad del agua al descender o perder altura en la microcuenca, pues al relacionar los índices de calidad de agua observamos un tipo de relación positiva en 5 de los 9 puntos de muestreo, valorando las aguas con contaminación regular o incipiente.

El índice biótico BMWP-CR permite tener una referencia permanente del comportamiento del cuerpo de agua superficial en temas de calidad, debido a que los macroinvertebrados bentónicos como indicadores biológicos, presentan poca variación bajo condiciones climáticas del entorno. Mientras que el índice de calidad de agua (ICA), revela a través de parámetros físico-químicos y biológicos las posibles causas de la contaminación en cada punto de muestreo. Complementándose a través de ponderaciones en cada punto de muestreo, mostrando el perfil de contaminación en las diferentes secciones de la microcuenca del río Aquiares.

La calidad del agua en los sitios estudiados se relaciona a los diferentes usos de suelo en la microcuenca, ya que es notorio que los puntos de muestreo ubicados en la sección baja son los más afectados, producto de la presión antropogénica ejercida por los barrios aledaños al cauce principal del río Aquiares. Los puntos de muestreo 1, 2 y 3 en la sección baja de la microcuenca, son los que presentan menor diversidad de familias de macroinvertebrados colectados, con presencia de taxones muy tolerantes a los niveles de contaminación, por ende, valores bajos relacionados al índice BMWP-CR.

Sin embargo, el ICA en los sitios de muestreo ponderó como contaminación incipiente dichos lugares, el cuadro 9 muestra el punto de muestreo 2, con el resultado de menor valoración según la propuesta de Calvo Brenes. Es probable que los niveles altos de coliformes sean los que incidan en la valoración del índice, este sitio de muestreo se ubica aledaño a la comunidad de Carmen Lira con deficiencia de sistema de tratamiento de aguas residuales. Según Calvo-Brenes y Araya-Ulloa (2018) en relación con los índices ICA y holandés en la quebrada La Central ubicada en la parte media de la subcuenca del río Birrís,

Pacayas de Alvarado. Niveles altos de nitrógeno o nitratos y coliformes fecales, se relacionan a escorrentías asociadas a eventos comunes del ciclo hidrológico a nivel de cuencas, esta realidad constituye en una alerta sobre el riesgo de aportes de contaminación por estos indicadores en épocas y lugares con niveles altos de precipitación. Situación similar a nuestros puntos de muestreo, pues el cantón de Turrialba presenta altos niveles de precipitación durante todo el año.

La relación de los índices BMWP-CR e ICA, mostró una relación positiva en 5 de los 9 puntos de muestreo, con una valoración según el ICA de aguas con contaminación incipiente y el índice biótico como aguas de calidad regular con contaminación moderada. Esto revela que el cuerpo de agua está recibiendo un aporte de contaminantes de diversas fuentes puntuales y difusas que influyen en los procesos de eutroficación en el río Aquiares.

El punto de muestreo 9 es el de mayor altura de nuestro muestreo, ubicado en la sección media de la microcuenca, presentó valores con contaminación incipiente en el ICA y aguas de calidad mala en el índice biótico BMWP-CR. Este punto de muestreo es influenciado por escorrentías del sector agropecuario, antrópico e industrial de la zona.

4.4 Identificación y evaluación de las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares

Las posibles fuentes de contaminación en la microcuenca del río Aquiares según las instituciones entrevistadas tomadoras de decisiones en el Cantón de Turrialba están asociadas a actividades productivas, las mismas se derivan de la producción agropecuaria con un 50%, 33.33% la atribuyen a la actividad industrial presente en la zona, un 8.34% adjudican la contaminación a urbanizaciones o barrios aledaños al cuerpo de agua y un 8.33% indican que los niveles de contaminación son producto de descargas de origen volcánicas.

Esta percepción, es similar a lo reportado por Madrigal *et al.* (2020), donde en el 2016 a través de 800 encuestas en la población costarricense, se logró determinar la percepción y el conocimiento sobre gobernanza y gestión del agua relacionando el nivel de impacto de las actividades humanas en el recurso hídrico. Resultando que entre el 97% y 99% de los encuestados afirman que las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales (ríos, quebradas y lagos) en Costa Rica, están relacionadas a aguas residuales domésticas, residuos sólidos, residuos industriales, productos agrícolas asociados a fertilizantes y plaguicidas y un 86% percibe que los desechos animales también actúan como fuentes de contaminación en cuerpos de aguas.

Las instituciones y ASADAS entrevistadas perciben que la calidad del agua superficial del río Aquiares es regular, con cambios de color y olor indicando que el nivel del agua en el río presenta una reducción según la época. La mayoría de los entrevistados consideran que se debe a las siguientes problemáticas: cambio climático, deforestación y al crecimiento poblacional.

5. Conclusiones

- La aplicación del índice biótico BMWP-CR reveló que la mayoría de los sitios de muestreo en el río Aquiares están recibiendo una carga de contaminación de diversas fuentes de contaminantes existentes en la microcuenca, lo cual permite categorizar 8 de los 12 puntos de muestreo, como aguas de calidad regular, eutróficas con contaminación moderada y los 4 puntos de muestreo restantes como aguas de calidad mala a muy contaminadas.

- El río Aquiares presenta una contaminación moderada o regular referente a la calidad del agua en los puntos de muestreo con mayor altura, posiblemente se relaciona con la presencia de bosque ribereño mejor conservado a mayor altitud y la densidad poblacional con mayor dispersión en la sección alta de la microcuenca, ya que la presión antropogénica se ubica en la sección baja en los barrios aledaños al río como Carmen Lira, El Mora y áreas de Santa Rosa.

- Los valores del índice biótico BMWP-CR, fueron bajos en los puntos de muestreo 1, 2, 3, y 9 cada uno de los sitios donde se realizó el muestreo presenta poca cobertura boscosa; los tres primeros debido a la presión antrópica de los barrios en la sección baja de la microcuenca, y el punto 9 producto de la manipulación del cauce principal para ampliar áreas dedicadas a la ganadería. Esto limita la capacidad de filtración y por ende, la absorción de posibles contaminantes, así también la presencia de hábitat para los organismos.

- La calidad del agua superficial del río Aquiares a lo largo del tramo estudiado presenta un detrimento en su calidad a medida que llegamos a la sección baja de la microcuenca. Esta condición podría estar relacionada por la falta de alcantarillado sanitario en algunos barrios de la sección baja, donde el contenido de coliformes fecales o termotolerantes es uno de los indicadores de alarma en relación con la calidad del agua del río Aquiares.

- Los niveles de DBO y DQO son altos en varios puntos de muestreo en las secciones media y baja de la microcuenca, indicando que el cuerpo de agua está percibiendo una carga orgánica de contaminantes producto de los diferentes sectores de la cuenca con fuentes puntuales como escorrentías de aguas residuales de barrios y difusas producto de la intermitencia provocada por quebradas que tributan al cauce principal del río Aquiares.

- La aplicación de los índices BMWP-CR y el subíndice ICA propuesto por Calvo-Brenes, coinciden que el cuerpo de agua presenta una contaminación moderada o regular clase III en seis de nueve sitios estudiados, con relación en los puntos de muestreo de la investigación donde la contaminación es mucho más evidente en los barrios de la sección baja de la microcuenca producto del aumento poblacional.

- Los resultados del índice biótico BMWP-CR y el subíndice ICA propuesto por Calvo-Brenes actúan como complemento en el monitoreo de calidad de agua, debido a que el índice biótico BMWP-CR facilita información sobre contaminación puntual de gran utilidad a nivel preliminar de la investigación. Mientras que el subíndice ICA permite profundizar un poco más, detectando el origen de la contaminación a través de parámetros físico-químicos y biológicos en cada sitio del estudio.

6. Recomendaciones

- Realizar monitoreos de calidad de aguas superficial en el río Aquiares en diferentes épocas del año, para comparar los resultados de indicadores físico-químicos y biológicos en diferentes meses.

- Seguir efectuando estudios a mayor profundidad en los puntos de muestreo que registraron datos altos de DBO y DQO para determinar las posibles fuentes de contaminación.

- Georreferenciar en próximos estudios los puntos de contaminación puntual, para lograr tener un perfil del comportamiento de contaminación en el cuerpo de agua, útil en la gestión del agua en la microcuenca.

- Utilizando el presente estudio como línea base, profundizar en investigaciones asociadas a la evaluación de la calidad de aguas del río Aquiares, aplicando una modelación a través del modelo SWAT en los parámetros físico-químicos y biológicos.

- Promover próximas investigaciones en los usuarios no familiares del agua en la microcuenca (industrias y fincas), buscando minimizar el impacto de posibles contaminantes en el cuerpo de agua, desde los diferentes usos en sus propiedades.

7. Referencias bibliográficas

Alfaro, M; Salazar, F. 2005. Ganadería y contaminación difusa, implicancias para el sur de Chile. Agricultura Técnica 65(3):330-340.

Alfaro, J; Blanco, K; Morera, C. 2015. Programa Observatorio Ambiental-UNA: Indicadores Ambientales 2015. Áreas Temáticas: Recurso Hídrico y Biodiversidad (en línea). Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/308787751_Programa_Observatorio_Ambiental-Una_Indicadores_Ambientales_2015_Areas_Tematicas_Recurso_Hidrico_y_Biodiversidad

Auquilla, C; Astorga, Y; Jiménez, F. 2005. Influence of the land use in the quality of the water in the subwatershed of the river Jabonal, Costa Rica (en línea). Recursos Naturales y Ambiente 48(48):81-92. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6408/Influencia_de_uso_del_suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Ballestero, M; López Lee, T. 2017. El nexo entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica: el caso de la cuenca alta del río Reventazón.

Bravo, L; Saldaña, P; Izurieta, J; Mijangos, M. 2013. La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo (en línea, sitio web). ATL, El Portal del agua desde México. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en http://www.atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=5955:la-importancia-de-la-contaminacion-difusa-en-mexico-y-en-el-mundo&catid=171:proyectos-imta&Itemid=863

Boardman, GD. 2011. Biochemical Oxygen Demand. In Environmental Encyclopedia (4th ed., Vol. 1, pp. 165-166). Detroit, MI: Gale. Recuperado de http://link.galegroup.com.ezproxy.itcr.ac.cr:2048/apps/doc/CX1918700173/GVRL?u=itcr& sid=GVRL&xid=d3e24b58.

Brooks, KN. 2013. Hydrology and the Management of Watersheds. 4 ed. Iowa, Estados Unidos, John Wiley & Sons, Inc.

Brugnoli, E. 1999. Guía para el estudio de la calidad del agua en Centroamérica, una aproximación a la armonización de las normas de calidad. Costa Rica. 95 p.

Calvo-Brenes, G; Araya-Ulloa, A. 2018. Evaluación de dos índices de calidad del agua en varios sitios de la quebrada La Central, Pacayas de Alvarado, Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha . DOI: https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3966.

Cuadra Jirón, W. 2006. Análisis de la calidad del recurso hídrico superficial en la subcuenca del río Turrialba, Cartago, Costa Rica (en línea). Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/397

Chapman, D. 1996. Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. E & FN Spon, Cambridge, Inglaterra.

Guevara, M. 2011. Insectos acuáticos y calidad del agua en la cuenca y embalse del río Peñas Blancas, Costa Rica. Revista de Biología Tropical 59(2):635-654.

Gutiérrez, F. P.E. 2010. Ecología, reproducción, taxonomía y distribución de Anacroneuria spp. Klapálek, 1909 (Insecta: Plecoptera: Perlidae) en Costa Rica. Tesis de Licenciatura con énfasis en recursos acuáticos. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 68 p.

Kannel, P.R; Lee, S; Soo Lee, Y; Kanel, S.R; Khan, S. 2007. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. Environ Monit Assess 132(1-3):93-110.

Madrigal, H; Echeverría, S; Pizarro, Y; Alfaro, C; Jiménez, S; Centeno, J; NL-A y AS-S. 2020. ¿Qué pensamos del agua? Percepción de la población sobre la situación actual del recurso hídrico en Costa Rica : un indicador sobre el conocimiento y la gestión del agua. 34:170-188.

Marchamalo, M; Springer, M; Acosta, R; González-Rodrigo, B; Vásquez, D. 2018. Responses of aquatic macroinvertebrates to human pressure in a tropical highland volcanic basin: Birrís River, Irazú Volcano (Costa Rica). Hidrobiologica 28(2):179-190. DOI: https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n2/marchamalo.

MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica); MINSA (Ministerio de Salud, CR). 2003. Propuesta de reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales de Costa Rica. San José, Costa Rica. 22 p.

MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica). 2007. “Reglamento para la Clasificación y Evaluación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales para la clasificación y la evaluación de la calidad de cuerpos de agua superficiales”, No. 33903 MINAE-S. San José, Costa Rica, Gaceta #178, 17 de setiembre del 2007

Mitchell, M; Stapp, W; Bixby, K. 1991. Manual de campo de proyecto del río. Una guía para monitorear la calidad del agua en el río Bravo. 2 ed. Proyecto del Río. Nuevo México, Estados Unidos. 200 p.

OMS (Organización Mundial de la Salud, Suiza). 2018. Agua (en línea, sitio web). Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://www.who.int/topics/water/es/

OPS (Organización Panamericana de la Salud, Estados Unidosops). 2000. Control de contaminación de recursos hídricos. 2 ed. Lima, Perú, OPS. 130 p.

Pacheco Ávila, J; Cabrera Sansores, A; Pérez Ceballos, R. 2006. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México (en línea). Ingeniería: Revista Académica. 8(2):165-179. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://www.redalyc.org/pdf/467/46780214.pdf

Pepper, IL; Gerba, CP; Brusseau, ML. 2006. Environmental & Pollution Science (en línea). 2 ed. Burlington, Estados Unidos, Elsevier Inc. 553 p. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://www.docdroid.net/js84/environmental-pollution-science-pdf#page=66

Pérez-castillo, AG; Rodríguez, A. 2008. De lagunas tropicales de inundación. 56(December):1905-1918.

Prieto, P. 2008. Aporte de coliformes fecales de fuentes dispersas en la cuenca del río Grande de Añasco. Mayagüez, Universidad de Puerto Rico. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://ezproxy.itcr.ac.cr:2929/docview/305069523/357119A1828F45D9PQ/1?accountid=2 7651.

Ramírez, A; Pringle, CM. 1998. Invertebrate drift and benthic community dynamics in a lowland neotropical stream, Costa Rica (en línea). Hidrobiology 386: 19-26. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://pringlelab.ecology.uga.edu/wp-content/uploads/2013/12/Ramirez-and-Pringle-Hydrobiologia.pdf

Reinoso, G. & M. Longo, M. 2014. Capítulo de Colombia. En: Perla Alonso-Eguíalis, José Manuel Mora, Bruce Campbell y Monika Springer, Editores 2014. Diversidad, conservación y uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico. IMTA México.

Rivera, N.R., Encina, F., Muñoz-Pedreros, A., & Mejias, P.. (2004). La Calidad de las Aguas en los Ríos Cautín e Imperial, IX Región-Chile (en línea). Información tecnológica 15(5), 89-101. Consultado 3 jul. 2020. Disponible

https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000500013

Roldán, G. 2003. La bioindicacion de la calidad del agua en Colombia. Editorial Universidad del Antioquia, Medellín. 170p. Roldán, G; Zúñiga, M; Zamora, H; Álvarez, LF.

Rojas, A.M. & M.C. Zúñiga. 1995. Seminario Invertebrados Acuáticos y su utilización en estudios ambientales. Aspectos taxonómicos. Plecoptera. Sociedad Colombiana de Entomología. Editora Guadalupe. Bogotá, Colombia. 101-120 p.

Sommer, M. 2000. Agua, no al desperdicio, no a la escasez (en línea, sitio web). Consultado 3 jul. 2020. Disponible en http:// www.waste.ideas.es

Springer, M; Vásquez, D; Castro, A; Kohlmann, B. 2007a. Uso del índice BMWP/CR de calidad de agua. Costa Rica, EARTH.

Springer M; Vasquez D; Castro A; Kohlmann B. 2007b. Bioindicadores de la calidad de agua. Costa Rica, EARTH.

Sierra, R. C. A. 2011. Calidad del agua: evaluación y diagnóstico. Recuperado de https://ebookcentral.proquest.com (INDER), I. de D. R. 2014. Informe de Caracterización Integral Básica Del Territorio Pococí. Recuperado de https://www.inder.go.cr/territorios_inder/region_huetar_caribe/caracterizaciones/Caracteriz acion-territorio-Pococi.pdf.

Torres, P; Cruz, CH; Patino, PJ. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica (en línea). Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín 8(15):3. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15s1/v8n15s1a09.pdf

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Francia). 2010. La Eco-hidrología como desafío: experiencias y estudios de caso Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 23. Montevideo, Uruguay (en línea) . Consultado 3 jul. 2020. Disponible en http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/_documentos/sipcyt/bfa001629.pdf

USDA. 1999. A procedure to estimate the response of aquatic systems to changes in phosphorus and nitro- gen inputs. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington DC, EEUU. 34 p.

Wallace, JB; Anderson, NH. 1996. Habitat, life history and behavioral adaptations of aquatic insects (en línea). Merritt, RW; Cummins, KW (eds). Aquatic insects of

North America 41-73. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/272238670_Wallace_JB_and_NH_Anderson_1995_Habitat_life_history_and_behavioral_adaptations_of_aquatic_insects_pp_41-73_In_Merritt_RW_and_KW_Cummins_eds_An_Introduction_to_the_Aquatic_Insects_of_North_America_3rd

Zúñiga, MC. 2010. Diversidad, distribución y ecología del orden Plecoptera (Insecta) en Colombia, con énfasis en Anacroneuria (Perlidae) (en línea). Universidad de la Amazonía. Momentos de Ciencia 7 (2): 101-112. Consultado 3 jul. 2020. Disponible en https://www.semanticscholar.org/paper/Diversidad%2C-distribución-y-ecolog%C3%ADa-del-orden-en-en-Zuniga/82fb4e4bcd1526bce9d5d96ea5a7455e9fd7615d

8. Anexos

Anexo 1. Cálculo del subíndice ICA por parámetros en puntos de muestreo de la microcuenca del río Aquiares, según la propuesta de Guillermo Calvo Brenes para aguas superficiales de Costa Rica.

	Subíndices ICA en parámetros fisicoquímicos y biológicos según puntos de muestreo								
Parámetros	**P-1**	**P-2**	**P-3**	**P-4**	**P-5**	**P-6**	**P-7**	**P-8**	**P-9**
Coliformes fecales	53.81	53.81	108.83	136.96	79.08	260.29	136.96	136.96	136.96
Conductividad	90.84	91.76	91.92	92.16	91.76	92.08	94.08	94.62	95.73
DBO	93.07	93.07	93.07	83.43	83.44	88.77	93.07	88.77	89.37
Fósforo	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45
Nitratos	98.7	98.7	98.48	96.80	95.77	96.04	96.41	98.82	97.50
Oxígeno disuelto	97.57	97.57	92.94	97.39	97.66	99.69	97.75	98.82	98.47
pH	92.99	88.29	89.67	75.57	77.15	94.94	83.39	83.39	101.04
Sólidos suspendidos totales	28.65	28.66	29.21	32.19	25.86	32.19	33.16	26.67	39.97

Anexo 2. Biomonitoreo de calidad de agua a través de macroinvertebrados bentónicos en el río Aquiares

Red D-net utilizadas

Esfuerzo de muestreo

Colección y separación de muestras

Identificación de macroinvertebrados bentónicos en el laboratorio

Índice biótico BMWP-CR

NIVEL DE CALIDAD	BMWP	COLOR REPRESENTATIVO
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	<15	Rojo

Anexo 3. Muestreo de análisis físico-químicos y biológicos de calidad de aguas.

Anexo 4. Actores clave en toma de decisiones en la microcuenca entrevistados.

Entrevistas a instituciones públicas

Anexo 5. ASADAS

Anexo 6. Usuarios no familiares del agua en la microcuenca encuestados