



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
PARTE ALTA MEDIA Y BAJA DE LA MICROCUENCA CRISTAL
ALUMBRE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: JUAN LEONARDO QUIRINDUMBAY CRIOLLO

DIRECTOR: DIRECTOR: ING. CARLOS MARCELO MATOVELLE

CO-DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ

CUENCA - ECUADOR

2021

*Yo me gradúe en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
PARTE ALTA MEDIA Y BAJA DE LA MICROCUENCA CRISTAL
ALUMBRE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: JUAN LEONARDO QUIRINDUMBAY CRIOLLO

**DIRECTOR: DIRECTOR: ING. CARLOS MARCELO MATOVELLE
BUSTOS**

CO-DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ

CUENCA – ECUADOR

2021

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

DECLARACIÓN

Yo, Juan Leonardo Quirindumbay Criollo declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

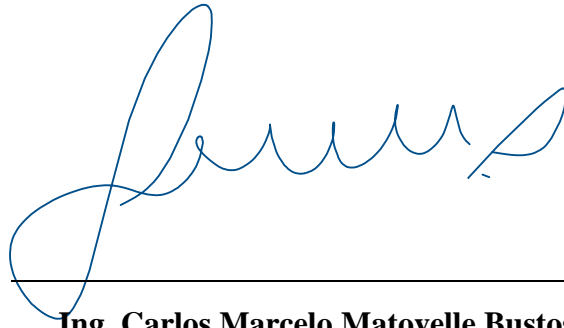
La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Juan Leonardo Quirindumbay Criollo', written over a horizontal line.

Juan Leonardo Quirindumbay Criollo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Leonardo Quirindumbay Criollo, bajo mi supervisión.



Ing. Carlos Marcelo Matovelle Bustos

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Quiero dejar plasmado en el presente trabajo mi eterno agradecimiento, primero a Dios por darme la sabiduría y fuerza para poder concretar las metas que me propuse y a la virgen Santísima de la Natividad por derramar sus bendiciones y brindarme salud.

A la Universidad Católica de Cuenca por darme la oportunidad de prepararme profesionalmente, a los docentes por compartir sus conocimientos, al Ing. Carlos Matovelle director y al Ing. José Luis Solano co-director del presente trabajo de investigación.

A la empresa minera INV METALS ECUADOR S.A. en el nombre de su Gerente de Medio Ambiente, Salud y Seguridad Ocupacional Ing. Vicente Jaramillo Ochoa, por la información hidrometeorológica compartida y el apoyo económico para la elaboración del presente trabajo.

A mis familiares, mi madre y hermanos, por el considerable apoyo económico, esfuerzo y confianza brindada, y así lograr culminar mi preparación como profesional.

Juan Quirindumbay Criollo.

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico con mucha gratitud a mis padres, de manera especial a mi madre Zoila Criollo, quien ha sido un eje fundamental en mi vida quien con su ejemplo, dedicación, cariño y sacrificio ha hecho que mi sueño se haga realidad de formarme como un profesional, gracias a su apoyo moral, sincero y económico he logrado evolucionar como persona y como ser en esta vida.

A mis hermanos y hermanas ya que, con su apoyo me han impulsado a seguir el camino adecuado para que mis metas se cumplan, a mi familia, ya que sin su ayuda no hubiese sido posible la realización y culminación del presente trabajo investigativo.

A mi hija Keyla Margarita por demostrarme su cariño y apoyo para poder culminar mis estudios.

Juan Quirindumbay Criollo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2. Delimitación del Problema	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. General.	4
1.4.2. Específicos.	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas	5
2.2. Gestión de los recursos hídricos y calidad del agua	6
2.2.1. Oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica (MO).	8
2.2.2. Sólidos suspendidos.	9
2.2.3. Nitrógeno.	9
2.2.4. Amonio.	10
2.2.5. Potencial de Hidrógeno (pH).	10
2.2.6. Temperatura.	10
2.2.7. Conductividad Eléctrica.	11
2.2.8. Nitratos.	11
2.2.9. Aceites y grasas.	12
2.2.10. Demanda Bioquímica de Oxígeno.	12
2.3. Modelación hidrológica en la gestión de los recursos hídricos	12

2.4. El software AQUATOOL	14
2.5. La Parroquia San Gerardo	16
2.5.1. Población de la parroquia.	17
2.5.2. Población por rama de actividad.	18
2.6. Microcuenca Cristal Alumbre	19
2.6.1. Morfometría de la microcuenca Cristal Alumbre	19
2.6.2. Jerarquización del sistema de drenaje superficial de la microcuenca	20
2.6.3. Altimetría de la cuenca	20
2.6.3. Descripción de la parte alta de la microcuenca	22
2.6.4. Descripción de la parte media de la microcuenca	22
2.6.5. Descripción de la parte baja de la microcuenca	23
2.6.6. Cobertura de uso de suelo.	24
2.7. Marco Legal	25
2.7.1. Constitución Política de la República.	25
2.7.2. Código Orgánico del Ambiente.	26
2.7.3. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.	26
2.7.4. Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.	27
CAPÍTULO III	28
MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1. Ubicación de la zona de estudio.	28
3.2. Datos de calidad.	30
3.3. El proceso de modelación y SSD	32
3.4. Hidráulica de ríos	33
3.5. Modelación en AQUATOOL	34
3.6. Análisis de resultados	37
CAPÍTULO IV	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Información hidro-meteorológica de la microcuenca Alumbre	38
4.1.1. Variación Caudal de la microcuenca del río Alumbre.	38
4.1.2. Variación Precipitación de la microcuenca del río Alumbre.	44
4.2. Situación de la calidad del recurso hídrico de la microcuenca Alumbre.	48
4.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH).	49
4.2.2. Temperatura.	50

4.2.3. Conductividad Eléctrica.	51
4.2.4. Oxígeno Disuelto.	52
4.2.5. Nitratos.	53
4.2.6. Nitrógeno Kjeldahl.	55
4.2.7. Aceites y Grasas.	55
4.2.8. Sólidos Suspendidos Totales.	55
4.2.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).	57
4.2.10. Demanda Química de Oxígeno (DQO).	57
4.2.11. Coliformes fecales.	58
4.2.12. Arsénico.	58
4.2.13. Hierro.	59
4.3. Análisis comparativo de calidad de agua entre resultados actuales y los resultados históricos.	61
4.3.1. Potencial de Hidrógeno (pH).	61
4.3.2. Temperatura.	63
4.3.3. Conductividad Eléctrica.	63
4.3.4. Oxígeno Disuelto.	64
4.3.5. Nitratos.	65
4.3.6. Nitrógeno kjeldahl.	66
4.3.7. Aceites y Grasas.	66
4.3.8. Sólidos Suspendidos Totales.	66
4.3.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno.	67
4.3.10. Demanda Química de Oxígeno.	67
4.3.11. Coliformes Fecales.	68
4.3.12. Arsénico.	68
4.3.13. Hierro.	68
4.4 Modelo de calidad ambiental ajustado a la dinámica del caudal de la cuenca Cristal Alumbre	69
4.4.1 Diseño del modelo	69
4.4.2 Simulación del tramo inicial	70
4.4.3. Simulación antes del canal Cristal Alumbre	71
4.4.4. Simulación después del canal Cristal Alumbre	72
4.4.5. Simulación del tramo final.	72
4.4.6. Simulación DBO5	73

4.4.7. Simulación Oxígeno Disuelto.	75
4.4.8. Nitrógeno orgánico	78
4.4.9. Amonio y nitratos.	79
CAPÍTULO V	82
CONCLUSIONES	82
CAPÍTULO VI	84
RECOMENDACIONES	84
ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de modelación de las conducciones.....	16
Figura 2. Ubicación de la parroquia San Gerardo.....	17
Figura 3. Mapa de jerarquización de la red de drenaje de la microcuenca Cristal Alumbre...20	
Figura 4. Cobertura de uso del suelo de la microcuenca del río Alumbre.....	25
Figura 5. Ubicación de la microcuenca Cristal Alumbre.....	28
Figura 6. Ubicación de la estación meteorológica, vertedero y puntos de muestras de agua en la microcuenca Cristal Alumbre.	29
Figura 7. Mapa de la ubicación de los puntos históricos de calidad de agua en la microcuenca río Cristal Alumbre.	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Censo de población de la parroquia San Gerardo al 2010 con proyección 2010 - 2020</i>	17
Tabla 2 <i>Población por rama de actividad de la parroquia San Gerardo</i>	18
Tabla 3. <i>Características morfométricas de la microcuenca Cristal Alumbre</i>	19
Tabla 4. <i>Altimetría de la microcuenca Cristal Alumbre</i>	21
Tabla 5. <i>Cobertura de uso de suelo de la microcuenca del río Alumbre</i>	24
Tabla 6 <i>Coordenadas UTM de los sitios muestras de agua en la microcuenca del río Cristal Alumbre</i>	29
Tabla 7 <i>Coordenadas UTM de los puntos muestras de agua histórica en la microcuenca del río Cristal Alumbre</i>	30
Tabla 8 <i>Coordenadas de la estación meteorológica y el vertedero</i>	32
Tabla 9 <i>Variación caudal de la microcuenca del río Alumbre (2007 -2013)</i>	38
Tabla 10 <i>Caudal anual de la microcuenca del río Alumbre (2007 – 2013)</i>	39
Tabla 11 <i>Variación caudal de la microcuenca del río Alumbre (2018-2020)</i>	42
Tabla 12 <i>Caudal anual de la microcuenca río Alumbre (2018 – 2020)</i>	43
Tabla 13 <i>Variación precipitación de la microcuenca del río Alumbre (2005-2014)</i>	45
Tabla 14 <i>Precipitación anual de la microcuenca río Alumbre (2005 – 2014)</i>	45
Tabla 15 <i>Variación precipitación de la microcuenca del río Alumbre (2018-2020)</i>	46
Tabla 16 <i>Precipitación anual de la microcuenca del río Alumbre (2018 – 2020)</i>	47
Tabla 17 <i>pH del río Alumbre</i>	49
Tabla 18 <i>Temperatura del río Alumbre</i>	50
Tabla 19 <i>Conductividad eléctrica del río Alumbre</i>	51
Tabla 20	53
Tabla 21 <i>Nitratos del río Alumbre</i>	54
Tabla 22 <i>Sólidos Suspendidos Totales del río Alumbre</i>	56

Tabla 23 <i>Arsénico en el río Alumbre.</i>	58
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Altimetría de la microcuenca Cristal Alumbre.....	21
Gráfico 2. Registros máximos del caudal del Río Alumbre 2007 – 2013.	40
Gráfico 3. Caudales máximos y mínimos por año del río Alumbre (2007 – 2013).....	42
Gráfico 4. Caudal anual del río Alumbre (2018 - 2020).....	44
Gráfico 5. Precipitaciones anuales (mm) del río Alumbre (2005 - 2014).	46
Gráfico 6. Precipitación anual del río Alumbre (2018 - 2020).....	48
Gráfico 7. pH del río Alumbre.....	49
Gráfico 8. Temperatura del río Alumbre.	51
Gráfico 9. Conductividad Eléctrica del río Alumbre.....	52
Gráfico 10. Oxígeno Disuelto del río Alumbre.	53
Gráfico 11. Nitratos del río Alumbre.....	54
Gráfico 12. Sólidos Suspendidos Totales del río Alumbre.....	56
Gráfico 13. Arsénico en el río Alumbre.....	59
Gráfico 14. Hierro en el río Alumbre.....	61
Gráfico 15. pH en los puntos Jordanita y Alumbre 2007-2012.	62
Gráfico 16. Conductividad Eléctrica en los puntos Jordanita y Alumbre 2007-2012.	63
Gráfico 17. Oxígeno Disuelto en los puntos Jordanita y Alumbre 2007-2009.....	65
Gráfico 18. Sólidos Suspendidos totales en el punto Jordanita 2007-2009.....	67
Gráfico 19. Hierro en los puntos Jordanita y Alumbre 2007 -2012.....	69
Gráfico 20. Simulación para el tramo inicial.	71
Gráfico 21. Simulación tramo antes del canal Cristal Alumbre.	72
Gráfico 22. Simulación después del canal Cristal Alumbre.	72
Gráfico 23. Simulación del tramo final.....	73

Gráfico 24. Simulación DBO5.....	74
Gráfico 25. Simulación de Oxígeno Disuelto.....	76
Gráfico 26. Simulación de Nitrógeno orgánico.....	78
Gráfico 27. Simulación de amonio.....	80
Gráfico 28. Simulación de nitratos.....	80

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Toma de Muestras (Trabajo de Campo)	92
Anexo 2. Instrumentos utilizados	98
Anexo 3. Resultados obtenidos.....	100

RESUMEN

Esta investigación desarrolló las particularidades de calidad del agua en la microcuenca Cristal Alumbre, que permitió establecer la adecuada gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). Para ello, se realizó un análisis de la variabilidad de los registros hidrometeorológicos (precipitaciones y caudales) de la microcuenca en dos períodos (2005 – 2014 y 2018 - 2020), a su vez, se realizó una comparación de los registros de calidad de agua de tres derrumbes de la microcuenca desde la alta hasta la baja, para así diseñar el modelo ambiental de calidad ajustado a la hidrología de la microcuenca, teniendo como resultado, que los registros máximos de precipitación y caudal fue de 45,60 mm y 797,12 s/L respectivamente, los cuales se presentaron en febrero de 2008. Así mismo, al hacer el análisis de la calidad del agua se determinó $\text{pH} < 7$ en la parte media de la cuenca, y concentraciones de hierro $> 0,3$ mg/L, los demás parámetros se encuentran en punto óptimo de calidad. La comparación de registros de calidad con los históricos de la zona en dos períodos (2007 – 2013 y 20018 – 2020), pone en evidencia que hay variación progresiva de la calidad el agua que va en deterioro}

, año tras año. Por último, se utilizó la herramienta AQUATOOL con ayuda de los módulos SIMGIS y GESCAL, para la simulación de los parámetros DBO5, nitrógeno orgánico, OD, amonio y nitrato, teniendo como resultado que el tramo final registra valores = 0 mg/L en septiembre, noviembre y diciembre de 2009 y agosto 2010, debido a demandas de agua a través de canal de riego. Mientras que, en el periodo simulado (2008 – 2010), se obtuvo DBO5 < 2 mg/L, nitrógeno orgánico $< 0,5$ mg/L, OD ≥ 5 mg/L, amonio y nitratos < 1 mg/L. En conclusión, la microcuenca Cristal Alumbre, cuenta con calidad óptima de agua.

Palabras clave: Microcuenca, caracterización, calidad del agua, SSD, GIRH.

ABSTRACT

This research developed the characterization of water quality in the Alumbre Crystal micro-water, which made it possible to establish the right Management Integrated the Resources Waters (GIRH). To do this, sand conducted an analysis of the variability of hydrometeorologic records (precipitation and flow rates) micro-water in two periods (2005 - 2014 and 2018 - 2020), in turn, a comparison was made of the water quality records of three parts of the micro-water (High, Medium and Low), in order to design the environmental model of quality adjusted to the hydrology of the micro-water, having as a result, What records Maximum precipitation from and flow was from 45,60 mm And 797.12 s/L respectively, which were presented in February 2008. Likewise, in the water quality analysis determined pH < 7 in the middle part of the basin, and iron concentrations > 0.3 mg/L, the other parameters are at an optimal point of quality. The comparison of quality records with the historical records of the area in two periods (2007 – 2013 and 20018 – 2020), shows that there is progressive variation in the deterioration of water quality, year after year. Finally, the AQUATOOL tool was used with the help of the SIMGIS and GESCAL modules, for the simulation of the DBO5, organic nitrogen, OD, ammonium, and nitrate parameters, resulting in the final tranche recording values of 0 mg/L in September, November and December 2009 and August 2010, because of the water demands through irrigation channel. Where a meanwhile, in the simulated period (2008 – 2010), was obtained DBO5 < 2 mg/L, organic nitrogen < 0.5 mg/L, OD ≥ 5 mg/L, ammonium and nitrates < 1 mg/L. In Conclusion, the Alumbre Crystal micro-water, has optimum water quality.

Keywords: Micro-water, characterization, water quality, DSS, WRM.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los recursos hídricos en todo el mundo permanecen siendo presionados por el requerimiento de agua para satisfacer las diversas necesidades que están sujetas a ella. Esta exigencia hídrica viene creciendo exponencialmente y sufriendo, además, un deterioro en la calidad por causas antropogénicas, generando así contaminación, que traen como consecuencia perjuicios ecológicos, escasez para cumplir con las demandas urbanas y agrícolas y, situaciones de salud pública principalmente (Matovelle, 2017).

Además, el aprovechamiento de los recursos naturales y su conservación; se viene investigando cada vez más, por estar relacionado al efecto del calentamiento global y su consecuente predominación sobre el desarrollo económico y social. Por tanto, el eje central es fomentar la administración de los recursos naturales de manera eficaz, enfocados en la utilización y conservación del agua, la transparente administración gubernamental y la ayuda de la comunidad internacional son de vital importancia en este sentido (Castaño & Ramírez, 2019).

La investigación debe partir por establecer la disponibilidad de los recursos hídricos existentes, a fin de determinar con precisión el área a estudiar, y para ello la secretaria nacional del agua en Ecuador (SENAGUA, 2009), realizó una distribución de las unidades hidrográficas (UH) en Ecuador, teniendo un total de: 2 UH de nivel I, 4 UH de nivel II, 18 UH de nivel III, 123 UH de nivel IV, 734 UH de nivel V, de las cuales 711 pertenecen a la vertiente del pacífico e islas galápagos y 23 a la vertiente del amazonas. Posteriormente definió un conjunto de 137 unidades hidrográficas entre subcuencas y microcuencas y un número aproximado de 890 microcuencas que aún no se han definido.

En virtud de conocer las características de calidad de agua de las cuencas y microcuencas de Ecuador, encontramos que Caicedo & Gallegos (2016) desarrollaron un estudio que titularon “Caracterización de la calidad de agua del río Yasipan de la provincia de Chimborazo mediante la utilización de bioindicadores-macrovertebrados acuáticos”, en el que realizando la investigación en tres secciones de la cuenca y elección de los cinco puntos de control distribuidos de forma estratégica, en el que pudieron determinar el Water Quality Index

(WQI), con apoyo del índice Biological Monitoring Working Party Colombia (BMWP/Col) para la clasificación en órdenes y familias de los bioindicadores-macrovertebrados acuáticos que hacen vida en la cuenca y a su vez, el Andian Biological Index (ABI), teniendo como resultado, que la calidad del agua de acuerdo al WQI y BMWP/COL fue buena y según el ABI con parámetros que son aceptables de acuerdo a las condiciones altitudinales de la cuenca.

Por su parte, Chiliquinga & Donoso (2012) realizaron un trabajo con el título “Caracterización de la calidad de agua de la microcuenca del río Pachanlica de la provincia de Tungurahua tomando como base la metodología ICA de Montoya”; en el mismo, contemplaron 18 indicadores entre fisicoquímicos y bacteriológicos y realizar una comparación simple de estos parámetros de calidad con ayuda de la prueba estadística de Ji cuadrado. Los resultados determinaron el estado de contaminación del río, teniendo que, para los meses de febrero, marzo y abril de 2012, hay disminución de la contaminación; mientras que en mayo la contaminación es alta y en los meses de junio, julio y agosto se considera altamente contaminado, mostrando un grado de contaminación con una media de 40,71 % de acuerdo con la metodología ICA de Montoya.

Pontón (2018), por su parte, realizó un estudio titulado “Evaluación de la calidad del agua de la microcuenca del río piñas mediante los índices ICA y BMWP” en la que a través de la utilización de los índices ICA y BMWP/Col, considerando la variable ASPT, estableció la relación partiendo de datos registrados para las dos estaciones del año (invierno y verano), con cuatro puntos estratégicos de monitoreo a lo largo del río. Se realizó el ACP para comprender de mejor manera los indicativos de calidad fisicoquímicos de los caudales estudiados. Como resultado, se obtuvo que para los puntos 3 y 4 se presentaron más bajos los valores del ICA, con expresiones de calidad que indican aguas contaminadas y fuertemente contaminadas. Al mismo tiempo, los resultados obtenidos para los índices BMWP/Col y ASPT de ambos caudales, situaron a la microcuenca en categoría muy crítica y crítica.

1.2. Formulación del problema

Actualmente la contaminación de las fuentes de agua natural son problemas que aquejan a los gobiernos nacionales y locales, pues el aumento de la población y las pérdidas de fuentes han hecho que las empresas encargadas de la protección de los sistemas hídricos busquen soluciones factibles y económicamente rentables ante el detrimento de la buena calidad de los

recursos hídricos, pues un efecto negativo influirá directamente en las las ambientes de vida de su población (GWP-INBO, 2009).

Es primordial el estudio de la calidad de agua contenido en una microcuenca hidrográfica para establecer un adecuado manejo del recurso hídrico para con los diversos usuarios y usos convenientes que se presentan en cierta área y así mantener la sostenibilidad de los diferentes ecosistemas (Carchi, 2015).

En los últimos años la falta de un estudio que genere un adecuado manejo de la microcuenca del río Cristal Alumbre ha producido la disminución y alteración de la calidad del recurso hídrico; causando pérdidas económicas, debilitando el estatus socioeconómico de los habitantes de las parroquias aledaña a la cuenca, siendo la más afectada la parroquia San Gerardo, de acuerdo con lo reflejado en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del Gobierno Autónomo Descentralizado parroquial (GADP, 2015).

1.2. Delimitación del Problema

La investigación desarrollada tiene por objeto realizar la caracterización de la calidad del agua en la parte alta, media y baja de la microcuenca Cristal Alumbre, que cubre a la demografía de la parroquia de San Gerardo, la cual según el censo realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2010), menciona que sus habitantes que por lo general se destinan a la actividad agrícola, ganadera, a la silvicultura y la pesca, utilizando el recurso hídrico del río Alumbre para las diversas actividades mencionadas; mediante el análisis físico-químicos en la microcuenca se pretende realizar un análisis comparativo de calidad de agua entre resultados actuales y los resultados históricos, para finalmente diseñar un modelo ambiental de calidad de agua ajustado a la dinámica hidrológica de la microcuenca Cristal Alumbre.

1.3. Justificación

El agua es primordial en las actividades diarias de los seres vivos; es por ello que las microcuencas son importantes para el abastecimiento en las ciudades y poblados; por sus características al estar en la parte baja de los andes le permiten almacenar el recurso hídrico en el suelo y la vegetación, ya que esto promueve el desarrollo de las actividades productivas,

destinando extensiones considerables al desarrollo de la ganadería como actividad principal de generación de fuentes de ingresos económicos (López, 2015).

La microcuenca del río Alumbre es una fuente hídrica sustancial para la parroquia San Gerardo, este recurso es usado para el riego de los pastos, cultivos y abrevaderos de ganado vacuno y equino, siendo estas actividades la principal fuente económica de la parroquia San Gerardo de acuerdo con el censo de población y vivienda y el plan de ordenamiento territorial de la parroquia San Gerardo realizado por él (INEC, 2010).

Debido a la importancia del uso del recurso hídrico se pretende realizar la caracterización de la calidad del agua en la parte alta media y baja de la microcuenca Cristal Alumbre, mediante los análisis fisicoquímicos, para finalmente diseñar un modelo ambiental de calidad de agua ajustado a la dinámica hidrológica de la microcuenca Cristal Alumbre.

La finalidad del proyecto es que mediante el análisis y determinación de la calidad de agua del río Alumbre que permita la adecuada gestión integral del recurso hídrico y de esta manera minimizar el impacto de las actividades agrícolas que se generan en la microcuenca, generando una guía para el adecuado uso y el beneficio sostenible del agua del río Cristal Alumbre.

1.4. Objetivos

1.4.1. General.

Desarrollar la caracterización de la calidad del agua en la parte alta, media y baja de la microcuenca Cristal Alumbre que permita la adecuada gestión integrada del recurso hídrico.

1.4.2. Específicos.

- Analizar la variabilidad de la información hidrometeorológica, así como también, evaluar parámetros fisicoquímicos de calidad del recurso hídrico del cauce principal de la microcuenca Cristal Alumbre.

- Realizar un análisis comparativo de calidad de agua entre resultados actuales y los resultados históricos.

- Diseñar un modelo ambiental de calidad de agua ajustado a la dinámica hidrológica de la microcuenca Cristal Alumbre con el fin de proponer alternativas de gestión adecuadas para el recurso hídrico del río Cristal Alumbre.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica según el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2018), es un área terrestre donde toda el agua que cae en ella (incluidas las lluvias y la nieve descongelada) se concentra en un solo punto de tierras bajas correspondiente a la salida de agua de la cuenca y que, además, esa agua se junta a otra parte del agua como el mar, río, estuario, lago u océano. Es considerada la mejor unidad territorial para la planificación y gestión, ya que permite el manejo y uso de los recursos hídricos y otros recursos naturales relacionados.

La clasificación hidrológica en una cuenca está limitada por la relación del drenaje superficial con la importancia que tiene hacia el curso principal. Los espacios en que se divide la cuenca se conocen como subcuencas y microcuencas. Es decir que una cuenca puede contener a varias subcuencas y estas a su vez, a varias microcuencas. Una subcuenca es toda el área de drenaje que va directo al principal río de la cuenca. Mientras que una de las características de las microcuencas es que son áreas en donde se originan riachuelos y quebradas que drenan hacia pequeños ríos que se unen a otras corrientes y se van formando las cuencas hidrográficas de un río de tamaño grande (Duarte, 2015).

Las subcuencas comprenden territorios entre 150 a 1000 Km²; mientras que las microcuencas abarcan superficies entre 15 y 150 Km², pero ambas representan elementos en donde la planificación estratégica y generación de políticas de conservación, son claves en el uso y protección de los recursos naturales (SENAGUA, 2009).

Las microcuencas interrelacionan componentes biofísicos, biológicos y antropogénicos (socioeconómicos, culturales, institucionales), y constituyen un elemento clave de planificación a nivel local, ya que suministran las condiciones ambientales necesarias para que se puedan desarrollar las actividades productivas de los pobladores que viven en el entorno y dependen de estos recursos tales como el suelo, vegetación, agua y fauna (Wambeke, 2015).

2.2. Gestión de los recursos hídricos y calidad del agua

El agua es el recurso base de casi todas las actividades comerciales, principalmente para la producción primaria como la agricultura y ganadería. De tal manera que la gran demanda del recurso y la poca disponibilidad de este, puede provocar un impacto económico importante, sin restarle importancia a las disputas que se puedan generar o magnificar entre los pobladores aledaños a una cuenca local o, a las comunidades que comparten cuencas transfronterizas con más de un país (Indij, Donin, & Leone, 2011).

Por eso la gestión del agua es tan importante porque permite incluso determinar las condiciones de calidad del agua que se puede utilizar para el consumo. Esta gestión utiliza un enfoque articulado de herramientas como instrumentos económicos, valoración social y ambiental, sistemas de monitoreo e información. Puede ser ejecutado por organizaciones que gestionan cuencas hidrográficas, que pueden ser instituciones formales grandes o pequeñas, o grupos informales (GWP-INBO, 2009).

Una planificación adecuada requiere entender las conexiones entre los sistemas hidrológicos de las tierras de las zonas altas y las de las zonas bajas ya que, al afectarse un componente del sistema hidrológico, se puede crear alteraciones que ponen en peligro todo el sistema y tienen el potencial de generar conflictos en comunidades aledañas. La importancia de la gestión adecuada para la conservación de microcuencas ha sido reconocida en los últimos años a nivel mundial; ya que se detectaron vacíos de información cuantitativa y estadística de los recursos renovables de agua dulce y de la extracción total de agua dulce; así como otros problemas relacionados que incluyen el desconocimiento del caudal ambiental, incoherencia en la recopilación de datos y monitoreo insuficiente (FAO, 2018).

Se puede desarrollar la administración de los recursos hídricos en tres niveles que dependerán en gran medida de la voluntad política, el compromiso de los usuarios del recurso y la existencia de administradores de cuenca (Villacrés, 2015).

Según Villacrés (2015) la gestión de la cuenca se puede desarrollar:

- A nivel local (Considera el plan de microcuencas, plan de gestión del acuífero zonal, plan de asignación del recurso hídrico de la zona en el área de beneficiarios, PDOT, etc.)
- A nivel de implementación (PDOT del Cantón o provincia o plan de gestión de cuenca).

- A nivel de políticas (acuerdos nacionales e internacionales).

Un ejemplo claro de gestión se observó cuando la distribución desigual de los recursos hídricos y el rápido crecimiento urbano en Brasil afectó la calidad del agua de las microcuencas; y la escasez de datos técnicos obligó la participación de la comunidad en el planteamiento de soluciones. El proceso se desarrolla positivamente dentro de parámetros técnicos, sin tensiones políticas; que finalmente logra formular esenciales principios éticos, tales como: no otorgar privilegios departamentales, aprobar cartas públicas por unanimidad y en ausencia de consenso establecer foros de debate para mitigar los riesgos por politización manteniendo la independencia (Indij , Donin , & Leone, 2011).

Un caso temprano de gestión hídrica sucedió en 1998, el municipio de Pimampiro-Ecuador, en donde se experimentó escasez severa de agua para consumo agrícola y humano, por la creciente deforestación de los bosques y la degradación de los páramos debido a quemas y el sobrepastoreo. Se despertó la preocupación en desarrollar acciones para proteger los páramos y bosques manteniendo su capacidad de recarga, regulación del suministro, cantidad y calidad del líquido vital. Es así que luego de la creación de un extenso marco jurídico, en el año 2001 iniciaron un sistema de “Pago por Servicios Ambientales” en donde los usuarios del agua potable de Pimampiro contribuyen con un 20% de su tarifa de agua potable para retribuirlo en los propietarios de zonas altas en páramos y bosques. Los resultados han sido positivos y la disponibilidad de agua ha ido mejorando notablemente hasta la actualidad (Jouravlev, 2003).

Sin embargo, la gestión de los recursos en la mayoría de las ciudades de América Latina carece de visión de futuro ya que se encuentra muy poca información de caracterización o monitoreo de cuencas, planes de emergencia o planes de conservación. La gestión suele realizarse por sector, normalmente de forma centralizada y descoordinada. Por lo general, no existe una política estable y coherente, lo que resulta en una falta de consistencia y sostenibilidad (Indij, Donin, & Leone, 2011).

Por otro lado, al contaminarse o degradarse las fuentes de agua es necesario realizar inversiones muy costosas para su tratamiento o para desarrollar otras fuentes de abastecimiento (Jouravlev, 2003), reconoce que la mejor forma de asegurar el abastecimiento es protegiendo de las fuentes directas de agua, que implica realizar actividades de manejo de cuencas y protección de las áreas naturales. La degradación y contaminación generalizada de los recursos hídricos se origina de un reglamento, legislación y aplicación ineficaz; además, de la falta de incentivos e inversión para el tratamiento de aguas residuales. Muchos expertos discurren a

esta degradación hídrica como de alto riesgo para la salud, ya que las enfermedades de origen hídrico constituyen el mayor problema de la Región (Indij, Donin, & Leone, 2011).

La Alianza Global por el Agua (GWP) considera que la utilización constante del agua afecta la cantidad disponible y su calidad. En varios países en desarrollo, los ecosistemas acuáticos están permanentemente degradados. Esto significa que existen menores beneficios, menor sostén de la vida y grandes peligros y riesgos concernientes al agua. La presión del agua revela la interdependencia del recurso hídrico, la sociedad, la economía y la ecología presentes en la cuenca. Se estima que, en América Latina y Caribe, el 43% de la población rural no cuenta con agua de calidad óptima para el consumo humano, la ganadería y la agricultura (GWP-INBO, 2009).

La calidad del agua que se encuentra en la naturaleza depende principalmente de las características de la cuenca hidrológica, especialmente del suelo y la geología, destacando que las actividades humanas son las que tienen el mayor protagonismo en la contaminación de los ríos. La agricultura activa, la ganadería y la urbanización a lo largo de la subcuenca fluvial son las fuentes principales de contaminación (Pauta, et al., 2019).

La valoración de la calidad del agua puede entenderse como una evaluación de las propiedades químicas, físicas y biológicas y se relaciona con los posibles usos. Los parámetros más comunes utilizados se describen a continuación:

2.2.1. Oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica (MO).

La concentración de OD en el agua da a conocer su estado; uno de los primordiales motivos de la disminución de O₂ es la presencia de MO en el agua, este agotamiento de oxígeno es debido a la degradación de la materia orgánica en este. Ya que son indicadores estrechamente relacionados, el OD y la MO se pueden analizar en conjunto (Matovelle, 2017).

El DO se calcula en miligramos por litro (mg/L) o porcentaje de saturación (%). La diversidad de seres que hacen vida en el agua requiere distintos niveles de OD. Generalmente, el oxígeno disuelto es más bajo a medida que sea más profundo, donde se produce la mezcla con el agua superficial y así, el agua se va disponiendo en capas (EPA, 2020).

Diversos factores afectan la concentración de oxígeno disuelto en el agua, según (EPA, 2020) estos pueden ser:

- La temperatura reduce los valores de OD ya que, a medida que el agua es más caliente es más difícil de disolver el oxígeno.

- Las algas y otras plantas acuáticas también afectan este parámetro. ¿Cómo?

A la luz del sol, cuando las algas realizan la fotosíntesis, producen más oxígeno del que emiten en la atmósfera, lo que da como resultado un contenido de OD a corto plazo superior al 100% (supersaturado). Al anochecer las algas respiran y consumen el oxígeno. Cuando se estimula la floración de las algas, por la contaminación de nutrientes, se evidencian fuertemente fluctuaciones diarias que pueden aumentar y encaminar a malas condiciones acuáticas y muerte de las especies que habitan el medio.

Al morir las algas u otra materia orgánica se incorpora en el medio y se descompone, se consume OD.

2.2.2. Sólidos suspendidos.

La proporción de sólidos en el agua está directamente relacionada con la calidad de esta y puede variar según la fuente y el destino. El cálculo de sólidos como indicador de la calidad del agua se suele utilizar para determinar la calidad para el uso alimenticio humano y la turbidez del agua debido a la presencia de sólidos en suspensión, que afectarán a los organismos acuáticos. Los sólidos en suspensión están compuestos de arcilla, limo, sustancias orgánicas e inorgánicas y otros organismos. Debido a cambios en las actividades biológicas y al impacto de tormentas, su concentración puede variar con las estaciones, entre las cuales la escorrentía que llega al río aumenta la materia en suspensión (Matovelle, 2017).

2.2.3. Nitrógeno.

La presencia natural del nitrógeno en las aguas subterráneas o superficiales es el resultado del ciclo natural del nitrógeno, el mismo que una vez transformado es asimilable por los seres vivos, como el amonio (NH_4) o los nitratos (NO_3). En los ambientes acuáticos se puede encontrar nitrógeno orgánico (NO) ya sea disuelto o particulado proveniente de la muerte de la materia orgánica y después se mineraliza a amonio y su posteriormente se nitrifica y desnitrifica. No obstante, en algunas zonas este ciclo ha cambiado. En cierto sentido, la concentración de nitrato ha aumentado, principalmente por exceso uso de fertilizantes nitrogenados y posterior resistencia por lluvia o riego (Palomares, 2013).

2.2.4. Amonio.

El amoníaco que existe en el agua de forma natural se puede atribuir a la mineralización del nitrógeno orgánico o a la resistencia generada por la escorrentía, las excretas de la macrobiota y reducción de nitrógeno atmosférico por microorganismos. La fuente no natural de amoníaco proviene de las aguas residuales en zonas industriales o urbanas. Dentro del agua, el amonio puede estar en forma de NH_4^+ , pero en el caso de que el pH y la temperatura son altos, la sal de amonio puede existir en la forma no iónica de NH_3 , que es tóxico para los seres acuáticos (Matovelle, 2017).

2.2.5. Potencial de Hidrógeno (pH).

El valor de pH es utilizado para indicar si el agua es alcalina o ácida. Este valor puede variar de 0 a 14 unidades estándar (S.U.), siendo 7 el valor neutro. Un valor de pH por debajo de 7 muestra acidez y un valor de pH por arriba de 7 indica condiciones de alcalinidad o básica. El pH se representa en unidades logarítmicas y su valor entero expresa un cambio de 10 veces en la alcalinidad o acidez del agua. Entonces, el agua al tener un pH de 5, significa que es diez veces más ácida que el agua con un pH de 6. Esto se debe a que los químicos afectan el pH, este es un parámetro químico transcendental para establecer la calidad en el agua (EPA, 2020).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2020), la contaminación puede generar variaciones en el pH del agua y dañar los organismos que hacen vida en ella. Es posible que, en aguas más frías se encuentren valores de pH bajos, que puede ser causados por lluvias ácidas o, incluso, por ácidos orgánicos naturales que se encuentran en los pantanos y ciertos humedales. Por su parte, los procesos químicos asociados con la fotosíntesis ligados a la etapa de floración en algas presentes pueden generar registros de pH superiores a 7.

2.2.6. Temperatura.

La temperatura es una cantidad relacionada con el concepto de calor que es medible con un termómetro. En física, se precisa que está relacionado con la energía presente en el interior de un sistema termodinámico, descrito por el principio cero de la termodinámica (Universidad de Alicante, 2019)

Así mismo, EPA (2020) asegura que la temperatura domina diversos procesos químicos y biológicos que ocurren en el agua. Si esta es muy cálida, puede perjudicar a los peces y la

existencia acuática, causar cambios no deseados en el bioma y aumentar la posibilidad de proliferación de algas.

2.2.7. Conductividad Eléctrica.

Se puede definir como la capacidad de una sustancia o material para permitir que la corriente pase a través de sí misma, es decir, la capacidad de trasladar la corriente en su mismo cuerpo. En el Sistema Internacional de Unidades, la conductividad eléctrica (CE) se indica como Siemens por metro (S/m), pero para simplificar, usamos millisiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) cuando se mantiene a una temperatura de 25°C . La CE del agua está relacionada con la presencia de sales en la solución, esta disociación produce iones que pueden trasladar corriente. Cabe destacar que el agua podrá disolver estas sales dependiendo de la temperatura que tenga, la conductividad tendrá variación conforme con la temperatura del agua (Solís, Zuñiga, & Mora, 2017).

2.2.8. Nitratos.

Se trata de compuestos químicos de origen inorgánicos derivados del nitrógeno, (NO_3^-), los mismos que se localizan de forma natural en concentraciones pequeñas en las aguas subterráneas, superficiales, los alimentos y en el suelo.

Según Agencia de Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ASTDR, 2015), Los recursos naturales y las actividades antropogénicas provocan la dispersión de aerosoles de nitrato en la atmósfera. Se han encontrado nitratos y nitritos en aguas superficiales, agua potable (incluyendo pozos públicos y privados) y subterráneas. El nitrato representa la mayor parte del nitrógeno total disponible en el agua superficial.

La contaminación en el agua es provocada por la escorrentía del agua agrícola (mediante la utilización de fertilizantes químicos o animales) y la descarga de sistemas de pozos sépticos y plantas de efluentes de tratamiento municipales. En la naturaleza, el nitrato y el nitrito se encuentran en rocas ígneas y volcánicas. El nitrógeno existe de forma natural en el suelo y generalmente está relacionado con los minerales del suelo y la materia orgánica. La manera en que se consigue el nitrógeno en el suelo, incluidos nitratos y nitritos, es en una concentración de varios kilogramos por hectárea (ASTDR, 2015).

2.2.9. Aceites y grasas.

Son sustancias orgánicas compuestas esencialmente por ácidos grasos que pueden ser de origen animal y vegetal. Éstos compuestos se clasifican en grasas y aceites formadas del carbono, el hidrógeno y el oxígeno, siendo las fuentes de energía más concentradas en los alimentos. Basándose en proceso de potabilización del agua, es importante conocer la naturaleza de los aceites y grasas, ya que pueden generar problemas a la hora de aplicar algún tratamiento físico o químico, por lo que deben primeramente ser extraídos sobre todo al hacer tratamiento de efluentes en aguas naturales; esto motivado a que cortan con el intercambio de gases entre la atmósfera y el agua, generando que se perturbe el paso de oxígeno al agua, y por ende, bloquean las salidas de CO₂ a la atmósfera; si se encuentran en gran cantidad, pueden generar la acidificación asociado a índices bajos de DO (Vidales, Leos, & Campos, 2010).

2.2.10. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

De acuerdo con el (MVOTMA, 2017) Ministerio de Vivienda, Ordenamiento y Medio Ambiente de Uruguay, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) mide la calidad del agua desde la perspectiva de la materia orgánica existente en la muestra de agua y expresa el total de oxígeno consumido por microorganismos en el proceso de purificación. Mientras más alto es la DBO, más cantidad de materia orgánica se degrada. Este índice se utiliza como guía de carga de materia orgánica vertida de aguas residuales o aguas residuales industriales. Para las aguas superficiales, es un indicador relacionado con el proceso de respiración microbiana. En un entorno natural no afectado, sus valores son relativamente bajos (< 3 mg/L de O₂).

2.3. Modelación hidrológica en la gestión de los recursos hídricos

Ciertos componentes, como la población, el cambio climático y los patrones de uso de los recursos también aumentan de la misma manera la demanda sobre los recursos hídricos. Los métodos tradicionales de análisis fragmentado ya no son efectivos y los métodos generales de gestión del agua se han vuelto críticos por lo que se hace urgente considerar una evaluación generalizada para la gestión del agua. Es lo que se busca con el método de gestión compuesta de los recursos hídricos (GIRH), que es reconocido internacionalmente como un desarrollo eficaz, justo y sostenible de gestionar los recursos hídricos que se encuentran consecuentemente limitados y demandados cada vez más, Equipo Técnico del Proyecto Tomando Con-Ciencia al Agua (ETP TCCA, 2015).

Los modelos hidrológicos son instrumentos de gran utilidad no sólo para entender el funcionamiento de las cuencas hidrográficas sino también, para proporcionar una comprensión cercana de los procesos que pueden ocurrir en este, como la capacidad de convertir las precipitaciones en material de escorrentía y transporte de agua, Aguilar y Díaz (2016). El modelo matemático que se puede emplear a la cuenca hidrológica puede expresar las variaciones que se presentan en el sistema y su respuesta a diversas alteraciones. Su poder predictivo depende del modo en que se estructura y se aplica, así, la calidad de los pronósticos suele ser coherente con la calidad del entendimiento del sistema y del modelo al que está representando. En general, los modelos hidrológicos se definen por variables de estado y indicadores que establecen al movimiento en el área de investigación, estos parámetros pueden ser físicos (medidos directamente y de forma única en respuesta de cada cuenca, como área y permeabilidad), y procesos (mediciones indirectas, coeficientes, medición de escorrentía, capacidad de retención de agua de campo) (Chuquín, 2016).

El modelo hidrológico inicia con la definición de los procesos principales y las variables que intervienen en la generación de caudales, la topografía, geomorfología, y los mecanismos físicos que intervienen en una cuenca. La falta de conocimiento de las propiedades de la cuenca solo conducirá a modelos poco eficientes y bajas posibilidades de predicción. Por este motivo, con base en nuestra comprensión de los sistemas y el procesamiento matemático, el modelo de cuenca debe caracterizar un equilibrio entre precisión y complejidad (Balarezo, 2017).

La adecuada apreciación del balance hidrológico se da mediante la repartición de la precipitación entre escorrentía, evapotranspiración y con la recarga de los diferentes acuíferos. A su vez, modelos hidrológicos con modelos hidráulicos efectivos son una fusión que puede ayudar a resolver varios conflictos de ingeniería hidráulica y dinámica de ríos, distinguiendo las llanuras de inundación, canalización y diseño de estructuras hidráulicas, estabilidad de riberas de ríos y estudios de daños. Represas, proyectos de restauración de ríos o identificación de riesgos relacionados con lluvias intensas (Caro, 2015).

Los modelos representan una herramienta de apoyo básica para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos; se utiliza para contabilizar tanto la entradas y salidas de masa de agua o de soluto en el tiempo y espacio. Es así que los modelos hidrológicos permiten predecir futuros escenarios y tomar medidas correctivas a tiempo; tal es el caso de una posible

explotación de nuevos pozos de bombeo o la construcción de una obra singular en el territorio (Aguilar & Díaz, 2016).

2.4. El software AQUATOOL

AQUATOOL es un ambiente de desarrollo de SSD en la planificación y gestión de cuencas hidrográficas o sistemas del recurso hídrico. Va destinado a actores que encabezan decisiones en los sistemas de los recursos hídricos. Por otra parte, también puede diseñar gráficamente y dar ingreso a la configuración del sistema de agua y su base de datos relacionada para una mayor optimización y simulación. A su vez, admite elegir diversas opciones de gestión y diseño operativo, y también, realizar simulaciones de gestión para diversas alternativas y alcances. Además, la simulación se puede utilizar para estudiar el impacto de posibles cambios en el sistema. Otra de las funciones que permite analizar datos de calidad de agua en ríos y secciones de embalses, de modo que pueda simular la calidad del agua en sistemas complejos (IIAMA, 2019).

AQUATOOL (2020), describe que lo que comprende el programa es una serie de piezas interactivas que admiten editar los datos precisos para el análisis de opciones de gestión de los recursos hídricos de las cuencas en estudio, compuesto de varios módulos para la simulación, con especificidad en el análisis de datos. Teniendo como principales los siguientes módulos:

- **Módulo SIMGES** es utilizado para el estudio en la gestión de cuencas incluyendo uso conjunto. Este módulo permite cualquier configuración delimitados por la capacidad del hardware, por lo que se puede utilizar en cualquier esquema de recurso hidráulico. La simulación se realiza una vez al mes, y el flujo de agua mediante el sistema se reproduce con los detalles espaciales que el usuario desee mediante el uso de algoritmos de optimización de redes móviles conservadores, la gestión y simulación del sistema terrestre se pueden realizar simultáneamente. El algoritmo gestiona la caracterización del caudal en el sistema, tratando de cumplir con la mayor cantidad de objetivos posibles, es decir, minimizar la pérdida y adaptarse a la curva de volumen que son objetivo del embalse y objetivos hidroeléctricos, en la mayor medida posible. A su vez, esta optimización concluye cuando hay un llamado al proceso iterativo de algoritmo de optimización lineal, que puede optimizar la calidad de simulación de procesos no lineales tales como: la filtración, la evaporación y la relación entre las aguas subterráneas y superficiales (AQUATOOL, 2020).

- **Módulo OPTIGES** permite la optimizar la gestión de cuencas en el tiempo, que puede ser configurado para llevar a cabo registros de uno a varios años, de esta manera, casi no requiere datos, apenas la descripción física de la cuenca: pudiendo calcular conexiones, reservorios y requerimientos, y la asignación óptima de recursos en cada período (AQUATOOL, 2020).
- **Módulo GESCAL** es usado para la simulación de la calidad del agua a escala de cuencas. Para llevar a cabo esta simulación, es necesario calcular todos los procesos de mejora de la calidad del agua en tramos de ríos y embalses, y aplicar este cálculo a cada elemento del plan de cuenca desarrollado para Simges, y conectarlos en función del caudal de la cuenca. Aplicarlo a diferentes esquemas de toma de decisiones en la gestión de cuencas hidrográficas, permite analizar las consecuencias de las decisiones tomadas en términos de la calidad del agua de toda la cuenca. En ese sentido, el módulo GESCAL permite modelar el tramo de río considerándolo unidimensional con homogeneidad de concentraciones tanto en el eje vertical como en el transversal. Además, permite definir un estado estacionario en donde para cada mes se estima las condiciones estacionarias de calidad del agua que alcanzaría el tramo de río si las condiciones se mantuvieran constantes dentro de ese intervalo de tiempo, también considera los procesos de advección, dispersión y la introducción de elementos de contaminación difusa. En la modelación de los tramos de río también tiene en cuenta la posible relación hidráulica con los acuíferos ya sea por aporte de agua desde el acuífero o por filtración del río. Por otro lado, la hidráulica se puede modelar tanto por relaciones potenciales como por la ecuación de Manning asumiendo sección trapezoidal (Figura 1). (AQUATOOL, 2020)
- **Módulo SIMRISK** usado en el estudio variado de la gestión de sistemas y cómputo de riesgos en la gestión. Ejecuta una simulación de gestión del sistema para un punto de partida del reservorio en el acuífero, y lo usa como datos para calcular múltiples escenarios que contribuya en tiempo futuro, que puede ser durante un año o más. Utilizando los resultados de todas las simulaciones, se puede calcular las estadísticas del estado del sistema mensualmente, durante el tiempo de simulación, que se puede utilizar como un estimado de la situación al final de la temporada y después del año hidrológico de dos años o más (AQUATOOL, 2020).

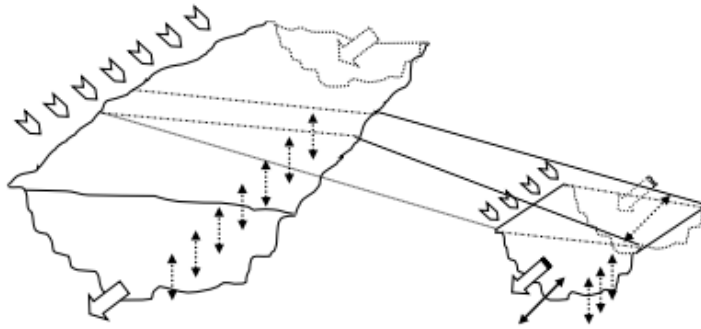


Figura 1. Esquema de modelación de las conducciones.

Fuente: Paredes et al (2013).

Si bien un modelo es un concepto con base teórica, también lleva consigo ecuaciones que permiten la aproximación a la realidad del hecho. La demanda de herramientas de cálculo ha permitido la creación de fórmulas predefinidas en diferentes situaciones específicas. Pero, es necesario contar con medidas de control para cubrir las necesidades de las restricciones de descarga de las masas de agua y las actuaciones de los agentes contaminantes, por lo que es necesario revisar muchas de ellas que se vienen usando cotidianamente. Un número considerable de esta estrategia es el uso de modelos que describan la difusión y transporte de contaminantes en canales naturales. Una vez desarrollado y calibrado el método clásico de gestión de la calidad del agua, se puede usar para dar un pronóstico de la concentración de contaminantes bajo diferentes opciones de tratamiento (Matovelle, 2017).

Para ello, se ha utilizado el modelo de análisis matemático AQUATOOL, para ordenar planes o escenarios técnicos con enfoque a la eficiencia de las demandas de agua de un poblado. La combinación de la simulación hidrológica con tecnicismos y de ingeniería de los especialistas, evidenció que es posible diseñar alternativas de utilización conjunta de los recursos hídricos de una población, generando grandes beneficios ambientales y sociales (Gutiérrez & Aristizábal, 2007).

2.5. La Parroquia San Gerardo

Es una de las tres parroquias que componen en cantón Girón de la provincia Azuay. Con una superficie de 5.189,29 ha que representan el 14,81% de la superficie total del cantón Girón y está ubicada al noroeste de la cabecera cantonal, (GADP, 2015). Colinda “en el Norte con la parroquia Girón y Victoria del Portete del cantón Cuenca, al Sur y al Este con la

parroquia Girón, y al Oeste con el cantón San Fernando específicamente con las parroquias San Fernando y Chumblín” (Figura 2) (GADP, 2015).

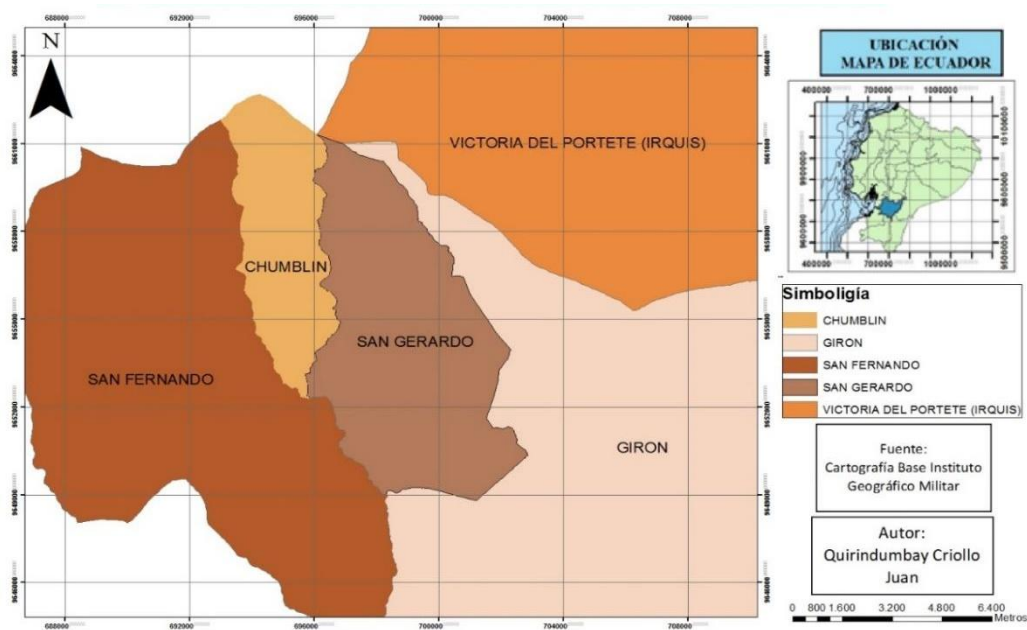


Figura 2. Ubicación de la parroquia San Gerardo.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.1. Población de la parroquia.

Según el censo del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) del Cantón Girón, la población de San Gerardo para el último censo oficial 2010, es de 1169 personas (GADP, 2015) predominando el sexo femenino con un 53,98% y 46,02% masculinas, sin embargo, aunque aún no hay un censo oficial emitido por INEC para 2020, publicaron una proyección de la población para el período 2010 - 2020, que refleja comparándolo con el de 2010, un aumento poblacional de 12,77% aproximadamente para la provincia Azuay, cantón Girón, del área rural (Tabla 1).

Tabla 1

Censo de población de la parroquia San Gerardo al 2010 con proyección 2010 - 2020.

Sexo	Población al 2010	Proyección 2010 - 2020
Masculino	514	581
Femenino	604	681
Total	1119	1262

Fuente: INEC, 2020.

2.5.2. Población por rama de actividad.

De acuerdo con el Gobierno autónomo Descentralizado del Municipio Girón (GAD Cantón Girón), expone en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PEDOT) del Cantón Girón 2014 – 2023, que la población económicamente activa (PEA) corresponde a un total de 414, siendo 232 hombres y 182 mujeres, en distintas ramas económicas (Tabla 2), solamente en la parroquia San Gerardo (GADP, 2015).

Tabla 2
Población por rama de actividad de la parroquia San Gerardo

Rama de actividad (Primer nivel)	Hombre	Mujer	Total
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	137	139	276
Explotación de minas y cantera	4	1	5
Industrias manufactureras	12	6	18
Construcción	45	1	46
Comercio al por mayor y menor	11	9	20
Transporte y almacenamiento	5	1	6
Actividades de alojamiento y servicio de comidas	4	3	7
Actividades profesionales, científicas y técnicas	---	1	1
Administración pública y defensa	5	1	6
Enseñanza		3	3
Actividades de la atención de la salud humana	1	1	2
Artes, entretenimiento y recreación	---	1	1
Otras actividades de servicios	2	1	3
Actividades de los hogares como empleadores	---	6	6
No declarado	3	7	10
Trabajador nuevo	3	1	4
Total	232	182	414

Fuente: (GADP, 2015), PDOT 2014 – 2019.

El suelo que predomina en la parroquia San Gerardo corresponde al orden taxonómico Inceptisol, con un porcentaje de extensión de territorio de 34,73%. Son suelos con capas más débiles, y la tasa de descomposición de la MO es baja, por lo que en la MO se acumulan arcillas sin formas causando mal drenaje, por lo general se ubican en pendientes pronunciadas y rocas

recién expuestas. El orden taxonómico Vertisol con un 0,393% de extensión del territorio es la de menor ocupación. Estos suelos se caracterizan por su alta fertilidad natural (GADP, 2015).

2.6. Microcuenca Cristal Alumbre

Representa un escenario adecuado la cuenca hidrográfica para la planificación y aplicación de diversas medidas orientadas a corregir impactos ambientales provocados por el mal uso de los recursos naturales. El manejo de cuencas previene desastres naturales favoreciendo la reducción y control de todos los problemas que afectan la vulnerabilidad de la cuenca; como las inundaciones, sequías, desertificaciones, deslizamientos, entre otros (Villacrés, 2015).

El estudio consistió en el análisis de la calidad de agua de la microcuenca del río Cristal Alumbre con el fin de forjar una caracterización que posibilite desarrollar un plan de preservación del recurso hídrico y disminución del impacto ambiental de la zona.

2.6.1. Morfometría de la microcuenca Cristal Alumbre

La morfología de cada cuenca hidrológica es directamente proporcional a la probabilidad de captación de agua frente a eventos climáticos, y a medida que se genera la respuesta a los mismos (como la escorrentía superficial), se expresa en términos de caudal, transporte de sedimentos e incidencia de sedimentación. Nutrientes en todo el ecosistema que la componen (Lux, 2016).

En ese sentido, Lux, (2016) plantea que el análisis morfológico es el estudio de un conjunto de variables lineales, superficiales, de relieve y de drenaje. Es posible comprender las características físicas de la cuenca, para poder compararla entre múltiples cuencas, y ayudar a explicar la función hidrológica y determinar el desarrollo de su estrategia de manejo.

Para ello, Fraga, et al., (2019) comentan que los rasgos morfológicos, como área, perímetro, altura máxima y mínima, longitud, ancho y coeficiente de compactación ayudan a caracterizar la microcuenca hidrológica. A continuación, se detallan los datos de la microcuenca Cristal Alumbre en la Tabla 3.

*Tabla 3.
Características morfométricas de la microcuenca Cristal Alumbre.*

Características Morfométricas de la cuenca			
Área de la cuenca Cristal Alumbre	A	km ²	7,453801
Perímetro	P	km	19,367101

Altura máxima	z_max	ms.n.m	3871
Altura mínima	z_min	ms.n.m	2867
Longitud de la cuenca	L	km	7,182738
Ancho de la cuenca	W	km	1,03773812
Coeficiente de compacidad	Kc		1,98624928

Fuente: (Fraga, Morales, Sisalisima, Quirindubay, & Zuñiga, 2019).

2.6.2. Jerarquización del sistema de drenaje superficial de la microcuenca

Fraga, et al., (2019), la jerarquía de la red de drenaje superficial de la microcuenca del río Alumbre es de segundo plano, el cual se muestra en la figura 3.

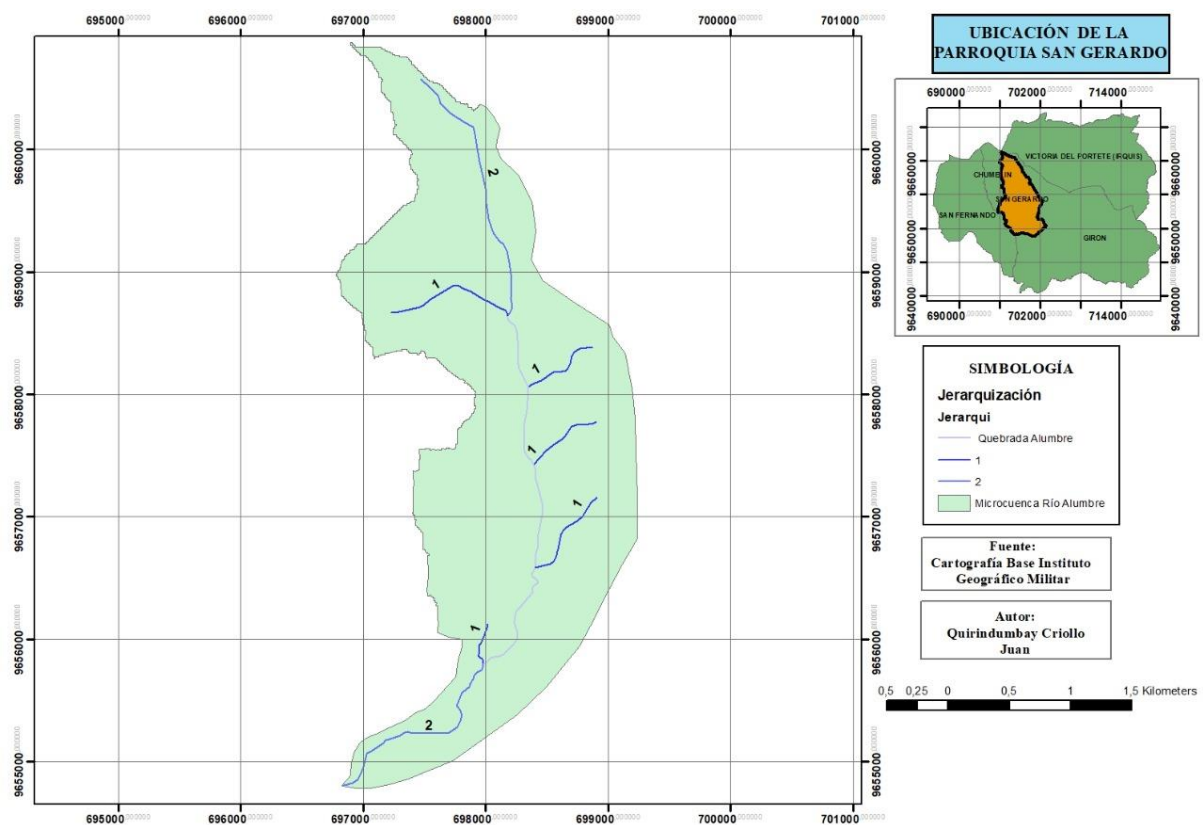


Figura 3. Mapa de jerarquización de la red de drenaje de la microcuenca Cristal Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

2.6.3. Altimetría de la cuenca

La altura registrada para la microcuenca Cristal Alumbre es la máxima (AM) de 3871 msnm y la mínima (Am) de 2867 msnm (Tabla 4), y un perímetro de 19,37 km, en el cual, se determinó la superficie en cada tramo de altitud de la microcuenca (Gráfico 1), el cual permite describir la morfometría de esta en toda el área (Fraga, Morales, Sisalisima, Quirindubay, & Zuñiga, 2019).

Tabla 4.
Altimetría de la microcuenca Cristal Alumbre.

Altitud	% superficie
2867 – 2950	2
2951 – 3034	5
3035 – 3117	4
3118 – 3201	7
3202- 3285	9
3286 – 3368	9
3369 – 3452	5
3453 – 3536	6
3537 – 3619	17
3620 – 3703	23
3704 – 3787	11
3788 – 3871	1

Fuente: Elaboración propia.

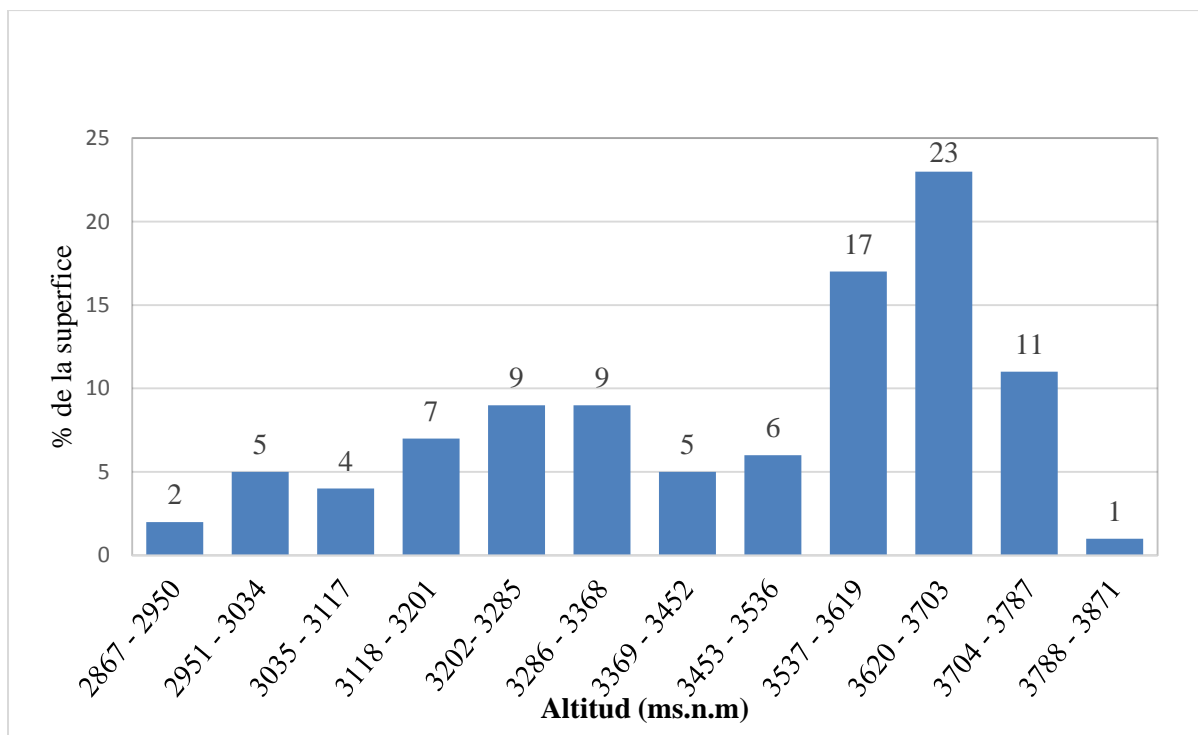


Gráfico 1. Altimetría de la microcuenca Cristal Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

2.6.3. Descripción de la parte alta de la microcuenca

El nacimiento del río Alumbre se encuentra en los humedales de la Cordillera de los Andes, a 3668 metros sobre el nivel del mar. En esta parte alta, las aguas tienen las siguientes características de acuerdo con el análisis realizado por INV Minerale Ecuador SA (INVMINEC, 2019):

- Agua cristalina, con sólidos presentes y materia flotante ausente.
- Temperaturas que oscilan entre los 9° y 11,5° C.
- pH < 7.
- Conductividad eléctrica > 20 uS/cm.

Durante es estudio se realizó el levantamiento de la línea base observando, que la presencia de peces es ausente, pero se evidencia la presencia de macroinvertebrados. A pocos metros del nacimiento del río, el caudal ha cambiado por la acción de un manantial que contiene una coloración rojiza, la cual se determinó con los análisis de laboratorio que es a causa de la alta cantidad de hierro. A su vez, El suelo es húmedo y negro, lo que se puede observar al tomar muestras, debido a este aspecto la vegetación está conformada principalmente por paja (*Stipa ucha*), en la parte más baja se encuentra sembradíos de pinos (*Pinus*). En el punto más bajo de la parte alta de la microcuenca, debido a las lluvias intensas y los cambios de uso de la tierra (plantaciones de pinos) en la zona, el suelo se ha erosionado continuamente.

2.6.4. Descripción de la parte media de la microcuenca

INVMINEC, (2019) Describe las características que podemos encontrar en esta parte media de la microcuenca Cristal Alumbre con lo siguiente:

- Agua cristalina, con sólidos presentes y materia flotante ausente.
- Temperaturas que oscilan entre los 11° y 12° C.
- pH < 4.
- Conductividad eléctrica > 120 uS/cm.

En esta parte no se observaron peces, pero sí macroinvertebrados. Debido a las características del flujo de agua, se notó la presencia de metales pesados porque el agua del río presenta coloración roja.

Además de ello, se notó que el agua del río Cristal Alumbre es utilizada por los pobladores de la comunidad de San Gerardo para abrevadero del ganado vacuno y equino, sin embargo el uso en su mayoría del caudal del río es utilizado para el riego de los pastos en época de estrés hídrico, habiendo una captación denominada Canal de riego Cristal Alumbre, dicho canal de riego carece de un sistema tecnificado para el aprovechamiento total del agua (riego por canal abierta).

El suelo es húmedo y negro, y la mayor parte se utiliza para actividades ganaderas en este sector. Por otro lado, debido a la deforestación de bosques primarios, la construcción de plantaciones externas, vías de acceso para las comunidades cercanas el suelo se ha erosionado.

2.6.5. Descripción de la parte baja de la microcuenca

La parte baja de la microcuenca Cristal Alumbre presenta las siguientes características, el cual es el resultado del análisis realizado por INVMINEC, (2019):

- Agua cristalina, con sólidos presentes y materia flotante ausente.
- Temperaturas que oscilan entre los 12° y 13° C.
- pH > 7.
- Conductividad eléctrica > 70 uS/cm

Debido al uso de fertilizantes para mejorar los pastos para la actividad ganadera y agropecuaria, el suelo tiene un alto contenido de materia orgánica. Por otro lado, en los pastizales, el uso de plaguicidas en la extracción de lastre y las fuertes lluvias invernales pueden causar erosión y degradación del suelo.

Debido a la gran cantidad de materia orgánica y al bajo nivel del agua, hay una gran cantidad de algas y olores desagradables, lo que conduce al flujo de microcuencas hacia la eutrofización principalmente producida por bovinos y equinos. Debido a que, la ausencia del manejo integral de la microcuenca se hace notar al observar al ganado pastando a la orilla del río.

En la zona baja de la microcuenca se encuentra un canal de riego denominado San Martín, el cual logra la captación del agua del río antes de la aportación a la subcuenca Cristal, siendo beneficiados los habitantes de la comunidad de San Martín, el uso inadecuado y la falta de riego tecnificado en este sector ocasionado que el caudal del río se seque casi en su totalidad.

La vegetación de la zona es en su mayoría son los pastizales divisoando pocas siembras de cultivos de: papas, maíz, etc.

2.6.6. Cobertura de uso de suelo.

En la microcuenca del río Cristal Alumbre existen diferentes tipos de cobertura de usos de suelos (Figura 3). Según GAD en el PDOT 2014 – 2019, el tipo de cobertura de uso de suelo de mayor extensión es de pastos con 2354,3 Ha, seguido de páramos con 1397 Ha mientras que los suelos con menor uso y cobertura lo representan los centros poblados con 2,8 Ha (Tabla 5).

Tabla 5.

Cobertura de uso de suelo de la microcuenca del río Alumbre

Cobertura de uso de suelo	Extensión (Ha)
Pastos	2354,3
Páramo	1397
Bosques intervenidos	580, 8
Bosques Naturales	379,8
Cultivos Transitorios	10,5
Cuerpos de agua	43,3
Centros Poblados	2,8

Fuente: (GADP, 2015), PDOT 2014 – 2019.

En la figura 4, se observa el mapa que corresponde a la microcuenca del río Alumbre distribuido en: parte baja, parte media y parta alta. En la parte inferior, según el tipo de cobertura, se encuentra la vegetación de pastos y arbustos, compartida con la parte media de la microcuenca. A su vez, en la parte alta se consiguen tierras altas (páramos) y forestación. En la parte superior de la microcuenca a una altitud de 2800 m, se consigue un área de bosque de alta montaña, mientras que la microcuenca inferior corresponde a un bosque de baja montaña a una altitud aproximada de 1800 m. La flora nativa ha sido extinguida casi en su totalidad y replantada en pastos y cultivos de ciclo corto, principalmente con el cultivo de maíz. En la zona aún existen pequeños remanentes de vegetación, especialmente en las quebradas (GADP, 2015).

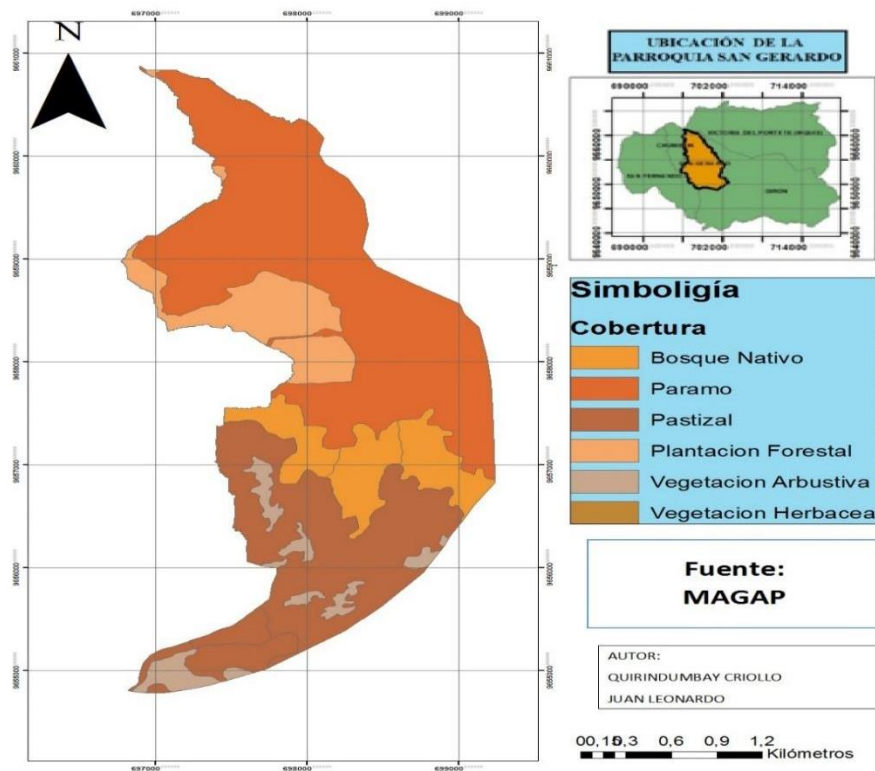


Figura 4. Cobertura de uso del suelo de la microcuenca del río Alumbre.

Fuente: (GADP, 2015).

Elaborado por: El autor.

2.7. Marco Legal

El marco legal aplicable en el presente trabajo de investigación considera las normativas más relevantes relacionadas con la gestión de recursos hídricos, al igual que aquellas que están vinculadas o tienen relación a la protección de los recursos naturales e hídricos.

2.7.1. Constitución Política de la República.

La Constitución de la República del Ecuador (2008) detalla varios artículos respecto al manejo del recurso hídrico para la planificación y ordenamiento territorial: el Art. 12.- que menciona que el derecho al acceso al agua es fundamental e irrenunciable para los seres humanos.

El Art. 318.- El agua constituye parte del patrimonio nacional de uso público, un territorio exclusivo y perenne del país y un elemento importante de la naturaleza y la supervivencia humana. Por lo que se deniega la privatización del agua. El Estado será el garante de la gestión y planificación de dicho recurso, a través del único órgano competente, estos recursos hídricos serán utilizados para consumo humano, para garantizar el riego, la autonomía

alimentaria, las actividades productivas y el caudal ecológico, serán prioritarios en ese orden. Según la ley, el uso del agua con fines productivos por parte del sector público y privado, así como la economía de masas y solidaria, requiere aprobación del Estado (Asamblea Constituyente, 2008).

El Art. 262 establece que los gobiernos regionales autónomos tienen la competencia para planificar la parte relacionada con el desarrollo regional y a la vez formular los oportunos planes de ordenamiento territorial y de gestión de los recursos hídricos. En el Art. 411.- El Estado garantiza la preservación, recuperación y manejo holístico de los recursos naturales acuáticos, las cuencas hidrográficas y de los caudales ecológicos que tienen relación al ciclo hidrológico.

2.7.2. Código Orgánico del Ambiente.

El COA (2017) instituye que los derechos de la naturaleza están reconocidos en la Constitución; en su Art.5 expresa el derecho que tiene la población a desarrollarse dentro de un ambiente sano y equilibrado ecológicamente. Además, expresa en el Art. 30 proponer un enfoque integral y sistemático para la gestionar los recursos hídricos y la conservar las cuencas hidrográficas, coordinando estas actividades con la Autoridad Única del Agua (COA, 2017).

El Art. 122 establece las Prohibiciones para desarrollar plantaciones forestales en zonas denominadas de permanente protección de agua. Finalmente, el Art. 191 exige que se realice el control verificación de la calidad de agua, aire y suelo (COA, 2017).

2.7.3. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.

La Asamblea Nacional de Ecuador (AN Ecuador), en su Art. 8, define la gestión integrada de los recursos hídricos y los elementos que se analizan en esta gestión. A su vez, en los Arts. 28 y 29 establece los lineamientos respecto a la planificación del recurso hídrico (Planes nacionales de recursos hídricos y Planes de GIRH), en el que, su contenido, elaboración y aprobación estarán sujetas al Estado y los GAD (AN Ecuador, 2014).

El Art. 64 establece los lineamientos como derechos de la naturaleza: protección de todos los ambientes naturales, mantenimiento de los caudales hídricos naturales para la preservación de los ecosistemas y la biodiversidad, preservar el ciclo natural de hidrológico y la recuperación y restauración de los ecosistemas, restableciendo el equilibrio natural de los recursos ambientales causados por contaminación (AN Ecuador, 2014).

En los Arts. 68, 73, 75, 77, 94, 130 y 135, de la mencionada en la presente ley, se establecen los lineamientos principales para realizar consultas a los usuarios del recurso hídrico en una cuenca, así como también se determinan sus obligaciones, por otro lado, se define el orden de prioridad en cuanto al uso del recurso, usufructo y gestión comunitaria del agua, limitaciones y responsabilidades, además, la redistribución y reasignación del agua y los criterios para establecer las tarifas de agua (AN Ecuador, 2014).

2.7.4. Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.

En este se resalta en su Art. 6 la contravención de descargar aguas contaminadas, Sin estar sujeto a las normas y reglamentos técnicos correspondientes, a las redes de alcantarillado, ni en los arroyos, lagos naturales y artificiales, acequias, ríos, etc., así como infiltrarse en la tierra las aguas residuales que estén con contaminantes nocivos. (AN Ecuador, 2004).

También, se destaca que en los Arts. 8 y 9 se designa al ministerio de salud y al ministerio del ambiente, en el ejercicio de su deber, para fijar el nivel de tratamiento que se deban aplicar a los lixiviados a descargar en el cuerpo receptor, cualquiera sea su origen (AN Ecuador, 2004).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se procedió a desarrollar a través de la observación, la interacción con el objeto de investigación y la referencia a la información existente para obtener los datos necesarios para la investigación (Palacios, et al., 2019). Además, es de investigativa basada en la revisión bibliográfica orientada en el análisis, evaluación y desarrollo de un modelo hidrológico para la determinación del estrés hídrico en una microcuenca que fue desarrollada en las siguientes etapas:

3.1. Ubicación de la zona de estudio.

La microcuenca del río Cristal Alumbre está ubicada en la parte alta de la parroquia San Gerardo, del cantón Girón, provincia del Azuay, a 3871 m.s.n.m y una altura mínima de 2867 m.s.n.m (Figura 5).

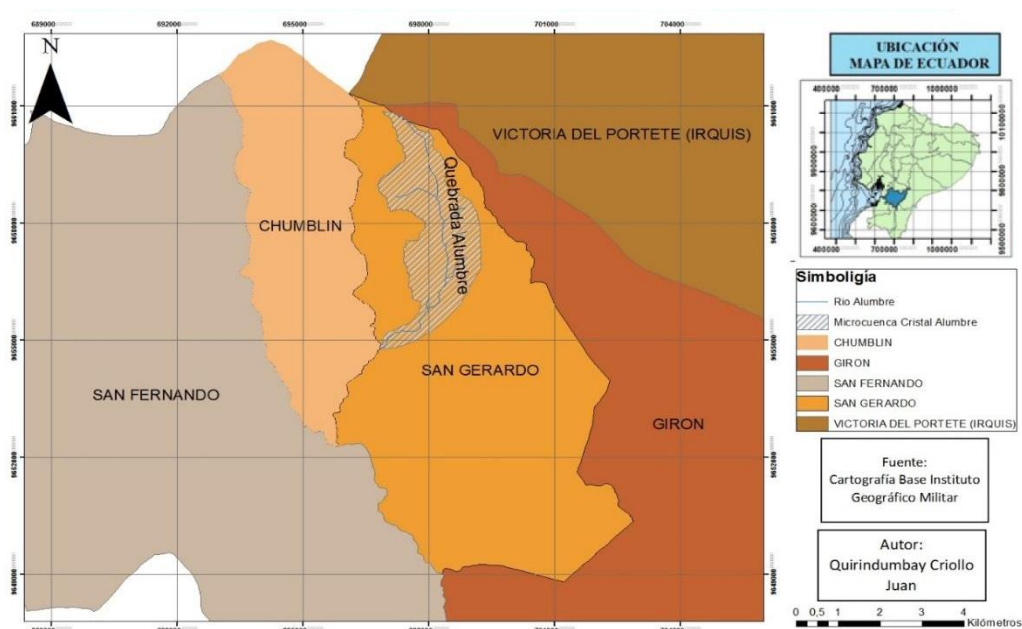


Figura 5. Ubicación de la microcuenca Cristal Alumbre.

Fuente: (GADP, 2015).

Elaborado por: El auto.

En esta investigación, para evaluar la calidad de agua superficial, se tomó en cuenta tres puntos ubicados en la parte alta, media y baja (Figura 6) de la cuenca, con las coordenadas descritas en la tabla 6.

Tabla 6

Coordenadas UTM de los sitios muestras de agua en la microcuenca del río Cristal Alumbre.

Coordenadas UTM WGS 84 Zona 17S				
Código	Nombre	x	y	z
MA8	Parte Alta	698208	9658272	3561
CA1	Parte Media	698618	9656766	3200
CSM	Parte Baja	697541	9655584	2950

Fuente: (Elaboración Propia).

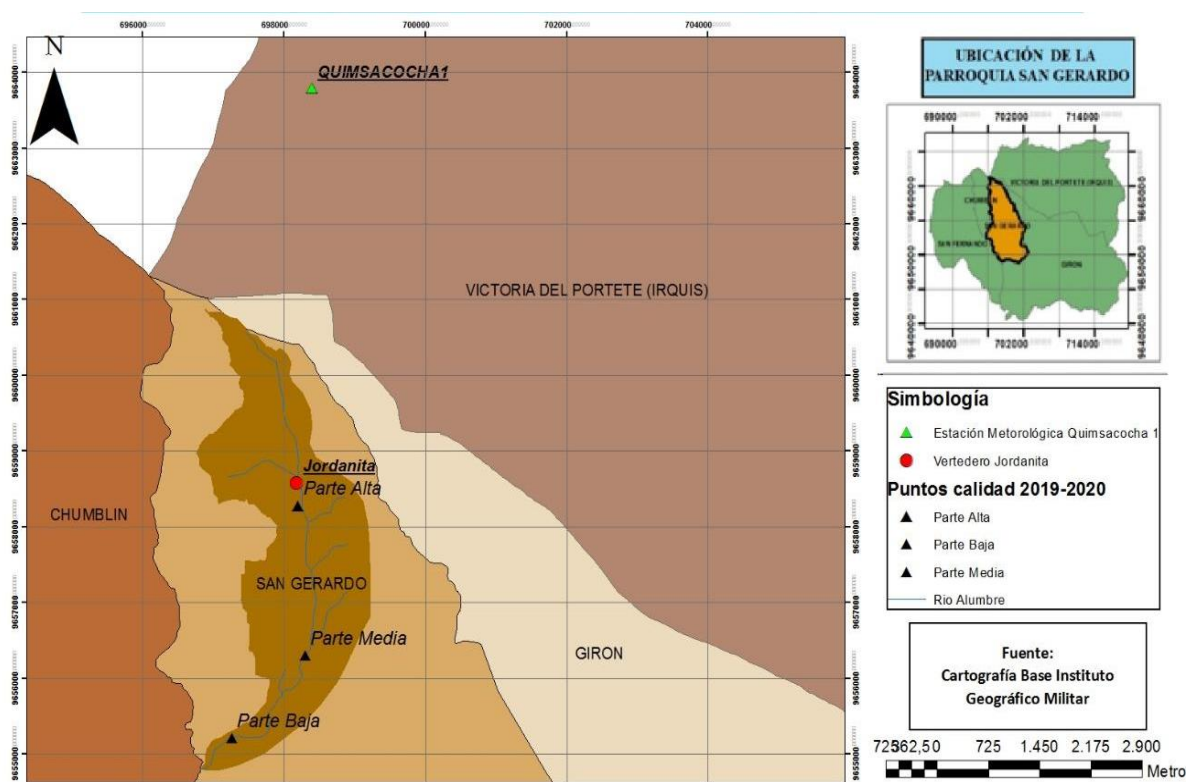


Figura 6. Ubicación de la estación meteorológica, vertedero y puntos de muestras de agua en la microcuenca Cristal Alumbre.

Fuente: (GADP, 2015).

Elaborado por: El autor.

El monitoreo realizado en la microcuenca del río Cristal Alumbre se lo realizó durante los meses de diciembre a marzo. Para el análisis de la calidad de agua superficial se hizo un análisis *in situ* tomando los parámetros de: temperatura, pH, conductividad eléctrica, y oxígeno disuelto utilizando el multiparámetro. En el análisis *ex situ* se tomaron muestras en 8 frascos de color y tamaño diferente, posteriormente fueron enviados al laboratorio para el respectivo análisis de otros parámetros importantes como: DBO₅, Sólidos Suspendidos, DQO; los

parámetros físico-químicos analizados se obtuvo con la colaboración de los técnicos del Laboratorio Grutec financiados por parte de la empresa minera INV MINERALES ECUADOR S.A, los cuales son: conductividad, pH, temperatura, oxígeno disuelto, metales totales (corrida completa), carbonatos, cianuros, cromo hexavalente, sólidos totales disueltos, sólidos suspendidos, nitratos, nitritos, NKT, coliformes fecales, coliformes totales, grasas y aceites, amonio, amoniacos y DBO₅.

3.2. Datos de calidad.

Fueron monitoreados en varios sectores de la microcuenca en los períodos 2007 – 2014 y 2018 – 2020, durante las épocas de lluvia y sequía, basado en datos facilitados por parte de la empresa minera INV Minerales Ecuador S.A. de la microcuenca Cristal Alumbre (Tabla 7), apegados al acatamiento del plan de manejo ambiental y no causar daños en el medio ambiente.

Tabla 7

Coordenadas UTM de los puntos muestras de agua histórica en la microcuenca del río Cristal Alumbre.

CODIGO	NOMBRE	Coordenadas UTM	
		X	Y
JOR	Jordanita	698445	9658944
MAP	Alumbre	698651	9657213
MACCP	Muestra Agua Captación Campamento Pinos	697901	9660130
MAJ	Muestra Agua Jordanita	698039	9658745
MAP	Muestra Agua Puente	698413	9656865
MADG, MADR *	Muestra Agua Descarga Galería	697843	9658851
MACA	Muestra Agua Captación	698228	9658489
MAPC	Muestra Agua Puente Cristal	697869	9655681

Fuente: (INV Minerales Ecuador S.A.).

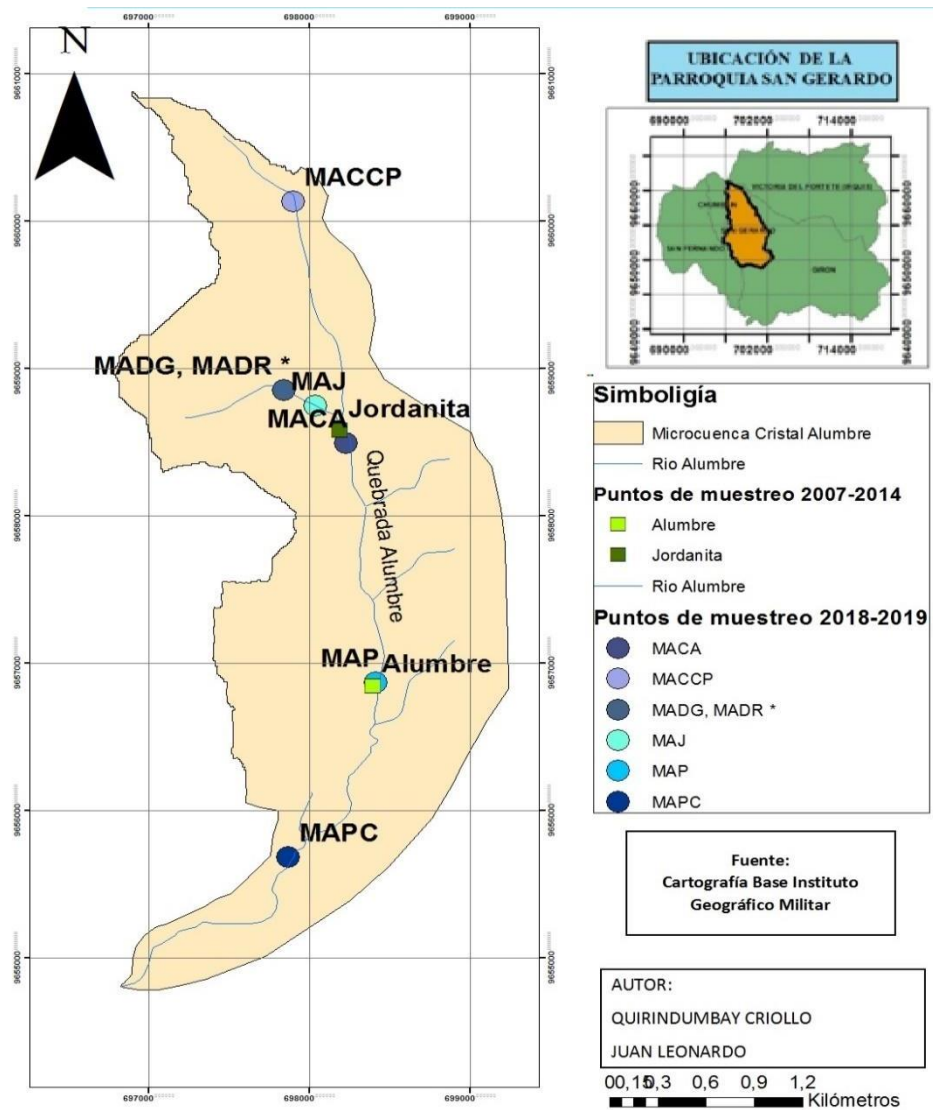


Figura 7. Mapa de la ubicación de los puntos históricos de calidad de agua en la microcuenca río Cristal Alumbre.

Fuente: (INV Minerales Ecuador S.A.).
Elaboración propia.

De la misma manera la empresa minera INV Minerales Ecuador S.A. proporcionó los datos hidrometeorológicos registrados por la estación meteorológica Quimsacocha 1 y el vertedero Jordanita (Figura 7), los mismos que fueron tomados para la realización de esta investigación y analizados con el objetivo de caracterizar la calidad del agua de la microcuenca del río Cristal Alumbre para proponer alternativas de gestión de este recurso hídrico y se encuentran en las siguientes coordenadas.

Estación meteorológica Quimsacocha 1: está ubicada en la parte alta del proyecto minero Loma Larga (Tabla 8) con las coordenadas, su función es la de determinar: precipitación, humedad, radiación, velocidad del viento y dirección del viento.

Estación hidrométrica Jordanita: está ubicado en la parte alta del río Alumbre (Tabla 7), su función es registrar el comportamiento del volumen del caudal del río.

Tabla 8
Coordenadas de la estación meteorológica y el vertedero.

Coordenadas UTM WGS 84 Zona 17S				
ID	Nombre	X	Y	Z
1	Vertedero Jordanita	69828	96582	3561
2	Estación Meteorológica	69843	96637	3725

Fuente: Elaboración propia.

3.3. El proceso de modelación y SSD

Un balance hídrico o balance de masas en las definiciones hidrológicas justifican el principio de masiva conservación; se refiere a que los volúmenes de agua en cualquier fase tanto en entradas como salidas deberán estar condicionadas por las variaciones del volumen almacenado. Al estudiar el balance hídrico se debe tomar en consideración las mediciones de acopio de caudales de agua, esta diferencia entre los aportes de entradas (P) y salidas (E) es el equivalente a la variación en el volumen de almacenamiento (ΔS) (Loor, 2017).

$$\Delta S = P - E$$

La ecuación relacionada al balance hídrico en las cuencas sean naturales o cuerpos de agua indican datos relevantes del caudal tanto en entradas y salidas y de la variación del volumen de agua almacenada. La ecuación de balance incluye precipitación (P) siendo que cae en forma de nieve o lluvia dentro del área a estudiar, que puede convertirse en flujo superficial (Q_{Si}) o flujo subterráneo (Q_{Ui}). Por su parte las salidas de la ecuación comprenden a la evaporación desde la superficie de la cuenca (E), además la salida de corrientes tanto superficiales (Q_{So}) como subterráneas (Q_{uo}). En el caso de que las entradas son superiores a las salidas el volumen de agua almacenado (ΔS) es superior, caso contrario disminuye. Toda esta ecuación del balance hídrico en su forma más general incluye un término residual (v) el cual está sujeto a errores de medición, por lo tanto, la ecuación estará representada de la siguiente manera (Loor, 2017):

$$P+Q_{Si}+Q_{Ui}-E-Q_{SO}-Q_{UO}-\Delta S-v = 0$$

Para la simulación del modelo, se usó la herramienta AQUATOOL, que trabaja bajo ambiente de los sistemas de soporte a la decisión (SSD) para planificar y gestionar las cuencas o sistemas de los recursos hídricos (AQUATOOL, 2020).

Como SSD suministra recursos para realizar el análisis de los problemas que tienen relación con la gestión del agua (IIAMA, 2019), su uso estaría enfocado para establecer protocolos de trabajo, que sirvan para desarrollar una caracterización de la calidad de agua de la microcuenca Cristal Alumbre.

La particularidad de esta herramienta es que puede modelar embalses y tramos de la cuenca en la misma aplicación y engranando los otros elementos del sistema. Por tanto, de esta manera, la calidad de una sección del río o de un embalse depende no solo del proceso resultante, también tiene que sustentarse en la de la gestión del sistema y de la calidad de los diversos componentes relacionados con el componente en siendo estos la temperatura, OD y materia orgánica carbonosa, contaminantes arbitrarios, ciclo del nitrógeno, eutrofización (Rangel, 2014).

3.4. Hidráulica de ríos

Según Paredes, Andreu, & Solera (2013) la suposición del río en una sola dimensión puede determinar un modelo hidráulico que vincule el flujo circulante con el ancho, la velocidad y profundidad del río. Hay dos formas de establecer esta relación. El primero fue desarrollado por Leopold y Maddock y estableció la relación potencial entre diferentes variables hidráulicas y caudales, expresada de la siguiente forma:

$$u = a_1 Q^{\beta_1}$$

$$h = a_2 Q^{\beta_2}$$

$$b = a_3 Q^{\beta_3}$$

En el que, u es la velocidad (ms^{-1}); Q se utiliza para el caudal circulante ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); h para definir que es el calado (m); b en el ancho de la cuenca (m). Los coeficientes α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 y β_3 son factores que se establecen de manera empírica y que se deben cumplir:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \quad \text{y} \quad \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 = 1$$

En tanto que Paredes, Andreu & Solera (2013) proponen un segundo método efectuado en el programa a través de un cálculo hidráulico utilizando la fórmula de Manning:

$$u = \frac{R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n}$$

En el que R_h (m) es el radio hidráulico que se consiguen como el cociente entre el área y el perímetro mojado, I (m/m) es la pendiente del canal y n es el N° de Manning o de rugosidad. La velocidad se consigue en ms^{-1} .

Se tiene en cuenta una sección trapezoidal y por lo tanto la fórmula anterior se representa así:

$$u = \frac{\left(\frac{b_0 y + s y^2}{b_0 + 2y\sqrt{s^2 + 1}} \right)^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n}$$

b_0 es el ancho de la solera del río (m)

“ s ” la pendiente lateral (m/m)

“ y ” es el calado (m)

“ n ” el coeficiente de Manning.

Para resolver la ecuación de Manning hay que aplicar una metodología numérica por iteración. Dado a la posibilidad de las relaciones de los trechos de río con los acuíferos, el caudal no siempre es el mismo a lo largo del tramo. Por tanto, al asumir que las pérdidas o ganancias de caudal son lineales a lo largo del tramo, las relaciones hidráulicas se solucionan para cada “segmento” que divide el tramo para su cálculo. Por su parte, se resalta que la elección de uno de los métodos no es integral para evaluar el total de tramos de río consintiendo aplicar algún método de manera discrecional sobre los trechos estudiados (Paredes, Andreu, & Solera, 2013). A efectos de esta investigación, se utilizó el modelo propuesto por Leopold and Maddock, ya que permite establecer el potencial hidráulico de manera empírica y se ajusta al método de investigación de campo empleado.

3.5. Modelación en AQUATOOL

Enfatiza la asistencia en el proceso de formulación de políticas nacionales y leyes, permitiendo una buena gestión a nivel gubernamental y el establecimiento de normas y arreglos

institucionales efectivos para que la toma de decisiones sea más justa y perdurable que, a su vez, cuentan con el respaldo de varios artilugios como la evaluación social y ambiental, herramientas económicas y los sistemas de información y vigilancia (Ceballo, González, Galli, & Romeu, 2015).

Para desarrollar el modelo de la microcuenca del río Cristal Alumbre en AQUATOOL se indicó la agenda y el archivo debido a que el sistema pide los parámetros físicos (considerando máximas capacidades), y los posibles caudales mínimos (comúnmente ecológicos) para la creación del modelo de SIMGES (Solera, Paredes, & Andreu, 2015).

Los datos generales son suficientes para ingresar la longitud del cuerpo de agua y los coeficientes hidráulicos. Los coeficientes hidráulicos se utilizan para caracterizar la hidráulica de las secciones de un río a través de relaciones potenciales. Lo importante es tener en cuenta el tiempo de viaje. Los coeficientes se pueden obtener con ajustes conseguidos por mediciones simultáneas tanto de ancho, profundidad, caudal y velocidad. (Solera, Paredes, & Andreu, 2015).

Primero se crea el nudo de cabecera y después se crean las conducciones. Luego se debe crear el nudo de la demanda la cual se representa a través de 3 elementos: esta unidad “demanda” que representa el área de consumo de agua; el elemento “toma” que constituye el o los canales por el cual pasa la demanda; y el elemento “retorno” que incorpora a un río u otro cauce superficial del agua no consumida (Solera, Paredes, & Andreu, 2015).

Creada la demanda hay que crear la toma, a través de la cual se realiza su oferta, el elemento de retorno y se debe asignar el nodo final; en este punto se ha creado el modelo con todos sus elementos. Lo primero a desarrollar es la calibración en todo modelo de simulación de calidad de agua, esto se lo hace con todos los parámetros de la modelación en el cuál, para esta calibración se emplearon los criterios: DBO5, nitrógeno orgánico, OD, amonios y nitratos en el agua tomados de 8 puntos repartidos a lo largo de la cuenca. Estas medidas y sus magnitudes están relacionados con el tipo de constituyente que se modela. Debido a esto, se pueden realizar varias ejecuciones de programas en las cuales se varían las constantes de calibración verificando su ajuste de acuerdo con los datos observados. Una vez calibrado el modelo, se realizan las simulaciones siguientes para analizar el impacto de las situaciones varias que puede presentar el sistema (Solera, Paredes, & Andreu, 2015).

En el momento que se tiene creado el modelo completamente, se debe realizar una simulación de la calidad planteada para analizar los resultados y con esto calibrar los parámetros. Según Paredes et al, (2013) para ejecutar una simulación en GESCAL se requiere información de entrada que se almacenan en un grupo de archivos que se describen de la siguiente manera: archivos de datos y lo obtenido de SIMGES; archivos de la modelación de calidad; archivo de escritura y lectura; de concentración de contribuciones; de coeficientes y constantes; para la calibración forzada de conducciones y embalses; y de datos supervisados para calibrar.

El proceso de simulación de calidad de agua para el desarrollo del modelo a través de la herramienta AQUATOOL sería de la siguiente manera, de acuerdo con (Solera, Paredes, & Andreu, 2015):

1. Inicialización de la simulación de calidad de agua
 - a. Partiendo de la simulación realizada en el módulo SIMGES (o de manera simultánea), se debe activar el módulo GESCAL; en la lista menú con el nombre 'Modelos' buscar la opción 'Opciones del proyecto', una vez que abra la ventana, deberá tildar la opción 'Modelar GesCal'.
 - b. Una vez activado el modelo GesCal, se abre una ventana con el nombre de 'Opciones modelo calidad', en esta pantalla, se incorporan los parámetros básicos de calidad que serán simulados en el módulo GesCal. En esta pantalla, se deberá detallar títulos, el nombre del archivo, opciones de modelación (en el cual se agregan los parámetros a evaluar como temperatura, OD, MO, nitrógeno), contaminantes arbitrarios, contaminantes tóxicos (todos los que se deseen modelar y sus coeficientes de corrección por temperatura) y por último, si es necesario, especificar si e va a hacer uso de una calibración forzada.
 - c. Una vez incluidos todos los parámetros de calidad a modelar, nos retorna a la ventana inicial de 'Opciones Proyecto', en el cual, se debe detallar si los datos de calidad se quieren tener en una base de datos (por pantalla) o en un archivo. Con estos primeros pasos, AQUATOOL crea registros que serán de utilidad para la base de datos que se va a modelar.
 - d. Para iniciar la simulación de calidad de agua debemos entonces ubicar en la pantalla inicial de la herramienta AQUATOOL, el menú 'Modelos' y en la opción 'GesCal' y elegir la opción 'Parámetros Modelo Calidad'.

2. Incorporar los datos para las conducciones
 - a. Incluir los datos generales de la conducción.
 - b. Incorporar datos de temperatura.
 - c. Introducir los parámetros: OD, ciclo de nitrógeno, eutrofización.
 - d. Incorporar los parámetros de los contaminantes mediante la cinética de primer orden.
 - e. Incorporar los parámetros de los contaminantes tóxicos.
3. Rellenar los datos de la modelación de calidad.
 - a. Incorporar los datos generales.
 - b. Rellenar los datos de temperatura.
 - c. Incorporar datos de los parámetros: OD, ciclo de nitrógeno, eutrofización.
 - d. Incorporar los parámetros de los contaminantes arbitrarios, los cuales serán modelados a través de la cinética de primer orden.
 - e. Incluir las concentraciones iniciales de la cuenca.
 - f. Introducir los flujos de sedimentos.
 - g. Incluir los tóxicos presentes.
4. Introducir los datos de las concentraciones presentes en los acuíferos.
5. Incluir datos de depuración/contaminación de la toma y el retorno.
6. Darle ejecución al modelo.
7. Calibrar los datos y la simulación.

3.6. Análisis de resultados

Se recopilaron datos históricos sobre la precipitación y el flujo registrados en la microcuenca del río Cristal Alumbre para su posterior análisis y el planteamiento de escenarios simulados con la ayuda de la herramienta AQUATOOL.

El modelo GESCAL presenta dos maneras de visualizar los resultados: a través de eGraf, que es un visor de resultados, detallando los obtenidos de SIMGES y GESCAL, o puede ver los resultados a través del "gráfico dinámico" de la hoja de Excel. (Paredes, Andreu, & Solera, 2013).

Con el módulo SIMGES para la simulación de la gestión de cuencas y módulo GESCAL se generó una guía para la optimización del recurso señalando alternativas de gestión adecuadas para el recurso hídrico del río Cristal Alumbre y mejorar la calidad de su agua.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización de la calidad del agua está dada por parámetros como pH, Conductividad eléctrica, Temperatura, Nitratos, Aceites y Grasas, Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendedos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Arsénico y Hierro, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Coliformes Fecales, en el que, a partir de estudios realizados se obtuvo las concentraciones presentes de cada uno de estos parámetros y se estableció una base de datos que permitió realizar la simulación en el software de gestión integral de recursos hídricos AQUATOOL, y a partir de esta base de dato, se realizó la simulación para el modelo de la calidad del agua de algunos de estos parámetros, pero no sin antes analizar las condiciones hidrometeorológicas de la microcuenca Cristal Alumbre, ya que estos factores pueden incidir en los valores para caracterizar la calidad del agua, es por ello que luego del análisis se obtiene lo siguiente:

4.1. Información hidro-meteorológica de la microcuenca Alumbre

4.1.1. Variación Caudal de la microcuenca del río Alumbre.

Tabla 9

Variación caudal de la microcuenca del río Alumbre (2007 -2013).

Caudal (L/s) 2007 - 2013	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Muestra (n)	186	170	186	180	186	180	186	186	173	155	150	173
Mínimo	4,23	4,26	15,4	15,9	16	17,4	5,43	4,26	7,42	3,91	2,64	3,36
Mediana	37,4	72,98	46,4	64,2	52,1	38,8	36,87	24,4	18,79	14,7	18,48	21,13
Media	64,6	104,5	61,5	81,4	69,9	62,0	55,24	29	31,45	20,6	29,04	35,80
Máximo	396	797,1	416	430	368	458	495,3	257	452,1	185	298,4	306,8
Desv. estándar	76,6	112,7	54,8	67,9	57,3	59,1	65,19	26,1	50,31	18,7	39,98	39,77
Coef var (%)	118,6	107,8	89,1	83,4	81,9	95,3	118	80	160	91	137,7	111,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10

Caudal anual de la microcuenca del río Alumbre (2007 – 2013).

Caudal (L/s)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Muestra (n)	18	366	365	365	365	366	266
Mínimo	31,93	7,20	2,64	3,05	4,26	9,47	15,80
Mediana	46,32	49,92	18,12	18,34	37,18	44,86	31,37
Media	69,28	77,04	39,31	32,45	64,19	63,58	47,18
Máximo	306,78	797,12	493,42	259,03	515,13	386,61	298,12
Desv. Estándar	65,02	88,22	60,51	38,55	71,55	56,87	46,88
Coef var (%)	93,85	114,51	153,92	118,81	111,47	89,44	99,37

Fuente: elaboración propia.

El análisis de los registros obtenidos en los dos periodos de estudio, permiten definir la época húmeda y la seca, en el que se evidencia una marcada estacionalidad lluviosa durante el primer semestre del año, teniendo concentrado los registros de caudales máximos de enero a julio. Estableciendo así, una variación en los caudales anualmente, que puede estar dado a múltiples factores, entre los que se mencionan su vertiente de drenaje, al cambio climático registrado a nivel mundial, o por precipitaciones atípicas dadas por fenómenos naturales, los cuales pueden producir crecidas inesperadas. En ese sentido, Ríos (2010) afirma que la variación climática y a su vez la hidrológica tiene una afectación en el tiempo y espacio de la cuenca, motivo por el cual, los fenómenos ocurridos (sequías, crecidas) ya no sean inesperados, sino más bien, generalizados a escalas regionales o nacionales.

En la tabla 9 se observa un resumen de la variabilidad del caudal entre los años 2007 al 2013 (Primer período de estudio). Se observa que los meses que menor caudal presentaron, fueron noviembre y diciembre con 2,64 L/s y 3,36 L/s respectivamente, que de acuerdo con Washington et al (2014), el caudal con sus valores mínimos de una cuenca se lo generalmente manipula como referente al fijar el caudal ecológico. Por otra parte, también se destaca que los meses con mayor caudal fueron febrero y julio, con 797,12 L/s y 495,29 L/s respectivamente, para ello, Washington et al (2014), nos explican que los caudales máximos suelen estar relacionados con períodos determinados de retorno anuales, tomando en consideración las precipitaciones, el área de la cuenca y la altitud, para determinar el caudal.

Por otro lado, al realizar un análisis anual (Tabla 10), se muestra que el máximo caudal se presentó en el 2008 con 797,12 L/s con una variabilidad del 114,51%. Mientras que, el mínimo se produjo en el año 2009 con 2,64 L/s con una variabilidad del 153,92%. Se observa que el año 2008 supera por el doble en caudal al año 2009.

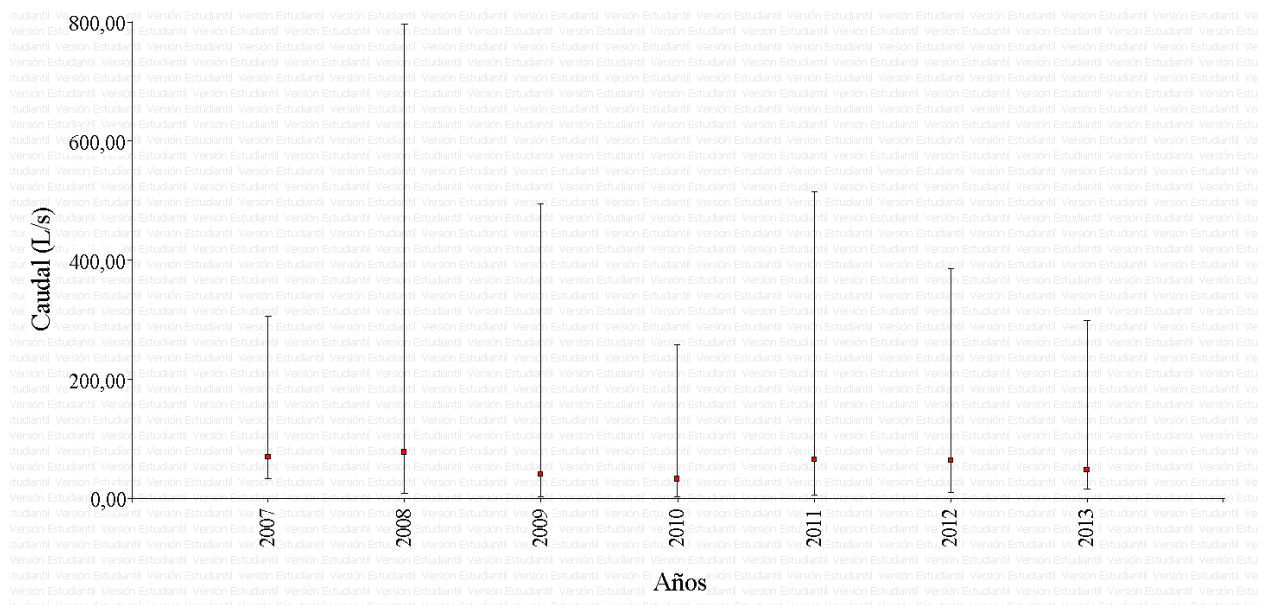


Gráfico 2. Registros máximos del caudal del Río Alumbre 2007 – 2013.

Fuente: Elaboración propia.

El caudal es la porción de agua que pasa por un cierto tiempo que atraviesa una sección. Siendo una de las más importantes variables en estudios hidrológicos se calcula indirectamente en función del nivel de la corriente y la velocidad del caudal (IAGUA, 2017). Para modelar las microcuencas y los transportes de los contaminantes es importante conocer los parámetros hidrológicos como son velocidad, caudal, coeficiente de dispersión, precipitaciones; a su vez, parámetros como profundidad, sección transversal, anchura y pendiente.

En el gráfico 2 se muestra la variación del caudal del río Alumbre durante el periodo 2007 – 2012; que va de 10 L/s a 800 L/s. Se puede evidenciar que el registro más alto se ubica en el año 2008 con aproximadamente 800 L/s; acompañado de otros 2 registros con un valor aproximado de 500 L/s en los años 2009 y 2011. Estos datos dan a entender que en los primeros meses de estos años hubo altas precipitaciones registradas en la parte alta de la microcuenca.

Esta variación está muy ligada a las precipitaciones, ya que, de estas entradas de agua a la cuenca, puede generar mayor o menor caudal en el cauce. Por lo tanto, se presenta el mayor

caudal registrado en la microcuenca Cristal Alumbre para el año 2008, Galán, & Romero, (2008), comentan que posiblemente sea debido a una crecida registrada desde la cabecera de la microcuenca, el cual, pudo haber causado varios desastres, por un lado, grandes deslizamientos de rocas y suelo, el cual genera el desprendimiento de minerales y metales existentes en la geología natural de la cuenca, generando como resultado un intercambio catiónico que influye en la variación del pH del agua y suelo y a su vez, se aumenta la suspensión de sólidos totales, parámetros que afectan directamente la calidad del agua. Por otra parte, el impacto ambiental generado por estas crecidas ocasiona que la fauna y flora acuática, así como también, la fauna y flora terrestre aledaña a la cuenca, sea fuertemente afectada, mermando la disponibilidad de alimento de los organismos acuáticos y terrestres, y a su vez, por el arrastre de sedimentos y demás componentes naturales como partes de árboles, que generan daños en el ecosistema y hábitat de varias especies de la zona. Adicional a esto, afecta a las investigaciones realizadas en el área, ya que, para ese año, esa crecida arrasó con todos los equipos de monitoreo que estaban instalados a lo largo de la cuenca, con el cual, se estaban registrando diversos datos para la gestión integral del recurso hídrico (GIRH). Así como también, la afectación de los productores agrícolas, que se benefician del agua de la cuenca para el ejercicio de las actividades del campo y, por ende, al consumo humano regular del agua dispone para la población sobre todo de la zona baja de la microcuenca.

Resultados semejantes los obtuvo Washington, et al, (2014) en el cual, en su trabajo plantean que, para la crecida del 4 de marzo de 2013, se registró un caudal de 703 L/s, el cual denominaron, caudal de crecida, entendiendo que su trabajo no se realizó en el área de estudio (río Alumbre), podemos tomar este resultado como una posible justificación al caudal registrado en febrero de 2008, ya que, de acuerdo con INVMINEC, (2019) las características de los estudios realizados en la microcuenca Cristal Alumbre, muestra que son frecuentes los deslizamientos en épocas de invierno, y la morfometría de la microcuenca nos permite deducir que han ocurrido crecidas en ciertos períodos del año.

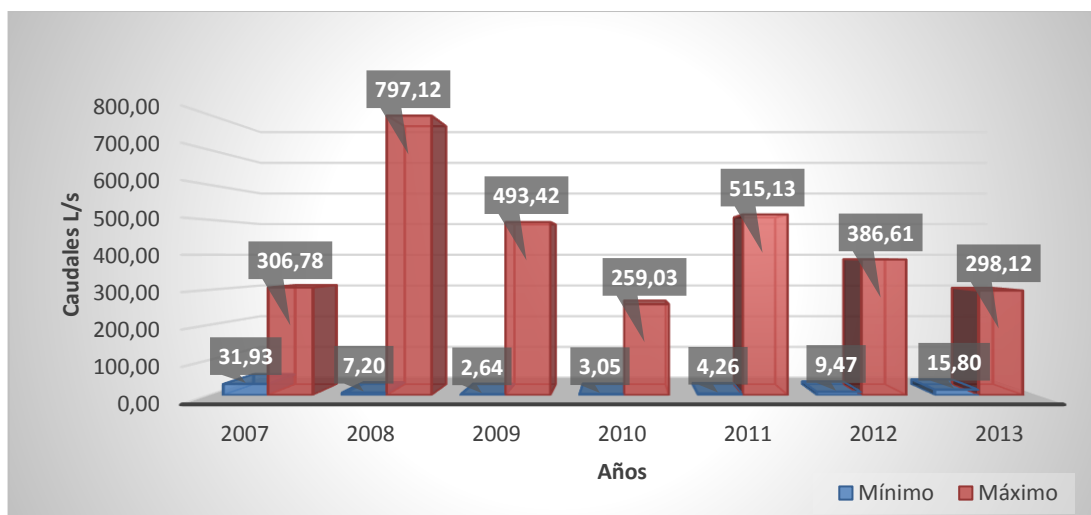


Gráfico 3. Caudales máximos y mínimos por año del río Alumbre (2007 – 2013).

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los caudales mínimos se presentan en los años 2008, 2009, 2011 y 2012, con valores que varían de 2,64 L/s a 9,47 L/s (Gráfico 3). Esto significa que la población ha recurrido al uso este recurso durante estos años disminuyendo los caudales que circula por la microcuenca del río Alumbre o simplemente puede ser un error cuando se tomaron los datos (por efecto de precipitaciones, calibración de los equipos, método de recolección de datos, entre otros.); de acuerdo con esto es importante diseñar un sistema de gestión ambiental que proteja y conserve este ecosistema. Así mismo, se muestra que en los últimos dos años monitoreados los caudales tienden a disminuir, causa que debería ser analizada por las autoridades competentes con el propósito de crear medidas adecuadas de gestión ambiental que garanticen sobre todo la distribución y disfrute de este recurso, puede ser, mediante programas de concientización del uso racional de agua potable, programas de preservación de las cuencas hidrográficas, entre otras, que estén alineados a las necesidades sociales y ambientales.

Por otra parte, para el segundo periodo estudiado de la variación de caudales, no presenta tanta variabilidad, lo cual se puede atribuir al ritmo habitual que tiene la población en el manejo de la microcuenca para las actividades pecuarias, presentando descensos en el caudal para el periodo de sequía, el cual está fuertemente marcado en el segundo semestre del año, siendo de septiembre a noviembre las épocas de menor registro del caudal que coinciden con la apertura del canal de riego que desvía el cauce para su aprovechamiento.

Tabla 11

Variación caudal de la microcuenca del río Alumbre (2018-2020).

Caudal (L/s) 2018 - 2020	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Muestra (n)	62	59	93	90	75	60	62	62	60	62	60	62
Mínimo	8,9	16,1	15,3	21,7	28,4	26,1	16,8	19,7	13,5	11,3	12,1	14,5
Mediana	29,4	48,6	39,9	50,7	62,5	54,2	48,7	32,3	22,5	20,1	30	24,6
Media	48,8	79,2	63,4	84,2	95,6	72	62,3	50,5	26,1	23	41,2	47,3
Máximo	234,7	422,3	479,9	455,3	489	286,	209,5	260,8	154,3	81,2	188,7	308,4
Desv. estándar	50,1	92,8	71,9	87,6	87,4	53,4	40,6	50	21,2	13,6	36,2	63,7
Coef var (%)	102,7	117,2	113,4	104	91,4	74,1	65,2	99	81,1	59,1	87,8	134,8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Caudal anual de la microcuenca río Alumbre (2018 – 2020).

Caudal (L/s)	2018	2019	2020
Muestra (n)	308	365	134
Mínimo	11,28	8,94	16,14
Mediana	25,67	41,46	45,02
Media	46,61	64,40	75,18
Máximo	488,88	422,32	479,93
Desv. estándar	61,59	61,42	85,60
Coef var (%)	132,13	95,37	113,85

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se indica un resumen de la variabilidad del caudal entre los años 2018 a 2020. El máximo de caudal se registró en mayo con un valor de 488,88 L/s con una variabilidad de 91,37 %, estos valores son aceptables debido a que se encuentra en la época de invierno donde existe un mayor caudal en la microcuenca del río Alumbre. Por otro lado, el caudal mínimo se encuentra en enero con 8,94 L/s con una variabilidad del 102,71%.

En el caso del análisis por años (Tabla 12), se evidencia que en el 2018 se presenta el caudal máximo con 488,88 L/s superior al de los dos años posteriores; tiene una desviación estándar de 61,59 L/s con una variabilidad del 132,13%. Se observó que el año 2019 presentó menor cantidad de lluvias en la microcuenca. Por lo tanto, mientras más intensidad de lluvias se presentan en la microcuenca se produce más demanda por parte de los pobladores aledaños al caudal del río Alumbre.

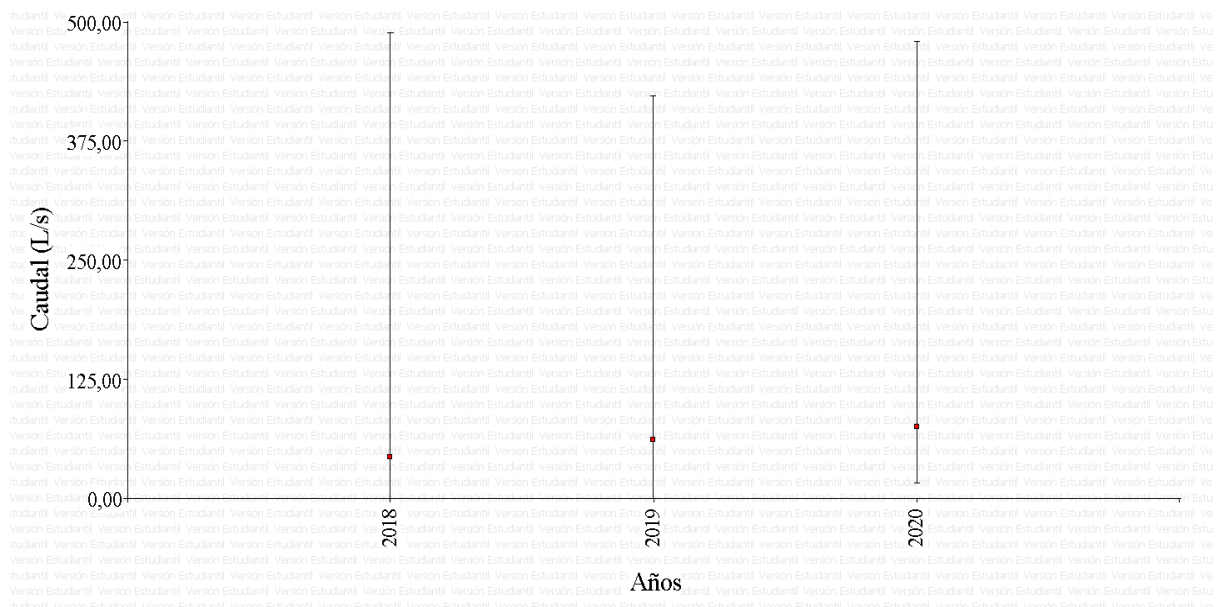


Gráfico 4. Caudal anual del río Alumbre (2018 - 2020).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4, se muestra la variación del caudal para los años 2018, 2019 y 2020. Se observó que los picos máximos de caudal se presentaron en los meses de mayo de 2018 alcanzando los 490 L/s, febrero de 2019 con 422 L/s y marzo de 2020 alcanzando los 480 L/s; Cabe destacar que el caudal del mes de abril de 2020 que alcanzó los 455 L/s. Con estos datos se hizo una comparación con los años anteriores (2007 - 2013) en el que se evidenció que el caudal se ha reducido en casi un 50%; por lo tanto, se demuestra que la población que vive a las riberas de este curso de agua tiene mayor demanda de este recurso generando que los caudales medidos disminuyan notablemente; además, la reducción del caudal implica mayor tiempo para que el río pueda regenerarse de la contaminación producida por la población que va en aumento año tras año.

4.1.2. Variación Precipitación de la microcuenca del río Alumbre.

La variación de las precipitaciones puso en evidencia el comportamiento del ciclo hidrológico de la cuenca, no permitió determinar en sí lo fenomenológico natural, más sí los eventos ocurrentes como sequías, estiajes, crecidas y su repercusión en los caudales mínimos de la microcuenca. Es importante describir, que esta variación permite realizar el cálculo del tiempo atmosférico y otros factores, que inciden sobre el ecosistema de la cuenca (Pizarro, Cabrera , & Morales, 2011).

Se observa que el valor más alto del registro de precipitaciones fue en el mes de febrero de 2009, alcanzando los 45.60 mm (Tabla 13 y 14), el cual indicó que en este mes y año se presentó la mayor intensidad de lluvias en la microcuenca. Durante este período se observa que la media en las precipitaciones varía de 1.75 mm (año 2014) a 3.40 mm siendo el valor más alto en 2008.

Tabla 13

Variación precipitación de la microcuenca del río Alumbre (2005-2014).

Precipitación (mm) 2005 - 2014	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Muestra (n)	279	247	248	240	248	240	248	271	270	279	270	279
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana	1,00	1,60	2,20	2,28	1,33	0,91	0,40	0,20	0,20	0,40	0,60	0,66
Media	2,99	4,13	3,76	3,70	2,86	2,87	1,66	1,18	1,38	2,01	2,88	2,38
Máximo	27,2	45,6	23,9	22,2	19,2	22,2	17,7	22,5	22,4	31,2	23,8	22,0
Desv. estándar	4,40	6,00	4,54	4,12	3,79	4,19	2,96	2,47	2,84	3,55	4,34	3,58
Coef var (%)	147,4	145,3	120,8	111,4	132,2	145,9	178,1	208,4	206,4	176,3	150,4	150,7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Precipitación anual de la microcuenca río Alumbre (2005 – 2014).

Precipitación (mm)	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Muestra (n)	145	365	365	366	365	365	365	366	365	52
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,20	0,20	0,82	1,64	0,45	0,66	0,80	1,40	1,00	0,90
Media	1,91	2,09	2,67	3,40	2,47	2,12	2,95	3,08	2,64	1,75
Máximo	16,2	22,4	27,2	32,2	45,6	22,0	22,4	27,6	22,4	10,8
Desv. estándar	3,29	3,88	4,01	4,61	4,59	3,34	4,38	4,12	3,89	2,56
Coef var (%)	172,1	185,2	149,8	135,7	185,4	157,6	148,5	133,9	147,4	146,7

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, es de hacer notar que la menor intensidad de lluvias se registró en el año 2014, con precipitaciones de 10,80 mm. Con una marcada estacionalidad de sequía para el mes de diciembre.

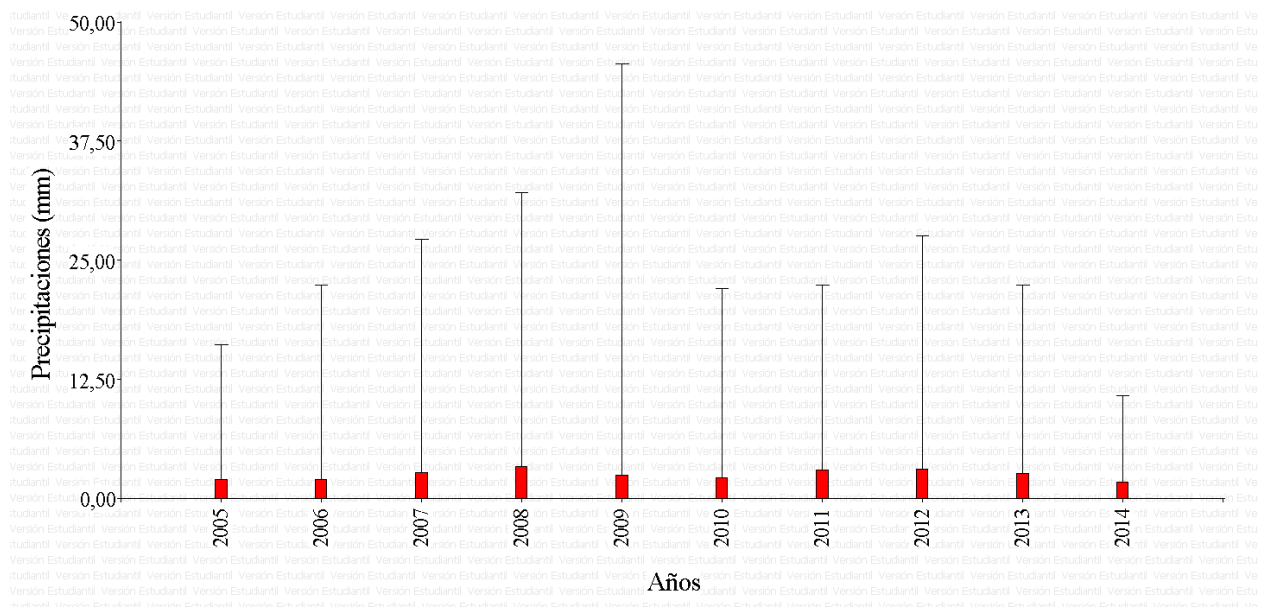


Gráfico 5. Precipitaciones anuales (mm) del río Alumbre (2005 - 2014).

Fuente: Elaboración propia.

Para el analizar las variaciones de las precipitaciones se tomó en cuenta los años desde el 2005 al 2014; donde se observó la mayor precipitación a principios de 2009 con 46 mm, también se puede destacar que, a finales de 2008 en el que las precipitaciones alcanzaron los 32 mm (Gráfico 5); esto se puede dar por la época de invierno donde ocurren las más intensas precipitaciones. Por otro lado, en el primer trimestre del año 2006 se observó que hay una escasez de precipitaciones presentando diferencias en los registros en comparación con los otros años.

Es importante destacar que la intensidad de las precipitaciones con los caudales está relacionada, tomando en cuenta también la demanda de este recurso (para consumo y producción principalmente) por parte de la población. Las autoridades deben tomar decisiones acertadas para la adecuada gestión de la microcuenca y su correcto uso por parte de los pobladores.

Tabla 15
Variación precipitación de la microcuenca del río Alumbre (2018-2020).

Precipitación (mm)	2018	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Muestra (n)	62	57	62	60	44	43	62	62	60	62	60	62	
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mediana	0,90	1,20	1,35	2,30	1,50	0,60	0,60	0,60	0,00	0,40	2,10	1,60	

Media	2,35	4,14	3,94	4,20	2,90	3,78	1,90	1,78	1,04	2,05	3,30	3,78
Máximo	18,9	34,8	34,5	25,0	11,7	21,6	19,3	13,8	11,9	18,6	22,7	23,6
Desv. estándar	3,68	6,16	6,09	5,77	3,47	6,22	4,22	2,91	2,07	3,73	4,59	5,15
Coef var (%)	156,2	148,8	154,4	137,4	119,7	164,4	222,6	163,6	199,2	182,1	139,3	136,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Precipitación anual de la microcuenca del río Alumbre (2018 – 2020).

Precipitación (mm)	2018	2019	2020
Muestra (n)	197	365	134
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,40	1,50	1,00
Media	2,16	3,22	3,51
Máximo	22,70	34,80	34,50
Desviación estándar	4,03	4,56	5,83
Coef var (%)	186,59	141,27	166,09

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 15 se muestra un resumen de la variación de la precipitación donde la temporada que va de mayo a octubre presentó las precipitaciones más bajas en comparación con el resto del año; es decir, es la época más seca durante el año. Por otro lado, la precipitación más alta se registró en febrero de 2019, con 34,80 mm y una variabilidad de 141,27%. Las intensas lluvias en la microcuenca del río Alumbre provocaron una mayor demanda por parte de los habitantes aledaños al río que utilizan el agua para la agricultura.

En el año 2018, en la variación anual, se registró la menor precipitación con 22,70 mm (Tabla 16). Durante el 2020 se evidenció una ligera disminución de las precipitaciones en donde se registró 34,50 mm con una variabilidad de 166,09 %.

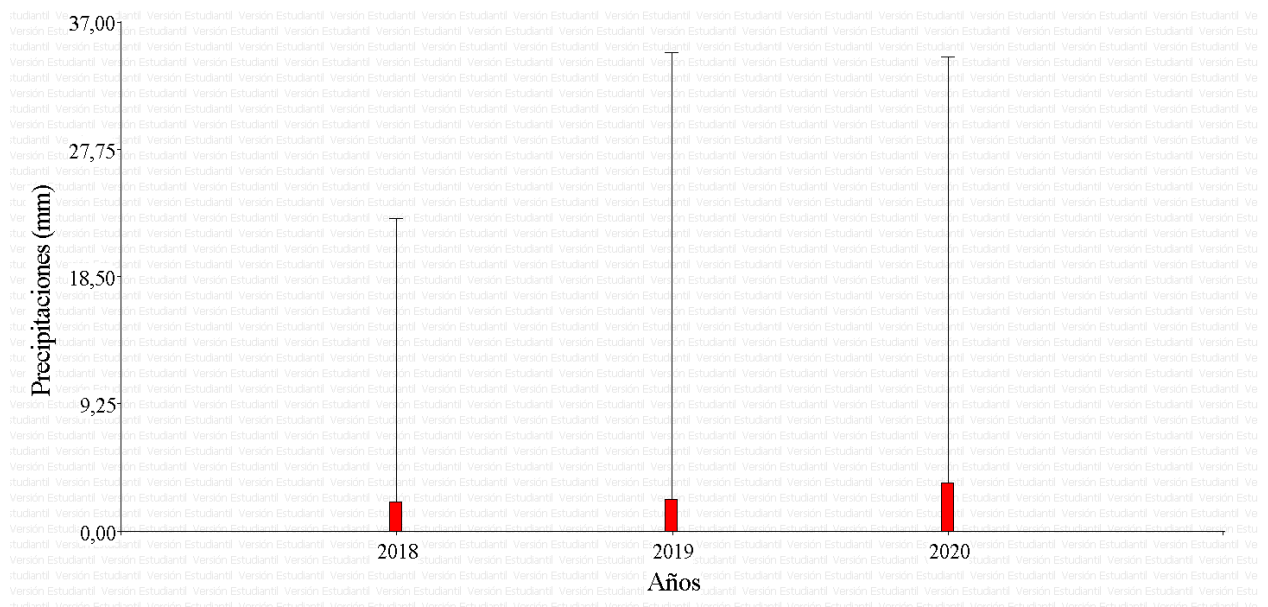


Gráfico 6. Precipitación anual del río Alumbre (2018 - 2020).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 6 se mostró una notable reducción de las precipitaciones en comparación con el gráfico anterior; se presentaron 2 picos máximos en febrero de 2019 con un valor de 35 mm y en marzo de 2020 con 34,5 mm. Frecuentemente las mayores precipitaciones se producen en la etapa de invierno y las menores en verano. Es indispensable determinar que sucedió en este intervalo de tiempo en el que se produjo una notable reducción en las precipitaciones del año 2019; canalizar a través del organismo competente, cuáles son las principales causas y las soluciones para que los pobladores no sufran de escasez de agua.

4.2. Situación de la calidad del recurso hídrico de la microcuenca Alumbre.

Para el desarrollo del análisis de la calidad del agua, se seleccionaron parámetros específicos en función del valor de los datos como la disponibilidad de estos, los indicadores de calidad y su importancia como cuerpo hídrico. Estos parámetros son los siguientes: potencial de Hidrógeno (pH), temperatura, conductividad eléctrica, aceites, oxígeno, nitratos, grasas, sólidos suspendidos totales y, demanda bioquímica de oxígeno, dichos parámetros fueron relacionados con la TABLA 3. Criterios para calidad de agua para riego agrícola, del Acuerdo Ministerial 097-A Reformase del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

4.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH).

En el gráfico 6 se muestran los niveles de pH que presenta el río Alumbre en las partes baja, media y alta de su microcuenca. La normativa ecuatoriana fija el límite máximo permisible (LMP) para este parámetro encuentra en un rango entre 6,5 y 9; por lo tanto, en el punto CSM (parte baja) y MA8 (parte alta), presentaron niveles de pH que están dentro de los LMP, ya que en el estudio realizado se obtuvo un pH que va de 7,2 a 7,8, en los dos años registrados (Tabla 17). Por otro lado, en el punto CA1 (parte media de la microcuenca), se observa una acidificación, en el que se registró un pH de 4,1 para diciembre de 2019 (Gráfico 7), resultado que permite suponer que fue dado al aumento del caudal registrado para ese año, removiendo la geología de la cuenca en este punto, liberando iones de metales presente, y coincidió con la toma de la muestra. Cabe destacar que el pH es muy importante debido a que bacterias y microorganismos dependen de este parámetro para su desarrollo y crecimiento.

Tabla 17
pH del río Alumbre.

pH	dic-19	may-20	LMP TULSMA
CSM parte baja	7,2	7,8	6,5 - 9
CA1 parte media	4,1	7,2	6,5 - 9
MA8 parte alta	7,4	7,2	6,5 - 9

Fuente: Elaboración propia.

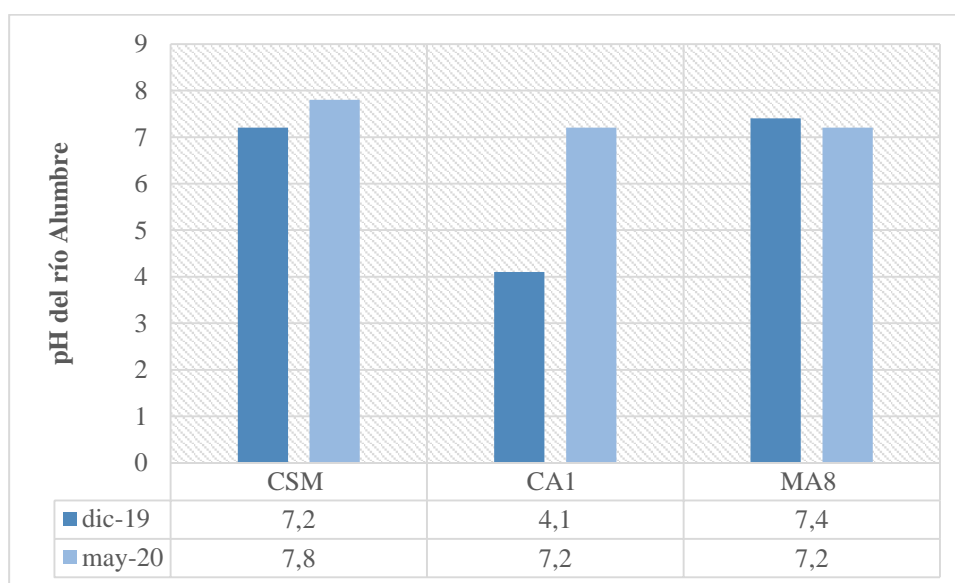


Gráfico 7. pH del río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en un muestreo de suelos, en el análisis se encontró niveles de 1,9 y 3 en el primer derrumbe, 1,8; 2,2; 2,7; 2,5 y 2,8 en el segundo derrumbe y 1,9; 4, 4,3; 3,2 y 3,3, que da lugar a un ambiente ácido en la microcuenca del río Alumbre; estos niveles demostraron que el agua está siendo alterada por actividad antropogénica y puede afectar la vida acuática.

Los organismos acuáticos que hacen vida en la microcuenca del río Alumbre (presentes en la parte baja de la microcuenca) precisan de una calidad óptima de agua que tenga las propiedades necesarias de oxígeno disuelto y sus nutrientes. La variación del pH (desligándose considerablemente de la neutralidad) puede romper el balance químico del agua y movilizar contaminantes, generando un impacto perjudicial, de tal forma, que los peces u otros organismos, pueden sufrir problemas haciendo que las poblaciones se vayan extinguiendo en el río Alumbre.

Chiliquinga & Donoso (2012) en su estudio de calidad de agua en el río Pachanlica, obtuvieron índices de pH alcalinos en algunos tramos de estudio, llegando a registrar hasta 8,29, en el cual, atribuye este resultado a la actividad ganadera y agrícolas e industriales que se detectan en el lugar de muestra, sin embargo, las medias de pH evaluadas no presentaron alteración de este parámetro de calidad.

4.2.2. Temperatura.

En cuanto a la temperatura del río Alumbre, se observa en el gráfico 8 que en la parte baja de la microcuenca en el año 2019 y 2020 se mantuvo aproximadamente en 14 °C; mientras que en el punto CA1 la temperatura bajó alrededor de 2 °C para el año 2020 a 10,9 °C, lo mismo ocurrió en la parte alta de la microcuenca donde en el año 2019 se tuvo 13,1 °C y para el 2020 descendió a 11,8 °C (Tabla 18).

Es de hacer notar que las temperaturas más altas se registran en la parte baja de la cuenta, identificada como CSM, en el cual, la actividad antropogénica está más presente y esto puede significar la principal causa de evaporación del agua en la cuenca.

Tabla 18
Temperatura del río Alumbre.

Temperatura	dic-19	may-20	LMP TULSMA
CSM	14	13,8	N/A
CA1	12,4	10,9	N/A
MA8	13,1	11,8	N/A

Fuente: Elaboración propia.

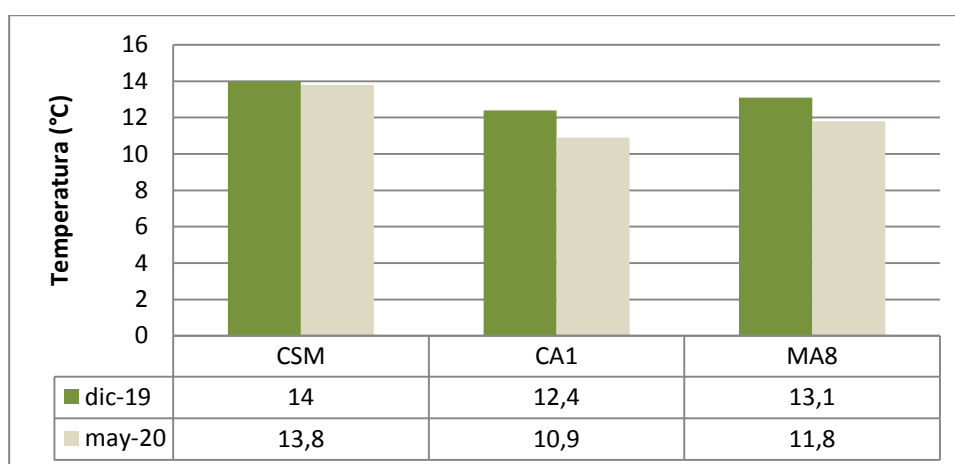


Gráfico 8. Temperatura del río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo antes expuesto se puso en evidencia que en estos dos años en la parte baja, media y alta de la microcuenca del río Alumbre las temperaturas variaron un poco, sin embargo, eso no significa que represente un grave riesgo para los microorganismos del río, Además, de acuerdo con la Mancomunidad Trinacional Fronteriza Río Lema (2013) el límite máximo permisible de temperatura para agua de uso agrícola o de riego es $<35\text{ }^{\circ}\text{C}$; por lo tanto, no sobrepasa los límites referidos a este informe.

4.2.3. Conductividad Eléctrica.

En el gráfico 8 se muestran los valores de conductividad eléctrica que presentó el río Alumbre. En la parte baja (CSM) en diciembre 2019 y mayo 2020 se presentaron valores de 77 uS/cm y 81 uS/cm respectivamente, por otro lado, en la parte media de la microcuenca los valores aumentan a 103 uS/cm y 145 uS/cm y en la parte alta se encuentran los valores más bajos de conductividad eléctrica siendo 22 uS/cm y 21 uS/cm respectivamente para los años 2019 y 2020 (Tabla 19).

Tabla 19

Conductividad eléctrica del río Alumbre.

Conductividad Eléctrica (uS/cm)	dic-19	may-20	LMP TULSMA
CSM	77	81	700
CA1	103	145	700
MA8	22	21	700

Fuente: Elaboración propia.

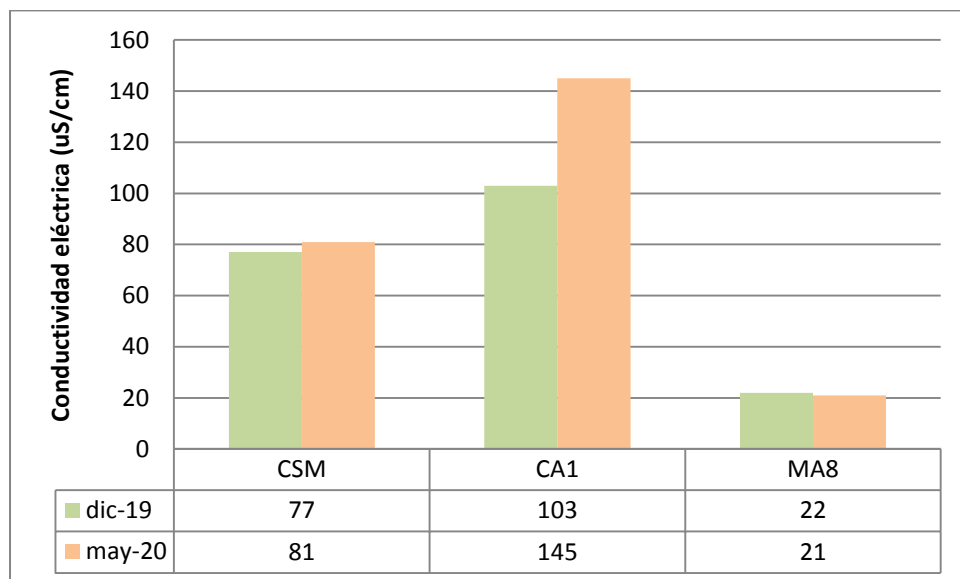


Gráfico 9. Conductividad Eléctrica del río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los análisis se pudo apreciar que los niveles de conductividad eléctrica en el río Alumbre no son altos, a pesar de que en la parte media de la microcuenca los valores son mucho mayores que los del resto. Altos niveles de conductividad eléctrica se atribuyen al incremento en la concentración de Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y otras sales disueltas. Por tal razón se encontró este parámetro dentro de los LMP de las normas ecuatorianas el cual es de $700 \mu\text{S}/\text{cm}$. Resultados semejantes obtuvo Urgilez (2016), en su trabajo de calidad de agua del río Tabacay, en el que la evaluación de la conductividad eléctrica de las microcuencas del río fue $< 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$, siendo de calidad óptima de acuerdo con la normativa ecuatoriana.

4.2.4. Oxígeno Disuelto.

Luego del análisis de calidad de agua, se obtuvo que las concentraciones de OD en la microcuenca fueron bastante similares, lo que quiere decir, que en los tres puntos de estudio hubo una variabilidad muy alta, registrando para el año 2019 concentraciones de $7,5 \text{ mg}/\text{L}$ para la parte baja, $7,4 \text{ mg}/\text{L}$ para la parte media y $7,1 \text{ mg}/\text{L}$ para la parte alta de la microcuenca, y para el 2020 concentraciones de OD de $6,6 \text{ mg}/\text{L}$ para CSM (parte baja de la cuenca), $6,7 \text{ mg}/\text{L}$ en CA1 (parte media) y $6,3 \text{ mg}/\text{L}$ para MA8 (parte alta) considerando estos valores más bajos que los registrados en el 2019 (Tabla 20), sin embargo, el parámetro estudiado, se encuentra

en valores no permisibles del Tulsma. De acuerdo a la investigación realizada por Peña (2007), los niveles de oxígeno superiores a 3 mg/L perjudican a los microorganismos en el río.

Es de hacer notar que las concentraciones más bajas de OD, se localizan en la parte alta de la microcuenca, lo que permite deducir, que es debido a la presencia de mayor cantidad de organismos acuáticos, que hacen vida de manera natural, que en las partes media y baja de la cuenca. A pesar de ello, las concentraciones de OD se encuentran en un nivel óptimo de calidad (Gráfico 10).

Tabla 20

Oxígeno Disuelto del río Alumbre.

Oxígeno Disuelto (mg/L)	dic-19	mayo-20	LMP TULSMA
CSM	7,5	6,6	3
CA1	7,4	6,7	3
MA8	7,1	6,3	3

Fuente: Elaboración propia.

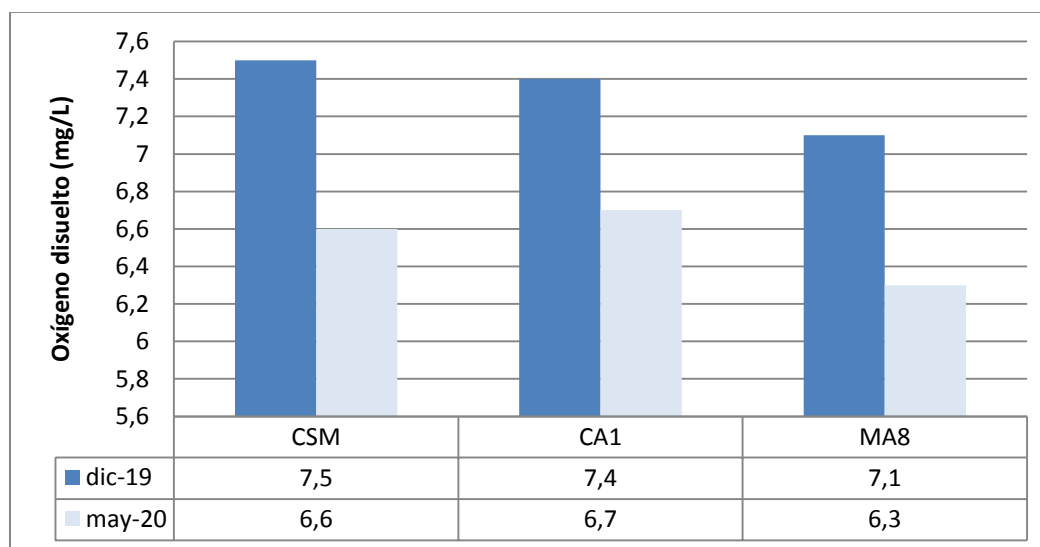


Gráfico 10. Oxígeno Disuelto del río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Nitratos.

Este parámetro permitió deducir la posible fuente de contaminación, es muy común que los nitratos en el agua provengan de fertilizantes, estiércol o compost, por lo cual, la fuente principal son las actividades agrícolas. En ese sentido, los resultados obtenidos nos muestran las concentraciones actuales de nitratos en las tres partes estudiadas de la microcuenca (Alta,

media y baja). En la tabla 21 se detalla que en diciembre 2019 se obtuvo concentraciones de 0,1 mg/L en CSM, <0,05 mg/L en CA1 y 0,19 mg/L en MA8, y para el 2020 las concentraciones se presentaron por debajo de 0,06 mg/L.

Cabe considerar, que los registros más altos se obtuvieron en la parte alta de la microcuenca, en el que las concentraciones más elevadas se presentaron en diciembre de 2019 con 0,19 mg/L, siendo este, un valor permisible por la normativa ecuatoriana, y a su vez, un valor que es normal dado a la presencia de materia orgánica de la zona, composición geológica de la cuenca o simplemente las excretas de los organismos acuáticos presentes, por lo cual se consideran óptimos para la calidad del agua.

Tabla 21
Nitratos del río Alumbre.

Nitratos	dic-19	oct-20	LMP TULSMA
CSM	0,1	<0,05	13
CA1	<0,05	<0,05	13
MA8	0,19	0,06	13

Fuente: Elaboración propia.

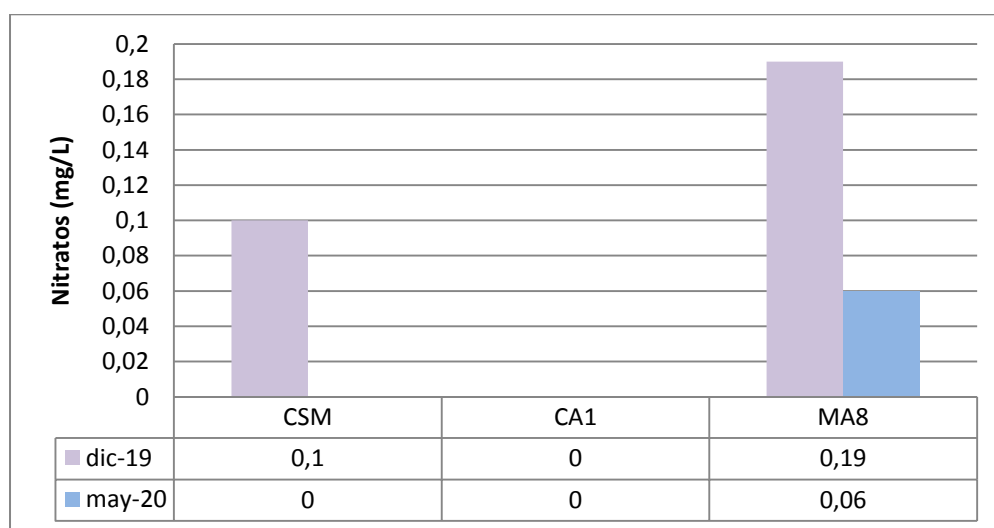


Gráfico 11. Nitratos del río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar los datos se evidenció que todas las concentraciones no superan el LMP expuesto por el TULSMA, que para nitratos es de 10 mg/L; por lo tanto, estos valores se

encuentran dentro de lo permitido y no ocasionan ningún problema de tipo ambiental en el río Alumbre. Por otra parte, Urgilez, (2016) en su trabajo en el río Tabacay, obtuvo una concentración de nitratos $< 7,6$ mg/L en el análisis de la calidad de agua, lo cual es considerado dentro de los LPM conforme a las Normas Ecuatorianas establecidas para los cuerpos de agua dulce.

4.2.6. Nitrógeno Kjeldahl.

Este parámetro en los puntos Jordanita y Alumbre presentó una concentración menor a 0,5 mg/L lo que mostró que no existe contaminación en la microcuenca del río Alumbre. Este resultado es positivo, considerando que el nitrógeno Kjeldahl es una expresión triplicada de iones de nitrógeno presente en el agua, es decir, la sumatoria entre el nitrógeno orgánico y los amoniacales; va ligado a índice permitido de nitratos, si hay presencia de concentraciones de $\text{NO}_3^+ > 10$ mg/L crea una oxidación en los nitratos de amonios librados a partir del nitrógeno orgánico contenido en el agua y origina N_2O lo cual es negativo. Por el contrario, cuando hay presencia de suficiente MO, y bajos niveles de oxidación, el nitrato pierde iones de oxígeno produciendo NH_4^+ , por lo que se considera positivo (IDEAM, 2007).

4.2.7. Aceites y Grasas.

En cuanto a grasas y aceites que contiene el río Alumbre, se determinó que en todos los puntos de la parte baja, media y alta de la microcuenca presentó concentraciones inferiores a $< 0,3$ mg/L. Con respecto a la normativa vigente (TULSMA) establece que no debería haber presencia de este parámetro para el uso del agua en riego agrícola. Vidales, et al, (2010) comentan, que las altas concentraciones de aceites y grasas en cuerpos hídricos pueden generar capas de grasas sobre la superficie de los cuerpos de agua que pueden impedir el ingreso de la luz solar y el adecuado desarrollo de la vida acuática en los ríos y riachuelos que han sido contaminados. Además, si el agua es utilizada para riego o agricultura, frente a lo cual los cultivos pueden verse afectados por este tipo de grasas perjudicando, además, la calidad del suelo.

4.2.8. Sólidos Suspendidos Totales.

Los Sólidos Suspendidos Totales se mostró que en diciembre de 2019 en las partes baja, media y alta de la microcuenca del río Alumbre las concentraciones de este parámetro fueron menos a 5 mg/L; sin embargo, en mayo 2020 en la parte baja fue de 36 mg/L; en la parte media de 8 mg/L y de < 5 mg/L para la parte alta (Tabla 22). Por lo tanto, se observa un incremento

importante en la parte baja y media del río; esto se debe posiblemente al aumento de asentamientos humanos en la cercanía del río y la consiguiente descarga de aguas residuales (Gráfico 11).

Se evidenció una variabilidad de concentraciones entre 2019 y 2020, esto es debido al notorio aumento de la población sobre todo en la parte baja de la microcuenca, en el que existió una marcada variabilidad de las concentraciones de sólidos suspendidos totales.

Tabla 22
Sólidos Suspendidos Totales del río Alumbre.

Sólidos Suspendidos Totales	dic-19	oct-20	LMP TULSMA
CSM	<5	36	
CA1	<5	8	N/A
MA8	<5	<5	

Fuente: Elaboración propia.

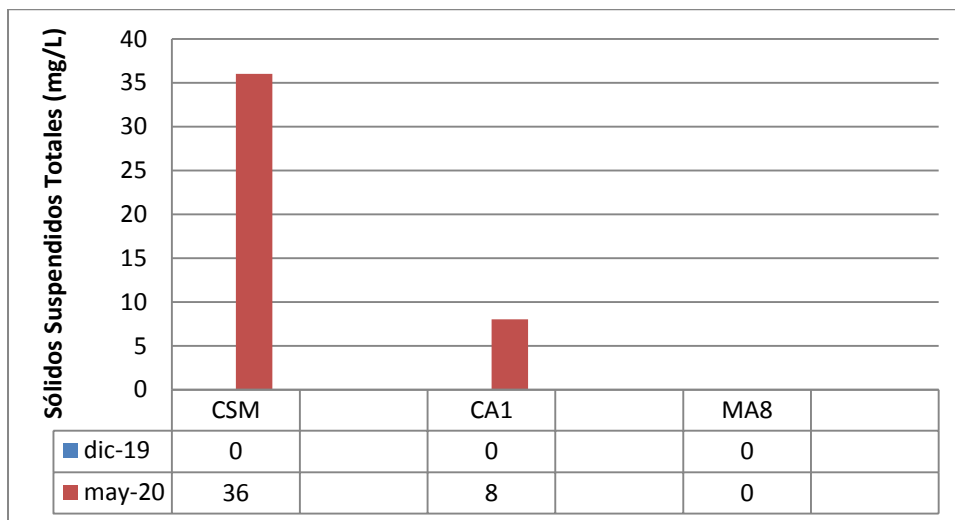


Gráfico 12. Sólidos Suspendidos Totales del río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

Los sólidos biológicos suelen ser usados como fuente alimenticia por las bacterias, generando estabilidad durante el proceso de depuración. Es por esto, que la medida de los sólidos suspendidos proporciona una idea de la manera en que se debe tratar el agua

biológicamente. Por otra parte, los sólidos inorgánicos son compuestos minerales, y algunos son aprovechados también por los microorganismos. Así mismo, los resultados en la evaluación de la calidad de agua del río Pachanlica, expuestos por Chiliquinga & Donoso (2012), guardan relación con los obtenidos en esta investigación, en el cual, obtuvieron una concentración de sólidos totales que van de 0,32 a 0,94 mL/L, en el que puede deberse a la actividad antropogénica y a la geología de la zona.

4.2.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

En la microcuenca del río Alumbre para los años 2019 y 2020 se tienen concentraciones de DBO <3 mg/L; además, se evidencia una concentración de DBO menor a 2 mg/L; esta concentración se presenta en diciembre 2019 y mayo 2020 en las partes baja, media y alta de la microcuenca.

Pauta, et al, (2019), en su evaluación de la calidad de agua en cuatro ríos de Cuenca, obtuvieron variabilidad en los resultados, en el que los valores máximos de DBO5 los registraron en la época de lluvia, alcanzando los 8,9 mg/L en el río Machángara, debido al aumento de la velocidad del caudal lo que genera una reaireación, así mismo, los registros más bajos se presentaron en el río Tarqui con 8,46 mg/L.

4.2.10. Demanda Química de Oxígeno (DQO).

En cuanto a la DQO se tiene que en los puntos estudiados en las partes baja, media y alta de la microcuenca del río Alumbre la concentración de Demanda Química de Oxígeno es inferior a 5 mg/L; solamente en el año 2019 en la parte alta se presentó un valor de 13 mg/L. A pesar de este incremento, la DQO no sobrepasa el límite máximo permitido es de 250 mg/L para cuerpos de agua con fines de uso agrícola o riego.

En este caso, se observa que el río Alumbre presenta las condiciones adecuada para un empleo seguro en cuanto al riego de los pastizales cercanos a la microcuenca del río Alumbre sobre todo en la parte alta de la misma, en donde se ha observado una baja alteración de este recurso.

Chiliquinga & Donoso (2012), muestran en el sector Chiquicha, los valores más altos de DQO, alcanzando los 44 mg/L en su trabajo de calidad de agua, encontrándose igualmente dentro de los LMP de DQO.

4.2.11. Coliformes fecales.

La cantidad de coliformes fecales en las partes baja, media y alta de la microcuenca del río Alumbre es menor a 30 NMP/100 ml. Las bacterias coliformes fecales están conformadas por las bacterias Gram negativas, la más conocida es la *Echerichia coli*. La presencia en el agua de coliformes fecales indica que el agua se ha contaminado por heces fecales y puede ocasionar enfermedades gastrointestinales en el orden de cólera y disentería.

En este caso la cantidad de coliformes fecales es bajo y no existe contaminación en el río Alumbre de este parámetro. Sin embargo, es importante que se realice un seguimiento para evitar la contaminación del agua que es utilizada para riego y la agricultura; y evitar la propagación de enfermedades en la población aledaña a la microcuenca.

4.2.12. Arsénico.

Los niveles de arsénico en el río Alumbre son bajos; teniendo así para el año 2019 en la parte baja, media y alta las concentraciones de: 0,0081 mg/L, <0,0005 mg/L y 0,0078 mg/L respectivamente en cada punto; por otro lado, para el año 2020 los niveles fueron de: 0,005 mg/L, 0,0067 mg/L y 0,0099 mg/L en la parte baja, media y alta de la microcuenca respectivamente (Tabla 23). Estos valores no sobrepasaron el límite máximo permitido emitido por el TULSMA de 0,05 mg/L para cuerpos de agua que serán utilizados en riego o agricultura.

Tabla 23

Arsénico en el río Alumbre.

Arsénico	dic-19	oct-20	LMP TULSMA
CSM	0,0081	0,005	0,05
CA1	<0,005	0,0067	0,05
MA8	0,0078	0,0099	0,05

Fuente: Elaboración propia.

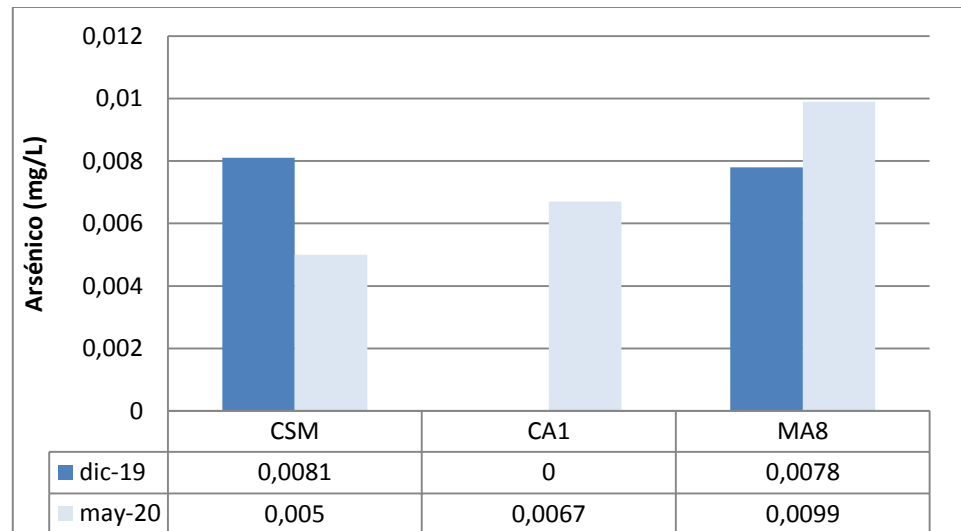


Gráfico 13. Arsénico en el río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

Los niveles de arsénico en el río Alumbre son bajos; teniendo así para el año 2019 en la parte baja, media y alta las concentraciones de: 0,0081 mg/L, <0,0005 mg/L y 0,0078 mg/L respectivamente en cada punto; por otro lado, para el año 2020 los niveles fueron de: 0,005 mg/L, 0,0067 mg/L y 0,0099 mg/L en la parte baja, media y alta de la microcuenca respectivamente (Gráfico 13). Estos valores no sobrepasaron el límite máximo permisible emitido por el TULSMA de 0,05 mg/L para cuerpos de agua que serán utilizados en riego o agricultura.

La presencia de arsénico en el agua para uso de riego puede afectar a los pastos y la ganadería, de la misma manera los seres humanos estamos expuestos a esta contaminación a través del consumo de productos del campo y productos de origen animal (Pazmiño & Mendieta, 2018).

4.2.13. Hierro.

En cuanto al hierro, se observa que en diciembre de 2019 en la microcuenca del río Alumbre las concentraciones de hierro son relativamente bajas: <0,02 mg/L, 0,68 mg/L y <0,02 mg/L y está conforme al LMP por TULSMA; mientras que en mayo de 2020 las concentraciones superan el límite de 0,3 mg/L siendo 1,1 mg/L, 1,2 mg/L y 0,38 mg/L para las partes baja, media y alta de la microcuenca respectivamente (Gráfico 14) (Tabla 24); representando un problema para la calidad del agua.

Tabla 23
Hierro en el río Alumbre.

Hierro (mg/L)	dic-19	oct-20	LMP TULSMA
CSM	<0,02	1,1	0,3
CA1	0,68	1,2	0,3
MA8	<0,02	0,38	0,3

Fuente: Elaboración propia.

El hierro está presente en bajas concentraciones en forma natural en el agua. Al aumentar su concentración se transforma en uno de los contaminantes que con más frecuencia se encuentra en el agua potable (Durán & Torres, 2006). Mientras que, en altas concentraciones representa un grave problema y algunos organismos acuáticos no pueden sobrevivir, porque este metal es tóxico y perjudicial no solamente para los organismos sino también en el momento que hace contacto con la piel de los seres humanos.

Aunado a esto, se evidenció en el análisis de suelo de los derrumbes muestreados, abundantes óxidos de hierro mostrando un color rojizo característico de la presencia de hierro. La existencia de este metal en el agua involucra que el suelo se contamina con el mismo dando lugar a lo mostrado en los análisis.

Esta variabilidad presente entre 2019 y 2020, es evidencia que la actividad pecuaria está en crecimiento, y la contaminación se hace más notoria, considerando que en las partes bajas y medias las concentraciones de este metal fueron más altas para el año 2020. Estas actividades no sólo aportan lixiviados a la microcuenca, sino también son causante de erosiones en los suelos, desprendiendo así las moléculas de óxido de hierro liberándolo y reaccionando con otros iones, alterando otros parámetros como el pH.

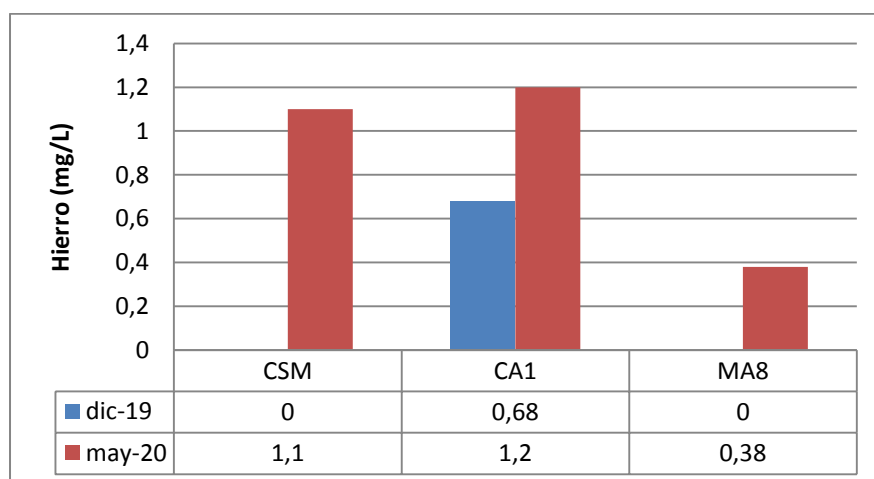


Gráfico 14. Hierro en el río Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis comparativo de calidad de agua entre resultados actuales y los resultados históricos.

Al realizar el análisis de la información obtenida el monitoreo in situ y análisis de laboratorio de la calidad del agua del río Alumbre se evidencia que la parte baja de la microcuenca donde existe pastizales y vegetación arbustiva existe un incremento en los niveles de pH, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales, DBO, DQO, nitratos, arsénico y hierro; sin embargo, estos valores son aceptables ya que no superan el límite máximo permisible emitido por la normativa ecuatoriana (TULSMA).

En la parte alta de la microcuenca donde se encuentra el vertedero Jordanita, se presentan los valores más bajos de los parámetros analizados como la conductividad eléctrica con 22 uS/cm y 21 uS/cm y otros parámetros como la DBO y DQO que presenta concentraciones menores a 2 mg/L y 5 mg/L respectivamente.

Con respecto a la información obtenida se puede evidenciar un cambio importante en la alteración del recurso hídrico en la microcuenca del río Alumbre; en primer lugar, los caudales, así como las precipitaciones han reducido significativamente en los últimos 3 años; esto debido a la gran demanda de la población para el uso agrícola o riego sobre todo en la parte baja de la microcuenca donde aumenta la concentración de los parámetros analizados

La parte media ha mostrado tener un incremento de conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales, arsénico y hierro con el paso de los años desde el 2005; es importante acotar que las partes media y baja de la microcuenca se han visto un poco afectadas por los asentamientos poblacionales cerca del río Alumbre.

4.3.1. Potencial de Hidrógeno (pH).

Con relación al pH, en el punto MACCP se evidencia el nivel más bajo en septiembre de 2017 (6,1), mientras que el máximo de 7,1 se produjo en diciembre 2017 y octubre 2018; de tal forma que los niveles de pH en este punto no perjudican la calidad de agua de la microcuenca del río Alumbre. Por otro lado, en el punto MAJ el nivel mínimo de pH se dio en julio 2017 (5,9) y el máximo en diciembre 2017 (7), estos datos coinciden con los meses del primer punto. En el punto MAP el agua ya presentó un carácter ácido con un valor mínimo de

3,6 en julio de 2017 y un valor máximo de 3,9 en julio, octubre y diciembre de 2017; se deben tomar en cuenta estos datos para la evaluación de esta parte de la microcuenca debido a que los microorganismos se ven afectados por los niveles bajos de pH del agua. En el caso del punto MACA los valores varían de 5,5 a 6,4, estos niveles se encuentran bajos en relación con los obtenidos en el resto de los puntos como es el caso del punto MADG, MADR cuyo valor mínimo es 6,5 en diciembre 2018 y el máximo de 7,1 en marzo de 2018. Finalmente, en el punto MAPC se muestran solamente dos valores de 8,3 en octubre 2018 y 7,6 en diciembre 2018, como se observa estos niveles de pH son superiores a los del resto de puntos. El rango normal de pH varía de 6,5 a 9; de esta forma, los organismos acuáticos no tendrían mayor inconveniente por la calidad del agua.

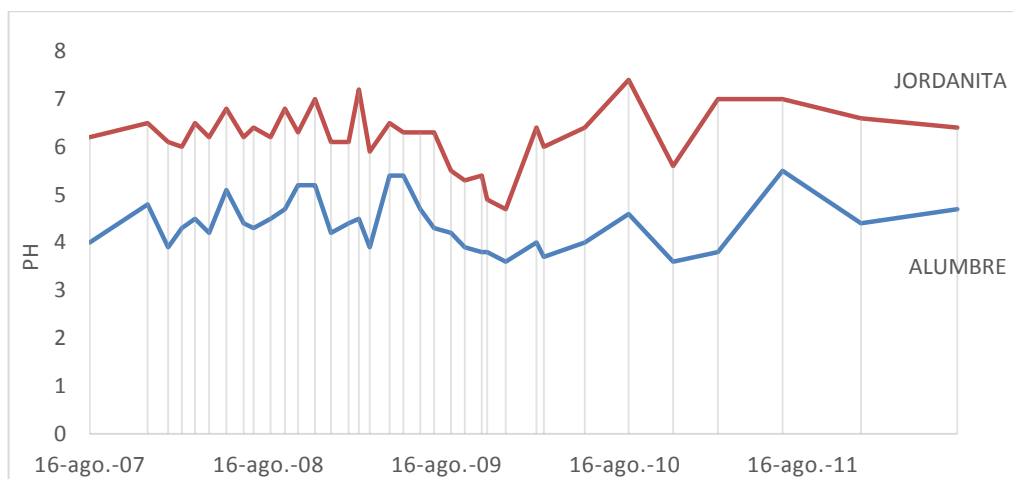


Gráfico 15. pH en los puntos Jordanita y Alumbre 2007-2012.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar el gráfico 15, se evidencia que los niveles de pH en el punto Jordanita en la parte alta de la microcuenca del río Alumbre son mayores a los presentados en el punto Alumbre (parte media), este último presenta características ácidas cuyo valor más bajo es de 3,5 en diciembre de 2010 y el más alta en junio de 2011 de 5,8. Por otro lado, en el punto Jordanita el valor mínimo fue de 4,8 en agosto 2009 y el máximo en agosto 2010 que fue de aproximadamente 7,5. Se concluye que la parte alta de la microcuenca presenta los niveles óptimos de pH para el desarrollo de vida acuática; además, tiene el nivel adecuado para su uso en la agricultura o riego.

4.3.2. Temperatura.

En cuanto a la temperatura en los puntos de la microcuenca del río Alumbre, se obtuvo que la temperatura más baja se presentó en el punto MAJ con 9,7 °C en el mes de diciembre 2018; en el punto MAP la temperatura alcanzó 10,1 °C en diciembre 2018, en MAPC la temperatura más baja fue de 11,2 °C en diciembre 2018. Por otro lado, en MACCP la temperatura fue de 12,2 °C en octubre de 2018 y en el punto MAPC se produjo la temperatura más alta de 13,3 °C siendo la más elevada en comparación con el resto de los puntos. Una elevación en la temperatura del agua de la microcuenca del río Alumbre implica una disminución de oxígeno que puede afectar a los microorganismos aeróbicos.

4.3.3. Conductividad Eléctrica.

La conductividad eléctrica es un parámetro importante para establecer la presencia de sales disueltas en el agua, en este caso de la microcuenca del río Alumbre. En el punto MACCP la CE varió de 26 uS/cm en septiembre 2017 a 94 uS/cm en marzo 2018. Por otro lado, en MAJ el valor más bajo fue de 16 uS/cm y el más alto fue de 23 uS/cm; mientras que en MAP el rango fue de 79 uS/cm a 132 uS/cm siendo el nivel más elevado en noviembre 2017. En el punto MACA los datos fueron más bajos en comparación con el punto MAP siendo el mínimo de 13 uS/cm y el máximo de 28 uS/cm. Se obtuvo un valor muy alto de 239 uS/cm en el punto MADG, MADR en octubre 2018 y en el punto MAPC los valores de igual forma fueron altos de 215 y 138 uS/cm.

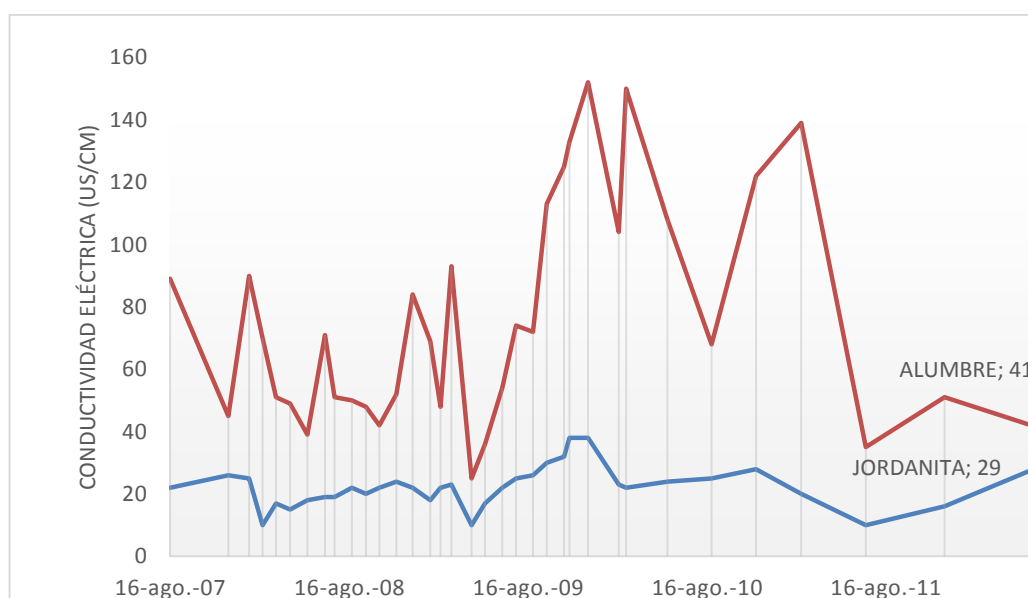


Gráfico 16. Conductividad Eléctrica en los puntos Jordanita y Alumbre 2007-2012.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la conductividad eléctrica en los puntos Alumbre y Jordanita; los niveles en el primer punto son más bajos que en el segundo; en Jordanita los valores no superan los 40 uS/cm, mientras que en Alumbre se presentan valores altos de hasta 158 uS/cm en diciembre de 2009 y un mínimo de 20 uS/cm en mayo de 2009 (Gráfico 16); por lo tanto, en este punto se encuentran localizada una elevada carga de sales disueltas que pueden afectar a los microorganismos acuáticos. La calidad del agua en la parte alta de la microcuenca es mejor que en la parte media debido a la poca alteración que ha sufrido por parte de las poblaciones aledañas. Se observa además que, en ambos puntos, el periodo 2009 registró los valores más altos de conductividad eléctrica.

Comparando los valores de conductividad eléctrica del agua con los obtenidos en el análisis de suelo realizado, nos encontramos que son más bajos en los puntos Alumbre y Jordanita que en los derrumbes muestreados, obteniendo valores para el derrumbe 1 de: 2050 uS, 640 uS, derrumbe 2 de: 3770 uS, 1510 uS, 440 uS, 1970 uS y 2190 Us y derrumbe 3 de: 2720 uS, 20 uS, 40 uS, 300 uS y 310 uS; en el cual, se evidencia la marcada diferencia de la salinidad del suelo vs del agua, lo cual demuestra la presencia de sales en el suelo que afectan su calidad.

4.3.4. Oxígeno Disuelto.

En cuanto al oxígeno disuelto en el punto MACCP se observa que para octubre y diciembre de 2018 las concentraciones fueron de 5,2 y 6,7 mg/L respectivamente, estos valores indican que el agua tiene el suficiente oxígeno para los organismos aerobios en la microcuenca del río Alumbre. Por otro lado, en el punto MAJ la concentración mínima de este parámetro fue de 6,4 mg/L en noviembre de 2017 y la máxima de 7,4 mg/L en julio y agosto de 2017. En el punto MAP las concentraciones de oxígeno disuelto varían de 6,8 mg/L y 7,7 mg/L. En tanto que, en el punto MACA se indica un valor de 7,1 mg/L en octubre 2018 y 7,7 en febrero de 2018. Para MADG, MADR la concentración de 7,3 mg/L se produjo en octubre y diciembre de 2018. Finalmente, para el punto MAPC se obtuvo una concentración de 6 mg/L en octubre de 2018.

Las concentraciones de oxígeno disuelto de los puntos Jordanita y Alumbre varía de 6,3 mg/L a 8,1 mg/L (Gráfico 17), este resultado indica que en los dos puntos el río presenta el suficiente oxígeno para los organismos aeróbicos que hacen vida en él. Los valores normales

están entre los 7,0 y 8,0 mg/L según Goyenola (2007), los valores admisibles para el desarrollo de peces y organismos acuáticos es de 5 a 8 mg/L, y buena, cuando las concentraciones de OD van de 8 a 12 mg/L. Por lo que no existe un déficit en la concentración, lo cual es indicativo de que es buena la calidad del agua en ambos puntos.

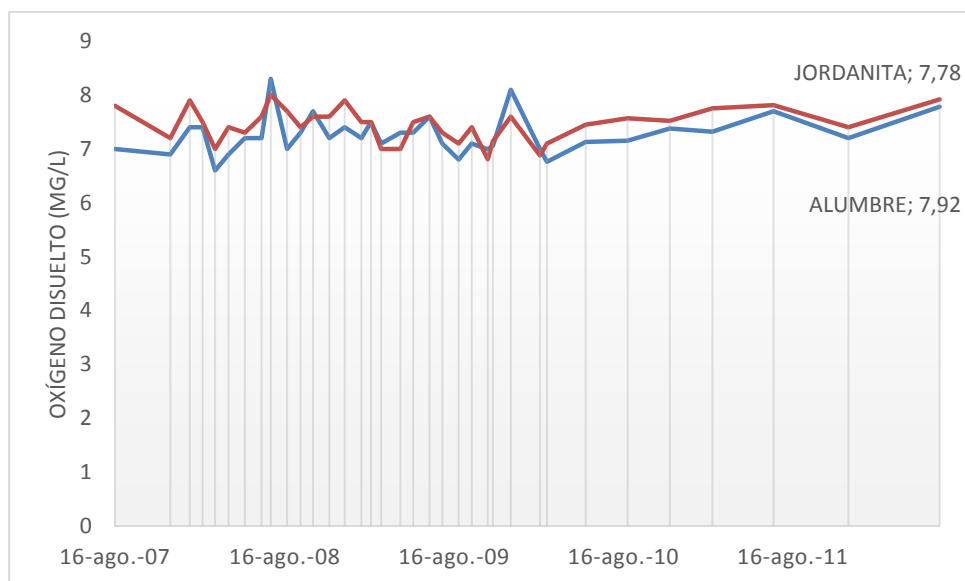


Gráfico 17. Oxígeno Disuelto en los puntos Jordanita y Alumbre 2007-2009.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.5. Nitratos.

Con relación a nitratos en los puntos Jordanita y Alumbre en las partes alta y media respectivamente durante los años 2007 a 2009; las concentraciones son menores a 0,05 mg/L; existen algunos meses en donde sube a 1 mg/L, sin embargo, no se evidencia que sobrepase el límite máximo permisible emitido por el TULSMA (13 mg/L). La calidad del agua es buena sobre todo en la parte alta de la microcuenca.

En los puntos MACCP, MAJ, MAP, MACA, MADG, MADR y MAPC la concentración de nitratos al igual que en Jordanita y Alumbre fue $<0,05$ mg/L.; es decir, no sobrepasa el límite máximo permisible que emite la normativa ecuatoriana.

4.3.6. Nitrógeno kjeldahl.

La concentración de nitrógeno kjeldahl en todos los puntos analizados: MACCP, MAJ, MAP, MACA, MADG, MADR y MAPC fue de $<0,5$ mg/L; es decir, en la microcuenca del río Alumbre no se presenta un exceso de nitrógeno de una sustancia química presente en el agua.

4.3.7. Aceites y Grasas.

La concentración de aceites grasas en todos los puntos analizados: MACCP, MAJ, MAP, MACA, MADG, MADR y MAPC fue de $<0,3$ mg/L; por lo tanto, en estos 6 puntos de la microcuenca del río Alumbre no se evidencia ningún tipo de grasa que reduzca la calidad del agua y esté afectando la vida acuática de los microorganismos.

4.3.8. Sólidos Suspendidos Totales.

Los sólidos suspendidos totales en el punto MACCP muestran una concentración de 5 mg/L para diciembre de 2018; mientras que para el resto de los meses en el 2017 y 2018 la concentración es <5 mg/L, al igual que en el punto MAJ que se presenta esta misma característica. En el punto MAP se muestran concentraciones de 73 mg/L y 8 mg/L en octubre y diciembre de 2018 respectivamente. En tanto para los dos puntos MACA y MADG, MADR la concentración de SST sigue siendo menor a 5 mg/L y finalmente en el punto MAPC se tuvieron concentraciones de 15 mg/L y 6 mg/L para octubre y diciembre de 2018 respectivamente (Gráfico 18).

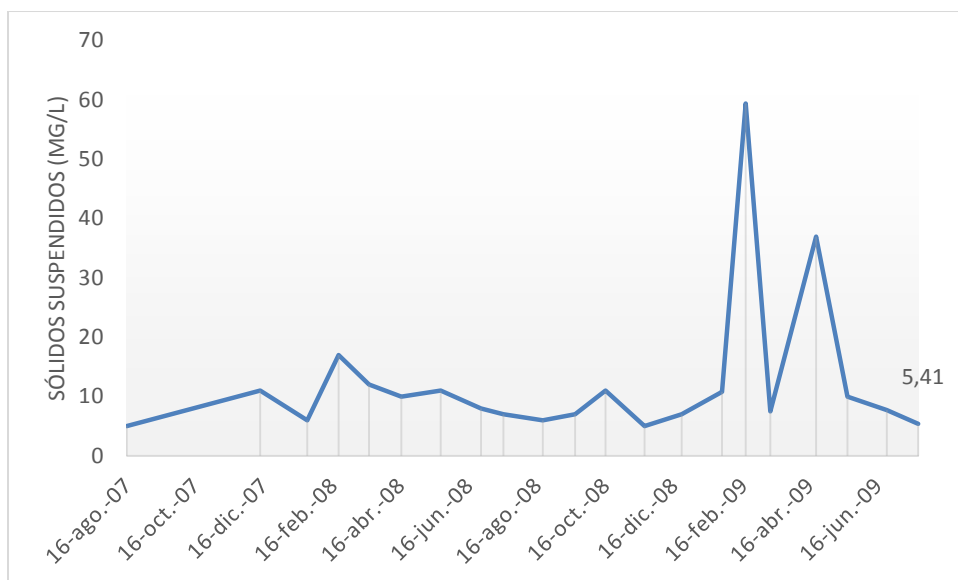


Gráfico 18. Sólidos Suspendidos totales en el punto Jordanita 2007-2009.

Fuente: Elaboración propia.

La concentración de sólidos suspendidos en el punto Jordanita varió mucho durante el año 2009; cuya concentración máxima es de 60 mg/L en febrero seguido de 39 mg/L en mayo; es decir la cantidad de sólidos suspendidos se ha incrementado en el caso del 2009; mientras que para los años 2010, 2011 y 2012 las concentraciones disminuyeron a <5 mg/L mostrando una reducción significativa. Estos sólidos están formados por materia orgánica e inorgánica, arcillas, limos, entre otros; su concentración varía por los cambios climáticos, actividades biológicas y otros eventos que mediante la escorrentía llegan a los ríos aumentando los sólidos suspendidos.

4.3.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

En los seis puntos analizados: MACCP, MAJ, MAP, MACA, MADG, MADR y MAPC la concentración de DBO es menor a 2 mg/L, demostrando que en la microcuenca del río Alumbre no hay presencia de materia orgánica en exceso ya que se encuentra dentro de los límites máximos permisibles que exige el TULSMA.

4.3.10. Demanda Química de Oxígeno.

En el punto MACCP la DQO muestra concentraciones de 5 y 16 mg/L para octubre y diciembre de 2018 respectivamente. En MAJ en estos dos meses se presenta una concentración de 5 mg/L. En tanto que para MAP las concentraciones son de 4 y 15 mg/L para los meses mencionados anteriormente en el año 2018. Para el punto MACA, la concentración fue menor a 4 mg/L en octubre 2018 y 20 mg/L en diciembre de 2018. En MADG, MADR los valores

fueron de 5 y 7 mg/L en los meses analizados y finalmente en MAPC la concentración fue menor a 4 mg/L y 14 mg/L EN la microcuenca del río Alumbre.

4.3.11. Coliformes Fecales.

En los seis puntos analizados: MACCP, MAJ, MAP, MACA, MADG, MADR y MAPC la cantidad de coliformes fecales es menor a 30 NMP/100 ml; la calidad del agua no presenta este tipo de bacterias que podrían afectar la salud de las personas si el río estuviera contaminado y el agua empleado para la agricultura.

4.3.12. Arsénico.

En cuanto al arsénico en los seis puntos analizados la concentración es menor al límite máximo permisible emitido por el TULSMA (0,05 mg/L), a excepción del punto MAP en octubre de 2018 con 0,13 mg/L de este metal; sin embargo, no se puede afirmar que el agua se encuentre contaminado con este metal ya que las concentraciones son muy bajas.

Las concentraciones de arsénico durante los años 2007 a 2012 en los puntos Jordanita y Alumbre son menores a 0,002 mg/L; es decir no sobrepasan el LMP emitido por el TULSMA (0,05 mg/L) y no representa alguna alteración en la calidad del agua del río Alumbre; si estos niveles fueron altos el agua se contaminaría con este metal y sí es usada para riego o agricultura, los alimentos cosechados en los cultivos consumidos por los seres humanos ocasionarían problemas de salud.

4.3.13. Hierro.

En el caso del hierro, se obtuvo que en el punto MAJ las concentraciones sobrepasan el límite de 0,3 mg/L siendo 0,35 mg/L en marzo 2018, 0,41 mg/L en octubre 2018 y 0,6 mg/L en diciembre de 2018; la presencia de este metal representa un riesgo no solo para los microorganismos del río Alumbre sino también para la salud de las personas que tienen contacto con el hierro. En el punto MAP se produce un exceso de este metal en 3 fechas siendo: 2,1 mg/L en diciembre 2017, 1,6 mg/L en marzo 2018 y 6,1 mg/L en diciembre 2018; como se evidencia son niveles muy altos en comparación con lo que se permite en cuerpo de agua. Al igual en MACA se excede en las concentraciones donde varía de 0,36 mg/L a 0,8 mg/L; así como en MADG, MADR se dan valores de 0,4 y 0,56 mg/L respectivamente en marzo de 2018 y diciembre 2018.

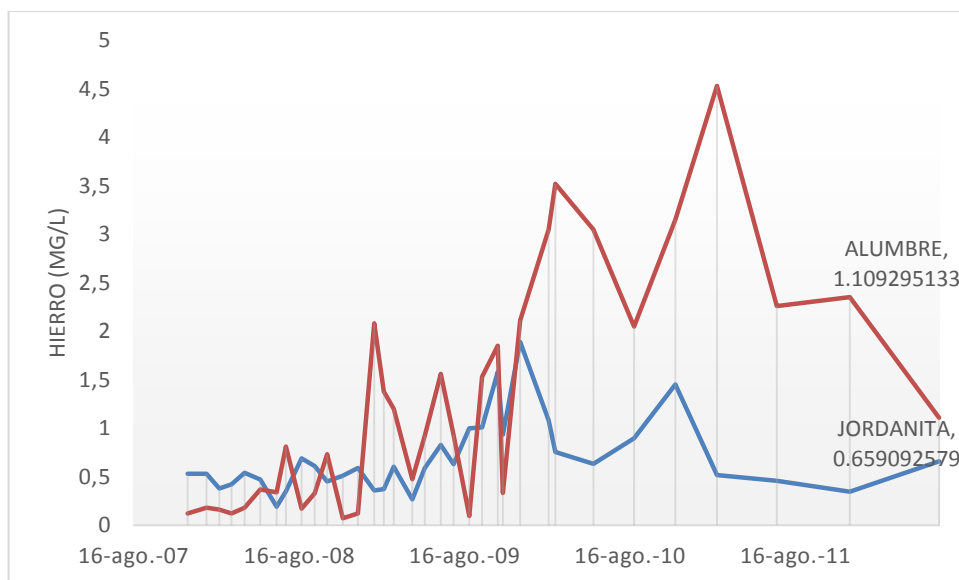


Gráfico 19. Hierro en los puntos Jordanita y Alumbre 2007 -2012.

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 19, las concentraciones de hierro en los puntos Jordanita y Alumbre superan el límite máximo permisible emitido por el TULSMA (0,3 mg/L); el pico máximo en el punto Alumbre se produce a 4,5 mg/L y en Jordanita es de 1,9 mg/L; estos valores indican que el río presenta contaminación de este parámetro que es perjudicial para los microorganismos acuáticos; así también sería inadecuado su uso para la agricultura o riego de los cultivos cercanos a la microcuenca debido a que este metal es nocivo para los seres humanos y podría ocasionar alguna enfermedad o problemas en su piel por el consumo de hierro mediante los alimentos cultivados en los terrenos aledaños.

4.4 Modelo de calidad ambiental ajustado a la dinámica del caudal de la cuenca Cristal Alumbre

4.4.1 Diseño del modelo

Para simular el modelo, primeramente se formó la topología del río Cristal Alumbre; de 5 nudos descritos desde la cabecera (nudo inicial, ubicado en la parte alta de la cuenca) y terminando en el tramo final (nudo final, parte baja de la cuenca), de la misma manera se tomó en cuenta las demandas de agua otorgadas por SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua) (Figura 7), se ingresó en el programa AQUATOOL, los datos mensuales de caudal, y análisis de la calidad de agua históricos de: oxígeno disuelto, DBO5, amonio, nitrógeno orgánico y

nitratos desde el mes de octubre del 2008 hasta septiembre 2010, con el soporte del módulo SIMGES, se generó la simulación de calidad del agua de dos años.

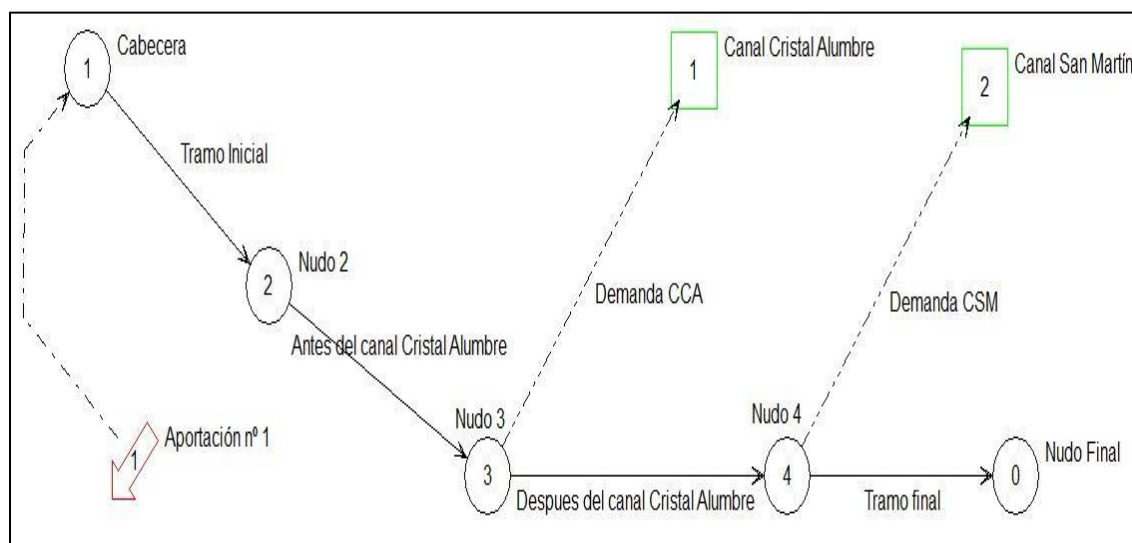


Figura: 1. Topología del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En la simulación, se evidencia un primer tramo tipo 1 del río en el que en cierta época del año demanda agua, justo en el nudo 3, ubicado antes del canal Cristal Alumbre, y un segundo tramo tipo 1, en el nudo 4, ubicado después del canal Cristal Alumbre. Esta demanda contribuye a una pérdida de caudal en el canal: y entendiendo que, en estas partes de la cuenca, no hay presencia de poblaciones establecidas que permita pensar que esta pérdida está asociada al abastecimiento local, se sabe que, en la zona, sobre todo en la parte media y baja de la cuenca, se realizan explotaciones agrícolas, por lo que se presume que esta demanda, que sucede en cierta época del año, es por el aprovechamiento en el riego.

4.4.2 Simulación del tramo inicial

Una vez hecha la simulación para la gestión del recurso hídrico, se procedió al análisis de los datos para la posterior calibración de los parámetros de calidad, en ese sentido, se obtuvo, tomando en cuenta el período de 2008 – 2010; dos picos $>$ a 8 mg/L de oxígeno disuelto registrados en diciembre de 2009 y julio de 2010, específicamente. Para el parámetro DBO5, teniendo una baja notoria para noviembre de 2009, \geq a 2 mg/L. El nitrógeno orgánico se mantuvo constante durante el período cercanos a 1 mg/L, y los parámetros amonio y nitratos, casi nulos, en proporciones cercano a 0 mg/L (Gráfico 20).

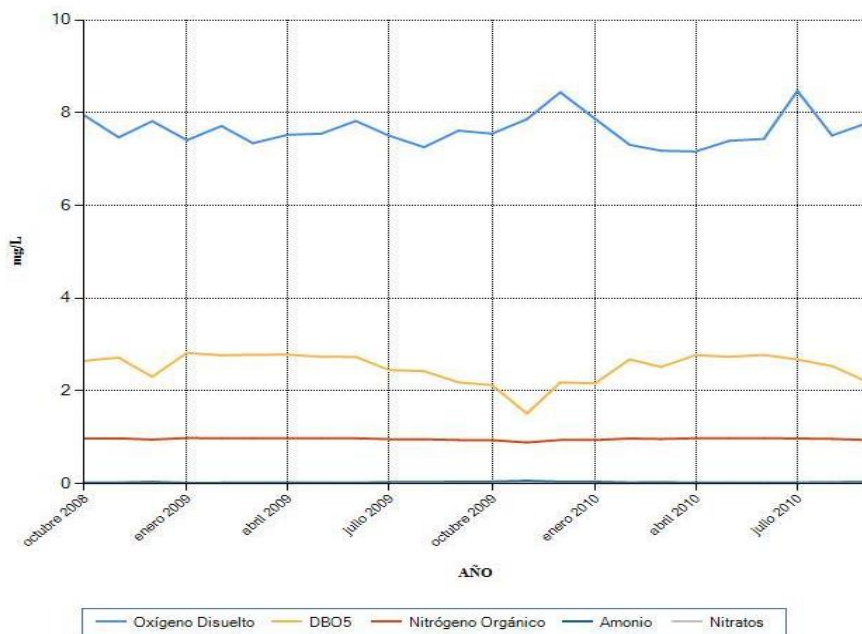


Gráfico 20. Simulación para el tramo inicial.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Simulación antes del canal Cristal Alumbre

Los valores obtenidos para la simulación antes del canal Cristal Alumbre, durante el mismo período, se mantienen semejantes a los obtenidos en el tramo inicial, marcando la diferencia para el parámetro DBO5, en el que se registra para noviembre de 2009, un resultado < a 2 mg/L. Para el resto de los parámetros se mantienen iguales al tramo inicial (Gráfico 21).

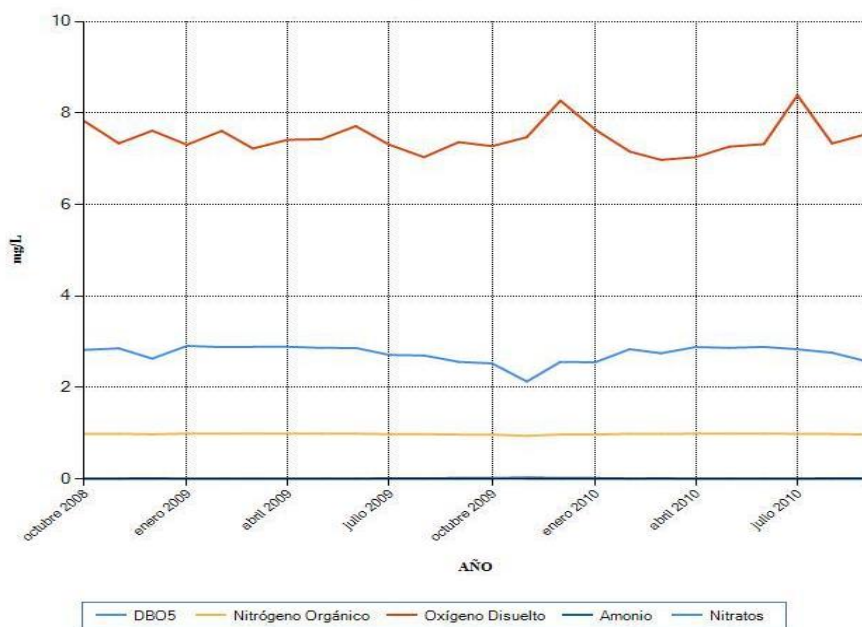


Gráfico 21. Simulación tramo antes del canal Cristal Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. Simulación después del canal Cristal Alumbre

Para el tramo después del canal Cristal Alumbre en el período 2008 - 2010, se tiene que para el parámetro OD, se registró de octubre a diciembre de 2009 una concentración ≥ 8 mg/L, al igual que en julio de 2010. El DBO5 tiene un comportamiento dinámico durante el periodo, registrando valores ≤ 2 mg/L, en el mes de diciembre de 2008, y desde agosto de 2009 hasta enero de 2010 (Gráfico 22). Los otros parámetros (nitrógeno orgánico, amonio y nitrato), mantienen valores semejantes a los tramos anteriores.

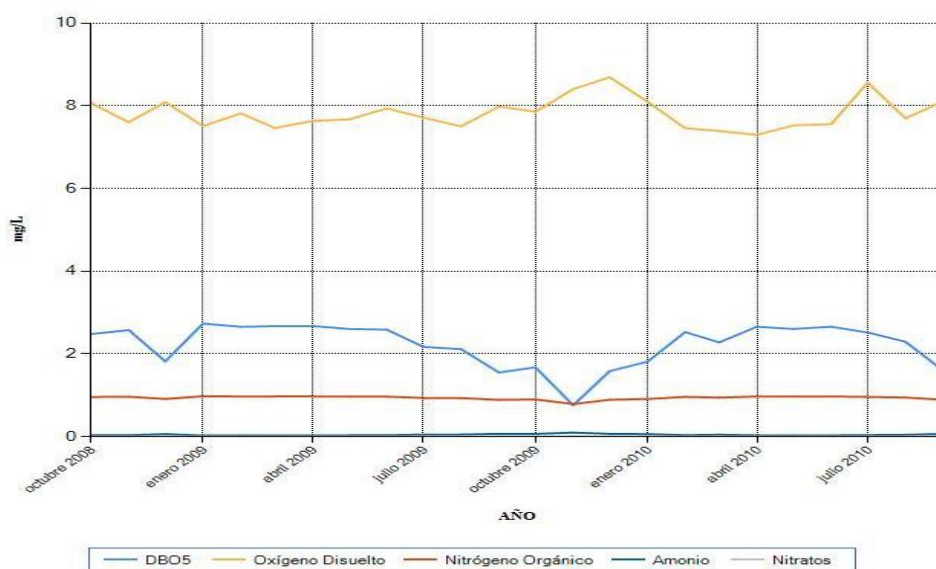


Gráfico 22. Simulación después del canal Cristal Alumbre.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.5. Simulación del tramo final.

Durante la simulación de este tramo, en el periodo 2008- 2010, se puede observar que para el mes de septiembre de 2009 todos los parámetros bajan considerablemente, esto debido a que, en esa época se desvía el caudal del río a los canales de riego (Cristal Alumbre y San

Martín) ubicado en la parte media y baja de la cuenca. De igual manera sucede en los meses de noviembre y diciembre de 2009 (Gráfico 23), ya que durante estas épocas se registraron los picos más altos de sequía en ese año, por lo cual, los productores de la zona desviaron el agua para aprovecharla como riego.

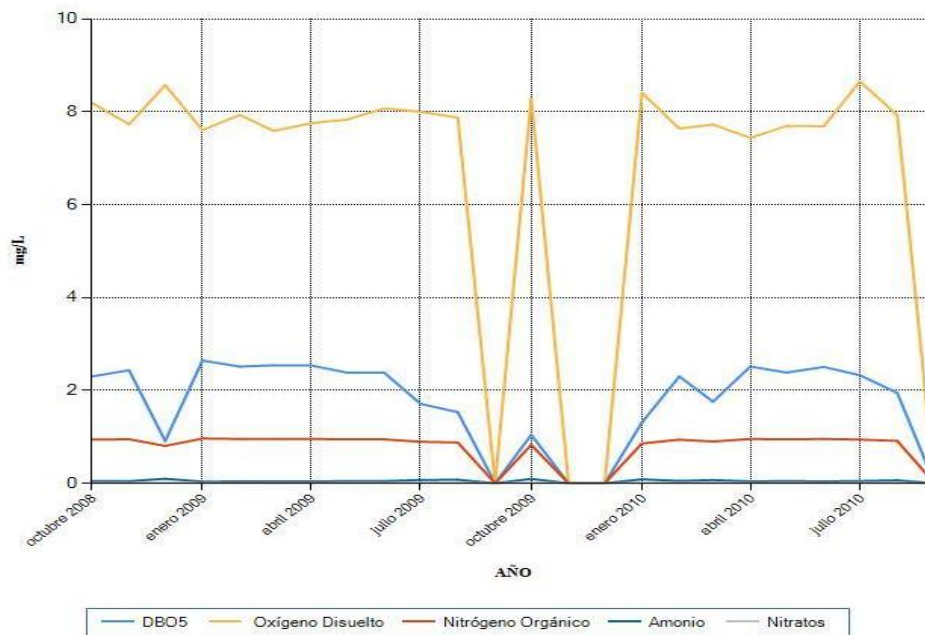


Gráfico 23. Simulación del tramo final.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6. Simulación DBO5

El resultado muestra que este parámetro tiene la misma dinámica en todos los tramos estudiados durante el período 2008 – 2010. Mostrando bajas considerables del indicador en diciembre de 2008, llegando a una concentración < a 1 mg/L, para el tramo final, mientras que para los otros tramos se registraron > a 1,5 mg/L. Luego en el mes de septiembre de 2009, se registra otra baja considerable de la concentración de DBO5, igualando a 0 mg/L para el tramo

final, mientras que los otros tramos se mantienen por encima de los 1,5 mg/L en este mismo mes. Para los meses de noviembre y diciembre de 2009, se registran en todos los tramos bajas significativas de DBO5, destacando el tramo final en el que no se registra concentración alguna, y los otros tramos con valores > 0,5 mg/L. Por último, en el mes de agosto de 2010, vuelve a descender el registro del parámetro cayendo a 0 mg/L en el tramo final, mientras que los otros tramos estudiados registraron una concentración > a 0,5 mg/L (Gráfico 24).

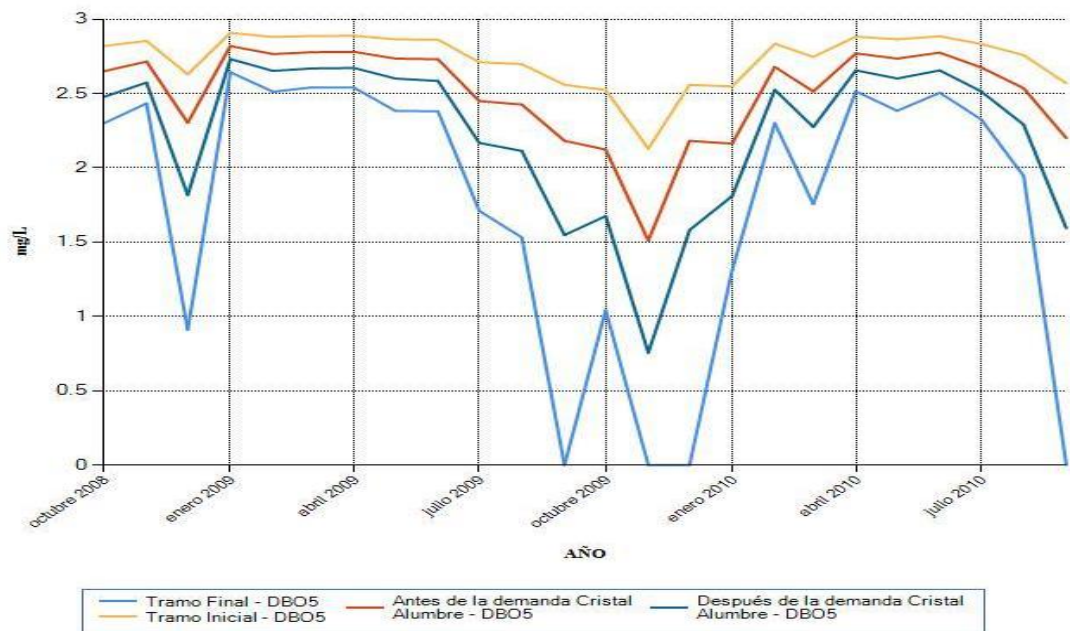


Gráfico 24. Simulación DBO5.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 24 se puede divisar la tabla de valores del tramo inicial de DBO5 desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, en el mes de enero del año 2008 existe el valor más alto con 2,91 mg/L, mientras que en el mes de noviembre del año 2009 existe el menor valor con 2,13 mg/L, el promedio de DBO5 para el periodo 2008-2009 es de 2,74 mg/L.

Tabla 24

Valores del tramo inicial de DBO5

Año	Oct	Nov	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.
2008	2,82	2,85	2,63	2,91	2,88	2,89	2,89	2,86	2,86	2,71	2,70	2,56

2009	2,52	2,13	2,56	2,55	2,83	2,75	2,88	2,86	2,89	2,83	2,76	2,57
Total	5,34	4,98	5,19	5,46	5,71	5,64	5,77	5,72	5,75	5,54	5,46	5,13

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 25 se puede divisar la tabla de valores del tramo inicial de DBO5 desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, en el mes de enero del año 2008 existe el valor más alto con 2,64 mg/L, mientras que en el mes de septiembre del año 2008, noviembre, diciembre del año 2009, existe el menor valor con 0,01 mg/L, el promedio de DBO5 para el periodo 2008-2009 es de 1,76 mg/L.

Tabla 25

Valores del tramo final de DBO5

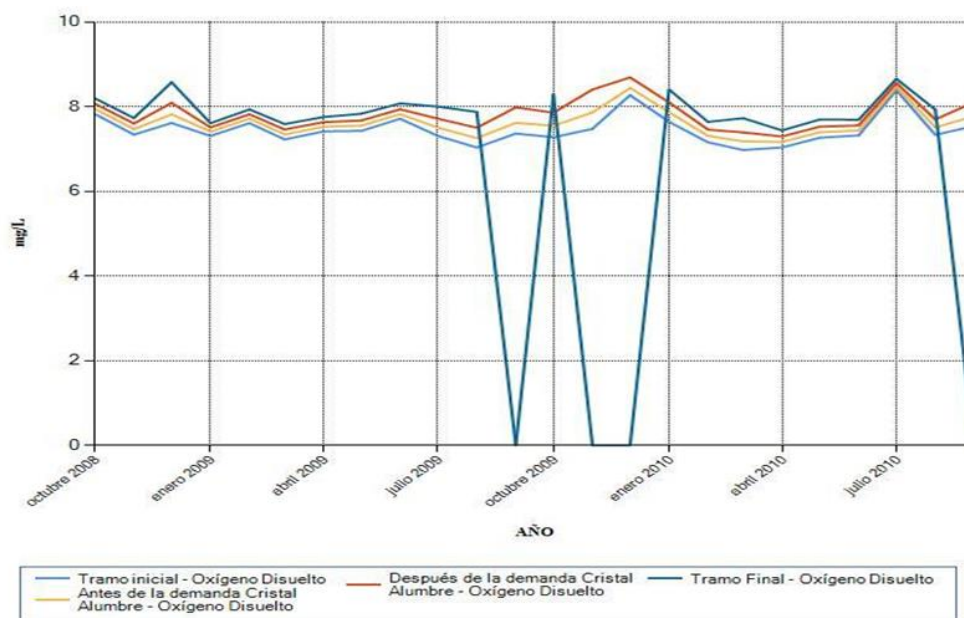
Año	Oct	Nov	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.
2008	2,3	2,43	0,91	2,64	2,51	2,54	2,54	2,38	2,38	1,71	1,53	0,01
2009	1	0,01	0,01	1,31	2,3	1,76	2,51	2,38	2,5	2,33	1,94	0,10
Total	3,3	2,53	1,01	3,95	4,81	4,3	5,05	4,76	4,88	4,04	3,47	0,2

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los escenarios planteados utilizando el software AQUATOOL, se evidencio claramente que mientras el caudal del río recorre mayor distancia, existe una degradación del DBO5. Se considera que los meses de septiembre, noviembre y diciembre existe mayor disminución del DBO5 en consideración de la parte alta hacia la parte baja de la microcuenca.

4.4.7. Simulación Oxígeno Disuelto.

La dinámica en la simulación del oxígeno disuelto presentes se mantiene equilibrado en todos los tramos y durante casi todo el periodo en estudio. Sin embargo, se destaca el tramo después del canal Cristal Alumbre, con concentraciones > 8 mg/L en el último trimestre de 2009, los tramos, inicial y antes de la demanda Cristal Alumbre, registraron picos por encima de 8 mg/L en el mes de diciembre de 2009, así mismo, los tramos, después de la demanda Cristal Alumbre y final, registraron concentraciones de OD \geq 8 mg/L en el mes de diciembre 2008. Se destaca la unanimidad de las concentraciones en julio de 2010, en el que todos los tramos registran OD > 8 mg/L. Por otra parte, el tramo final, muestra un resultado desfavorable



en términos de concentración, ya que, en septiembre de 2009, noviembre y diciembre de 2009 y agosto 2010, no se registran lecturas de este parámetro (Gráfico 25).

Gráfico 25. Simulación de Oxígeno Disuelto.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 26 se puede divisar la tabla de valores del tramo inicial del oxígeno disuelto desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, en el mes de octubre del año 2009 existe el valor más alto con 8,27 mg/L, mientras que en el mes de marzo del año 2009 existe el menor valor con 6,97 mg/L, el promedio de oxígeno disuelto para el periodo 2008-2009 es de 7,45 mg/L en la parte alta de la microcuenca.

Tabla 26

Valores de la parte alta de la microcuenca Cristal Alumbre de Oxígeno Disuelto

Año	Oct	Nov	Dic,	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,
2008	7,82	7,34	7,61	7,31	7,61	7,22	7,41	7,43	7,71	7,31	7,03	7,36
2009	7,27	7,47	8,27	7,64	7,16	6,97	7,03	7,26	7,32	8,39	7,33	7,54
Total	15,1	14,81	15,88	14,94	14,76	14,2	14,45	14,69	15,03	15,69	14,37	14,9

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 27 se puede divisar la tabla de valores del tramo final del oxígeno disuelto desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, en el mes de enero del año 2009 existe el valor más alto con 8,27 mg/L, mientras que en los meses de septiembre, noviembre y diciembre del año 2009 existe el menor valor con 0,09 mg/L, el promedio de oxígeno disuelto para el periodo 2008-2009 es de 6,60 mg/L.

Tabla 27

Valores de la parte baja de la microcuenca Cristal Alumbre Oxígeno Disuelto

Año	Oct	Nov	Dic,	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,
2008	8,19	7,73	8,57	7,61	7,93	7,59	7,75	7,83	8,07	8	7,87	0,10
2009	8,28	0,09	0,09	8,4	7,64	7,72	7,44	7,69	7,69	8,65	7,93	0,09
Total	16,47	7,73	8,57	16,01	15,57	15,31	15,19	15,52	15,76	16,65	15,8	0

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los escenarios planteados el oxígeno disuelto, se evidencio claramente que mientras el caudal del río recorre mayor distancia, existe una degradación del oxígeno disuelto, se puede considerar esto a la oxigenación natural que se produce mientras hay movimiento del caudal.

4.4.8. Nitrógeno orgánico

La presencia de nitrógeno orgánico en todos los tramos no presenta mayor variación durante el período estudiado manteniendo una concentración entre 0,8 y 1 mg/L. No obstante, el tramo final registra concentraciones de 0,8 mg/L en diciembre de 2008, mientras que, en septiembre, noviembre y diciembre de 2009 y agosto 2010, no hay registros dados en la simulación (Gráfico 26).

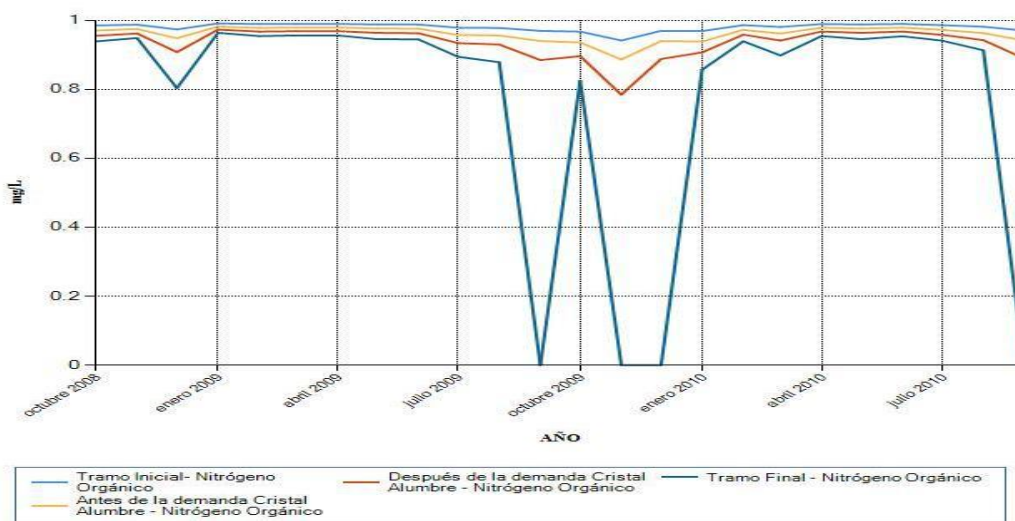
Gráfico 26. Simulación de Nitrógeno orgánico.

Fuentes: Elaboración propia.

En la tabla 28 se puede divisar la tabla de valores del tramo inicial del nitrógeno desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, los valores simulados no varían considerablemente manteniendo un rango entre 0,94 - 0,99 mg/L, teniendo un promedio de 0,98 mg/L

Tabla 28

Valores de amonio de la parte alta de la microcuenca Cristal Alumbre



Año	Oct	Nov	Dic,	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,
2008	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97
2009	0,97	0,94	0,97	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97
Total	1,95	1,93	1,94	1,96	1,98	1,97	1,98	1,98	1,98	1,96	1,96	1,94

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 29 se puede divisar la tabla de valores del tramo final del nitrógeno desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, mientras que en los meses de septiembre, noviembre y diciembre del año 2009 existe el menor valor con 0 mg/L, el promedio de oxígeno disuelto para el periodo 2008-2009 es de 0,76 mg/L.

Tabla 29

Valores de amonio de la parte Baja de la microcuenca Cristal Alumbre

Año	Oct	Nov	Dic,	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,
2008	0,94	0,95	0,8	0,96	0,95	0,96	0,96	0,95	0,94	0,89	0,88	0,10
2009	0,83	0	0	0,86	0,94	0,9	0,95	0,95	0,95	0,94	0,91	0
Total	1,76	0,95	0,8	1,82	1,89	1,85	1,91	1,89	1,9	1,84	1,79	0

Fuente: Elaboración propia.

En relación a la tabla 28 y 29 se pudo notar que existe poca degradación de nitrógeno, en cuanto a los valores de 0 mg/L, se debe a la desviación del caudal hacia los canales de riego, por o tanto al disminuir notablemente el caudal bajo el nitrógeno.

4.4.9. Amonio y nitratos.

Por su parte, la presencia de amonios en los nudos simulados, se destacan los registros más altos en los tramos, después de la demanda cristal con resultados > 0,08 mg/L en noviembre de 2009, y el tramo final, con registros por encima de 0,08 mg/L en diciembre de 2008, octubre de 2009 y enero de 2010. Manteniéndose en un parámetro óptimo de la calidad del agua. Así mismo, se evidencian lecturas = 0 mg/L, en septiembre, noviembre y diciembre 2009 y agosto 2010 (Gráfica 27).

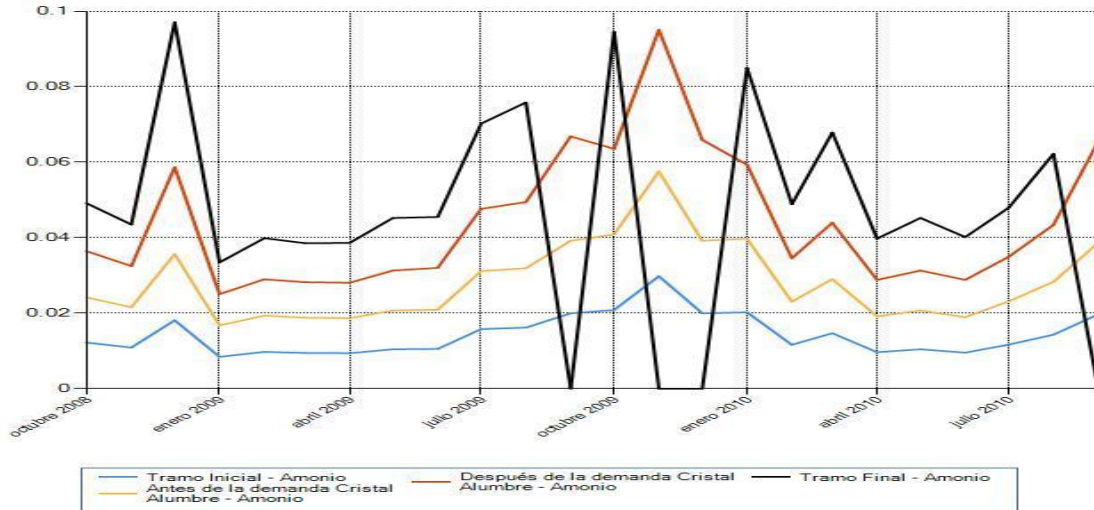


Gráfico 27. Simulación de amonio.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la simulación de nitratos muestra dos picos importantes de concentración, uno en diciembre 2008 registrado en el tramo final, y otro en noviembre de 2009 registrado en el tramo después de la demanda Cristal Alumbre; ambos con valores $> 0,006$ mg/L. A su vez, el tramo final presenta en octubre 2009 y enero 2010, registros por encima de $0,004$ mg/L (Gráfico 27).

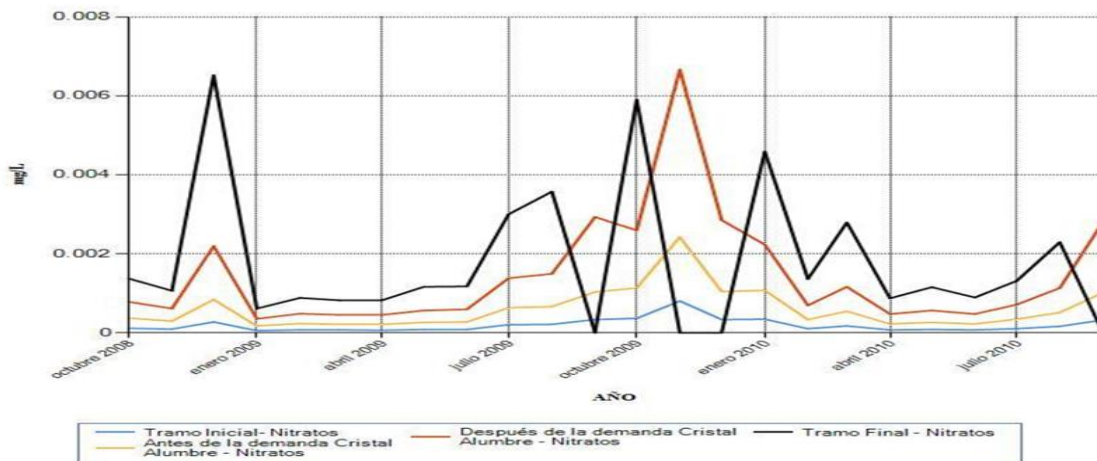


Gráfico 28. Simulación de nitratos.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 30 se puede divisar la tabla de valores del tramo inicial del nitrógeno desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, los valores tienen una baja concentración de nitratos.

Tabla 30

Valores de nitrato de la parte alta de la microcuenca Cristal Alumbre

Año	Oct	Nov	Dic,	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,
2008	0,05	0,04	0,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,08	0,2
2009	0,09	0,1	0,2	0,08	0,05	0,07	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,2
Total	0,14	0,05	0,3	0,12	0,09	0,11	0,08	0,09	0,09	0,12	0,14	0,4

En la tabla 31 se puede divisar la tabla de valores del tramo final del nitrógeno desde el mes de octubre del año 2008 hasta el mes de septiembre del año 2009, habiendo disminuido con relación al tramo inicial, por lo cual se considera que mientras mayor recorrido del caudal mejora la calidad del recurso hídrico.

Tabla 31

Valores de nitratos de la parte Baja de la microcuenca Cristal Alumbre

Año	Oct	Nov	Dic,	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,
2008	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
2009	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Total	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Luego de realizar la investigación, se pudo caracterizar la calidad de agua mediante un modelo ambiental ajustado a la dinámica hidrológica de la microcuenca Cristal Alumbre, y para ello se tiene lo siguiente:

- El análisis hidrometeorológico permitió establecer las variaciones en las precipitaciones durante dos periodos que comprenden 2005 – 2014 y 2018 - 2020, destacando el mes de febrero de 2009 con los registros más altos, de 45,60 mm, lo que implica que, comparándolo con los otros años de estudio, presenta una diferencia altamente significativa, el motivo de esto puede estar aunado al inicio del periodo de lluvias en la región y a la presencia del fenómeno El Niño para ese año. Otro de los indicadores importante es la variación en el caudal, haciendo énfasis en el mes de febrero de 2009 con el registro más alto en comparación con los otros años estudiados, con un flujo de agua de 797,12 L/s, que permite evaluar el uso del recurso hídrico por parte de las poblaciones aledañas, resaltando que el mayor consumo de este recurso está dado por la producción agrícola y pecuaria, lo que puede sentar bases considerables para establecer una adecuada gestión del recurso hídrico en los próximos años. Cabe destacar que, aunque el mes de febrero de 2009 presentó los registros más altos para ambos parámetros, la correlación de los datos simulados y observados mantienen una misma lógica en sus resultados.

- El diagnóstico de la calidad de agua de la microcuenca Cristal Alumbre permitió demostrar que el recurso hídrico tiene parámetros que están fuera de los parámetros aceptables expuestos por TULSMA, que en la parte alta, media y baja de la cuenca estudiada el oxígeno disuelto sobrepasa los valores permitidos por la normativa, afectando a la vida acuática y de la misma manera a la calidad de agua para el uso en el riego de los pastizales, en la cuenca media (CA1), registró valores de $\text{pH} < 7$, debido a la presencia de hierro encontrado en la zona con niveles elevados por encima de 0,3 mg/L, lo que explica el proceso de oxidación natural y lixiviación de sulfuros. Es de hacer notar, que a pesar de que de manera natural se consiguen estos metales en la composición geológica de la zona, para la parte media de la cuenca, existe un canal de desvío del caudal, utilizado con fines de riego, que pudiese intervenir en el proceso de acidificación del agua, ya que se evidencia el uso de la cuenca para actividades antropogénicas, sobre todo, la agricultura.

- Se realizó una comparación de registros de calidad de agua para la microcuenca Cristal Alumbre, específicamente de los puntos Jordanita y Alumbre en dos periodos, 2007 – 2013 y 2018 - 2020, en el que se evidencia un afectación año tras año de la calidad del río Cristal Alumbre, que, por un lado, puede estar aunado a los deslizamientos naturales que ocurren en la parte alta, media y baja de la cuenca, liberando metales pesados y minerales que se van disolviendo en el agua encauzada, afectando principalmente el pH del agua.

- La calibración de los parámetros de calidad se determinó con la ayuda de la herramienta AQUATOOL simulados en el módulo GESCAL, lo que permitió generar un modelo de gestión para la calidad del agua de la microcuenca Cristal Alumbre mediante simuladores realizados en SIMGIS, que permiten establecer un SSD para la planificación y gestión de los recursos hídricos de la mencionada cuenca. Con los resultados obtenidos se puede crear un protocolo ambiental que permita remediar la calidad del recurso hídrico del río Alumbre, sobre todo en la parte media y alta de la cuenca permitiendo establecer el tratamiento adecuado para garantizar el aprovechamiento del agua, no solo por el ecosistema que hace vida en estas partes, sino también para el consumo humano y actividades agrícolas y ganaderas de la parroquia. Por otra parte, permite planificar la gestión del recurso para evitar la escasez de OD durante algunos meses del año, sobre todo, en época de sequía, que pone en riesgo la vida de los organismos acuáticos existentes en la parte baja, sobre todo. El índice de DBO5, nitrógeno orgánico, amonio y nitratos, se mantienen en parámetros óptimos, demostrando la actividad regular microbiológica en la degradación de MO contenidos en los distintos tramos de la cuenca.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un monitoreo de la microcuenca durante todo el año sin interrupciones, así, se podrá establecer registros certeros basados en datos reales y no de históricos obtenidos, que, si bien es cierto, estos datos históricos no carecen de credibilidad, lo más fiable sería, la recolección de datos durante los dos periodos climáticos característicos de la zona (lluvia y sequía) durante el periodo 2005 - 2020. Este tipo de datos permitiría establecer con más certeza la variabilidad hidrometeorológica de la microcuenca Cristal Alumbre. Además, se recomienda comparar los históricos facilitados por la empresa minera INV Minerales Ecuador S.A. con los datos que tenga Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), a fin de unificar criterios de evaluación y generar un modelo hídrico unificado para la microcuenca.

- Es de gran utilidad establecer un análisis de suelo en más cantidad de derrumbes, así se puede realizar un diagnóstico de la calidad de agua con más precisión, considerando, además, la capa vegetal que esté presente en los mismos, ya que todo esto podría influir en parámetros como el pH, conductividad eléctrica, presencia de metales en el agua, entre otros. Así mismo, crear un protocolo de preservación que permita educar a los habitantes de las zonas aledañas de cómo utilizar el recurso hídrico de la zona sin generar un impacto negativo en el ecosistema de la microcuenca.

- Es recomendable hacer un estudio demográfico de las poblaciones aledañas a las tres zonas de la microcuenca (baja, media y alta) estudiadas, a fin de crear un programa de concientización para la preservación del recurso natural no renovable y así, tener el provecho consciente del agua para la producción agrícola y comercial, así como también, para el consumo humano. Todo esto, porque si bien es cierto, que la calidad del agua aún se encuentra en parámetros óptimos de calidad, se evidencia con el tiempo el deterioro del recurso.

- Ya que se tiene la caracterización de la calidad del agua de la cuenca, se recomienda realizar estudios geológicos más completos, en más puntos en la cuenca, con el fin de crear una planificación y gestión integral del recurso hídrico que sea aprovechable primeramente por el ecosistema de la zona, y en segundo lugar, que permita establecer el uso adecuado del agua, bien sea para el consumo o para las actividades agrícolas y pecuarias de la parroquia, que pueda ser normado por el GADP para establecer el mejor uso de la cuenca

hidrográfica. Así mismo, se recomienda seguir ampliando el modelo de caracterización de la calidad de agua para la cuenca Cristal Alumbre, generando así un plan de manejo del recurso hídrico que permita desarrollar otros modelos como por ejemplo hidroeconómicos.

- Para fortalecer la gestión del recurso hídrico de la zona, se recomienda implementar un sistema de riego tecnificado, ya que actualmente se maneja el riego a través de canal abierto, y a su vez, crear un almacenamiento de agua para los abrevaderos de ganado, que sirva para surtir agua durante el periodo de sequía a fin de mitigar el riesgo ocasionado por el estrés hídrico, de esta manera, se puede evitar el ingreso de animales a orillas de la cuenca garantizando a su vez, la conservación de la calidad del agua de esta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, J., & Díaz, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Alcalá de Henares: Centro Para el Conocimiento del Paisaje, Civilscape, IMDEA agua.
- Alarcón, F. H. (2015). *Diagnóstico de la microcuenca los Amates, cuenca grande de Zacapa*. (Tesis de grado), Universidad Rafael Landívar, Jutiapa.
- Alvarez, J. (2020). *AQUATOOL*. Retrieved from Aqua Tool Software:
<https://aquatool.webs.upv.es/aqt/aquatool/>
- Andreu, J., Capilla, J., & Cabezas, F. (1994). Los Sistemas Soportes De Decision En La Planificacion Y Gestion Racionales De Los Recursos Hidricos. *Ingeniería del Agua*, 1-7.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2011). *Planificación y ordenamiento territorial*. Constitución de la República del Ecuador. Montecristi: Registro Oficial. Obtenido de https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley organica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua*. Quito: Registro Oficial.
- Balarezo, J. J. (2017). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. *DYNA*, 86(210), 338-344.
- Cabrera, J. (2015). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. (Tesis de grado), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Caicedo, V., & Gallegos, W. (2016). *Caracterización de la calidad del agua de la microcuenca del río Yasipán de la provincia de Chimborazo mediante la utilización de bioindicadores - macroinvertebrados acuáticos*. Riobamba: Espoch.
- Cajal, A. (2015). *Investigación de campo: características, tipos y etapas*. México: Ciencia.
- Cajal, A. (2015). *www.lifeder.com*. Retrieved from www.lifeder.com:
<https://www.lifeder.com/investigacion-de-campo/>

- Caro, C. (2015). *Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98112/TCACC1de1.pdf>
- Ceballo, O., González, I., Galli, A., & Romeu, O. (2015). *Modelo de gestión integrada de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas y de adaptación al cambio climático*. (Tesis de Maestría), Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manabí.
- Chiliquinga, C., & Donoso, H. (2012). *Caracterización de la calidad del agua de la microcuenca del Río Pachanlica de la provincia de Tungurahua*. Riobamba: Espoch.
- Chuquín, D. (2016). *Aplicación De Un Modelo Semidistribuido De Precipitaciones correntía Para La Evaluación De Los Recursos Hídricos En La Cuenca Del Río Jalón*. Universitat Politècnica de València. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). *Derechos de la naturaleza*. Quito: Registro Oficial.
- Durán, J., & Torres, A. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media. *Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad*, XII(36), 36-62.
- FAO. (2018). *Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de FAO y ONU-Agua.: file:///Users/mac/Downloads/SDG6_Indicator_Report_642_Progress-on-Level-of-Water-Stress_2018_SPANISH.pdf
- Galán, E., & Romero, A. (2008, Noviembre). Contaminación de suelos por metales pesados. *Sociedad española de mineralogía*, 10(1), 48-60. Retrieved from http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- García, E. A. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la cuenca del río Machangara*. (Tesis de grado), Universidad de Cuenca, Cuenca.
- González, C. (2011). *Monitoreo de la calidad del agua*. Mayaguez: Universidad de Puerto Rico. Obtenido de [//academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-862/maguaph.pdf](http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-862/maguaph.pdf)
- Goyenola, G. (2007, Junio). *Guía para la utilización de las Valijas Viajeras*. Retrieved from Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos: http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf

- Gutiérrez, M. M., & Aristizábal, H. F. (2007). Implementación Del Sistema Soporte A La Decisión Aquatool. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*(6), 40-46.
- GWP-INBO. (2009). *Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de Global Water Partnership (GWP) y la Red Internacional de Organismos de Cuenca (International Network of Basin Organizations, INBO).:
https://www.riob.org/IMG/pdf/RIOC_GWP_Manual_para_la_gestion_integrada.pdf
- Henao, J. (1998). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá: USTA.
- Iiama. (2019). *Sistema de Soporte a la Decisión para la Planificación y Gestión de Recursos Hídricos AQUATOOL*. Recuperado el 20 de Mayo de 2020, de Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente:
<https://www.iiama.upv.es/iiama/es/transferencia/software/aquatool-e>
- Indij , D., Donin , G., & Leone, A. (2011). *Gestión de los Recursos Hídricos en América Latina: Análisis de los actores y sus necesidades de desarrollo de capacidades*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de European Commission-Joint Research Centre:
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC66336/lbna24919esn.pdf>
- INEC. (2010). *Censo de población y vivienda*. Quito: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. (2015). *Sistema de soporte a la decisión para la planificación y gestión de recursos hídricos*.
- INVMINEC. (2019). *Monitoreo y determinación de la calidad de agua de la Quebrada Alumbre*.
- Jouravlev, A. (2003). *Los municipios y la gestión de los recursos hídricos*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL):
https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/TEXT/LETTERS/list_cd/lc12003s.pdf
- Loor, Y. (2017). *Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas sector San Juan y San Bartolomé en el área de interceptación con el bosque y vegetación protector Aguarongo*. (Proyecto de pregrado), Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca.

- López, J. L. (2015). *Alternativas de manejo sustentable de la Subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador*. (Tesis de maestría), Universidad Nacional de La Plata, Ibarra.
- Lux, B. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Retrieved from <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/>
- Mancomunidad Trinacional Fronteriza Río Lempa. (2013). *Análisis de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del Río Lempa y residuos de plaguicidas en la producción hortícola. Región Trifinio 2010-2012*. Ocatepeque: CATIE.
- Matovelle, C. (2017). Modelo matemático de calidad de agua aplicado en la microcuenca del río Tabacay. *killkana Tecnica*, 1(1), 39-48.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2020). *Manejo concentrado de Vertientes*. Quito: Registro Oficial.
- Muñoz, H., Suárez, J., Vera, A., Orozco, S., Batle, J., Ortiz, A., & Mendiola, J. (2011). Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Contaminación Ambiental*, 28(1), 1-40.
- Nalesso, M. (2017). *HydroBID: una herramienta para mejorar la gestión y planificación de los recursos hídricos*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de Banco Interamericano de Desarrollo (BID): <https://blogs.iadb.org/agua/es/hydro-bid-una-herramienta-para-mejorar-la-gestion-y-planificacion-de-los-recursos-hidricos/>
- Ordoñez, J. (2011). *¿Qué es una cuenca hidrológica?* Lima: Sociedad Geográfica de Lima. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Paredes, J., Andreu, J., & Solera, A. (2013). *Modelo Gescal para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos*. (Proyecto de Pregrado), Valencia.
- Paredes, J., Andreu, J., & Solera, A. (2015). *Manual de usuario AQUATOOL*. Valencia.
- Pazmiño, G., & Mendieta, R. (2018). *Influencia de dos sistemas de riego en la absorción de arsénico, y el crecimiento y rendimiento de dos variedades de arroz (Oryza sativa) bajo siembra directa e indirecta*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

- Pazmiño, H., & Villamarín, M. (2018). *Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la "Zona B" de Santo Domingo de los Tsáchilas*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Peña, E. (2007). *Oxígeno Disuelto*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Pizarro, R., Cabrera, C., & Morales, C. (2011). Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia global en la producción de agua (1963-2006). *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, 11(3), 519. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v2n3/v2n3a1.pdf>
- Pontón, M. (2018). *Evaluación de la calidad del agua de la microcuenca del río Piñas mediante los índices ICA y BMWP*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Rangel, J. (2014). *Desarrollo de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua en la Presa de Aguamilpa (Nayarit, México)*. Guadalajara: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.
- Ríos, L. (2010). *Indicencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador*. Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1538/1/CD-2721.pdf>
- SENAGUA. (Mayo de 2009). *Delimitación Y Codificación De Unidades Hidrográficas Del Ecuador Escala 1: 250 000*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de Secretaría Nacional del Agua del Ecuador: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/PORTAL/IG/7_delimitacion_codificacion_metodologia_pfafstetter.pdf
- Urgilés, L. (2013). *La comunicación para el desarrollo como estrategia de prevención para reducir la contaminación ambiental del río Ambato*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Urgilez, P. (2016). *Control de calidad de Agua y análisis de sedimentos en la microcuenca del Río Tabacay*. Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca. Retrieved from <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/25959/1/tesis.pdf>

- Verano , C. M., & Mariluz, J. P. (2015). *Metodología para La Implementación de un Sistema de Soporte s las Decisiones Hídricas (Ssd)*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de AGUA Y MÁS - Revista de la Autoridad Nacional del Agua:
<http://190.12.92.167/bitstream/handle/20.500.12543/2350/ANA0001086.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villacrés Rocha, C. E. (2015). *Modelamiento De La Microcuenca Del Río Del Alumbre Con La Utilización Del Modelo Hidrológico Soil And Water Assessment Tool-Swat-, Bolivar*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de Universidad Central Del Ecuador. Tesis De Grado Previa A La Obtención Del Título De Ingeniero Agrónomo:
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7815/1/T-UCE-0004-65.pdf>
- Vintimilla, F. (2014). *Plan de Desarrollo Cantonal y Ordenamiento Territorial de San Gerardo*. Obtenido de sni web site: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660821480001_PLAN%20DE%20DESARROLLO%20Y%20ORDENAMIENTO%20TERRITORIAL%20SAN%20GERARDO%202014-2019_01-07-2016_18-39-14.pdf
- Wambeke, J. V. (2015). *La Microcuenca Hidrográfica como ámbito de planificación del uso y manejo de los recursos naturales, enfoque Socio-Territorial*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe:
http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/recnat/micro.htm
- Washington, R., Sandoval, E., & Aguilera, E. (2014, Octubre). Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica. *Revista Ciencia UNEMI*, 102. Retrieved from file:///C:/Users/andre/Downloads/Dialnet-DeterminacionDeCaudalesEnCuencasConPocoInformacion-5210356.pdf
- Zury, W. (2004). *Manual de planificación y gestión participativa de cuencas y microcuencas*. Quito.

ANEXOS

Anexo 1. Toma de Muestras (Trabajo de Campo)





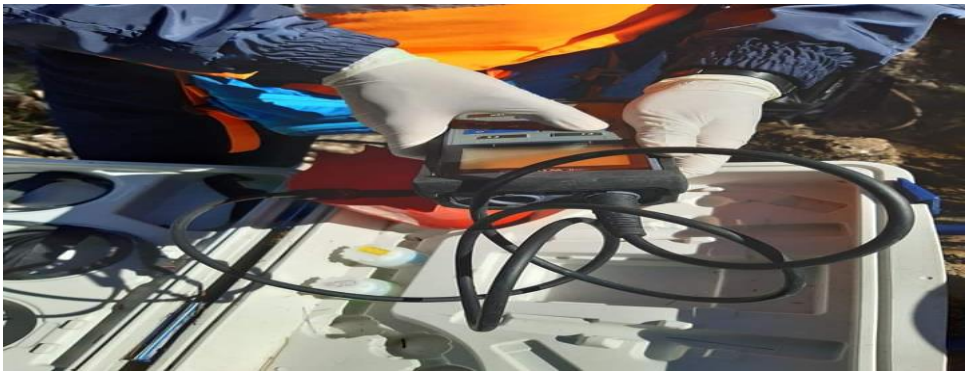


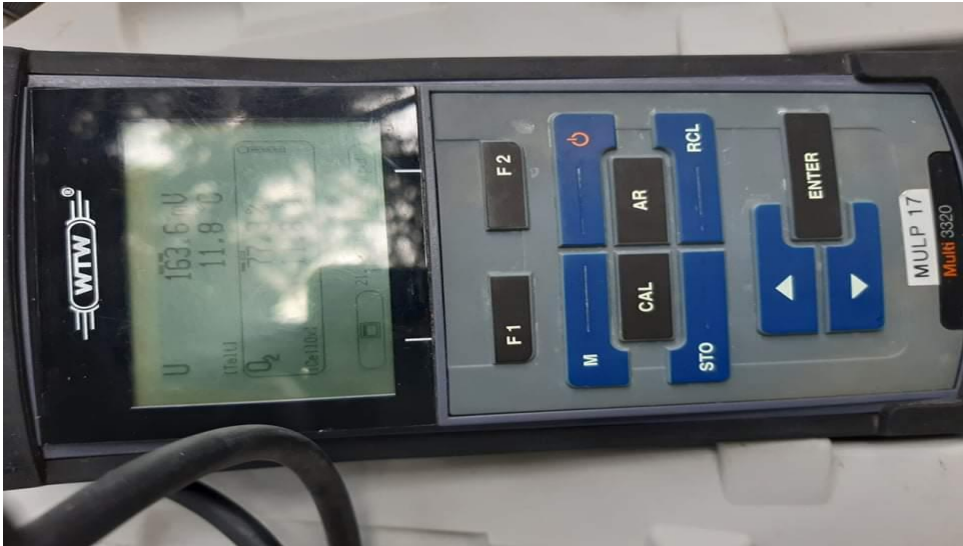






Anexo 2. Instrumentos utilizados





Anexo 3. Resultados obtenidos

GRUNEX

REGISTRO DE CAMPO - AGUA

EMPRESA:
 TÉCNICO:
 VERIFICACIÓN DE EQUIPOS Y DUPLICADOS

CONDICIONES AMBIENTALES:
 Hora:
 Equipo:
 Estándar / Unidades:
 Duplicado / Unidades:
 Observaciones:

MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

ID Muestra	Fecha	Hora	Coordenadas	Parámetro				Observaciones				
				pH	Conduc. (µS/cm)	Temp. (°C)	Temp. corregida (°C)		Oxígeno disuelto (mg/l - %)	Turbidez (NTU)	Cloro residual libre (mg/L)	Cloro residual Total (mg/L)
CSM - Ay Run	01/01/20	09:15	6 4 7 2 70 96 55 2 12	7.52	189 817	17.6	72.9	5.21	91.7	5.18	Agua turbia	2942

Rev. 1.0

GRUNEX

REGISTRO DE CAMPO - AGUA

EMPRESA:
 TÉCNICO:
 VERIFICACIÓN DE EQUIPOS Y DUPLICADOS

CONDICIONES AMBIENTALES:
 Hora:
 Equipo:
 Estándar / Unidades:
 Duplicado / Unidades:
 Observaciones:

MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

ID Muestra	Fecha	Hora	Coordenadas	Parámetro				Observaciones				
				pH	Conduc. (µS/cm)	Temp. (°C)	Temp. corregida (°C)		Oxígeno disuelto (mg/l - %)	Turbidez (NTU)	Cloro residual libre (mg/L)	Cloro residual Total (mg/L)
CSM - Ay Run	01/01/20	09:15	6 4 7 2 70 96 55 2 12	7.52	189 817	17.6	72.9	5.21	91.7	5.18	Agua turbia	2942

REGISTRO DE CAMPO - AGUA														
EMPRESA:			TÉCNICO:						GRUPO:					
CONDICIONES AMBIENTALES			VERIFICACIÓN DE EQUIPOS Y DUPLICADOS											
Hora			Equipo			Estándar / Unidades			Observaciones					
01:00			C.F.P.											
MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO														
ID Muestra	Fecha	Hora	Coordenadas	Parámetro								Observaciones		
				pH	Conduct. (µS/cm)	Temper. (°C)	Temper. (°F)	Óxígeno disuelto (mg/L)	Turbidez (NTU)	Cloro residual libre (mg/L)	Cloro residual total (mg/L)			
COM - Ag. Roca	01/01/20	08:12	8.9 9.2 N 76 52.2 W	7.8	245	12.5	53.5	0.2	0.2					
CA 1	01/01/20	08:15	8.9 9.2 N 76 52.2 W	7.8	245	12.5	53.5	0.2	0.2					
MAD - DA	"	08:20	8.9 9.2 N 76 52.2 W	7.8	245	12.5	53.5	0.2	0.2					





**PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO
INSTITUCIONAL**

Yo, **Juan Leonardo Quirindumbay Criollo** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0105587760. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PARTE ALTA MEDIA Y BAJA DE LA MICROCUENCA CRISTAL ALUMBRE**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 02 de enero de 2021

F:

Juan Leonardo Quirindumbay Criollo

C.I. 0105587760