

**Análisis del efecto de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua superficial en el
páramo de Berlín (Santander-Colombia) en época seca.**

Viviana Andrea Gómez Bonilla

Juan Manuel Sebastián Quintero Prada

Proyecto de grado para optar al título de Ingenieros Civiles

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental

Co-directora

Daniela Cristina Rey Romero

MSc. Planificación y desarrollo de recursos hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mi madre, por su esfuerzo, amor y confianza.

A mi padre, por sus palabras de aliento.

A mis hermanas por su apoyo.

A mi sobrino, por las risas que brindo en mí.

Cada paso en mi formación universitaria fue pensado en ellos, mi mayor inspiración.

Mi amor y gratitud por siempre.

Viviana Andrea Gómez Bonilla

A mis padres, su voto de confianza, su apoyo en cada aspecto de la vida y su amor
incalculable e inefable.

A mis hermanas, mis pilares de felicidad e inspiración.

A Amparito, su amor de madre, su preocupación, su calma y su hombro que en tantas
ocasiones necesité y ahí estuvo.

A Simón, un amor que trascendió lo humano y se convirtió en el mejor compañero en
cada situación.

A Carlos, las discusiones que fortalecieron y los momentos en los que no me dejó
caer, Jerry y Sherley, dos seres que me enseñaron, me motivaron y me hicieron crecer.

A aquellos que estuvieron durante todos los momentos, buenos y malos, ayudándome
a formar como una gran persona.

Al Amor, que me trajo lo más puro, incierto e intenso.

Agradezco a mis profesores, tanto los que me formaron como aquellos que se
salieron de la academia.

Agradezco al Grupo de investigación y nuestros compañeros que apoyaron en el
desarrollo del proyecto.

A mi director Edgar Ricardo Oviedo.

A mi codirectora Daniela Rey, agradecimiento especial por su inspiradora forma de
transmitir, corregir y formar.

Juan Manuel Sebastián Quintero

Agradecimientos

Este logro en mi vida es gracias a las personas que participaron en mi formación universitaria:

A mi director Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, por la orientación en el desarrollo del proyecto.

A mi codirectora Daniela Cristina Rey Romero, por su especial forma de transmitir conocimiento, por el apoyo y la orientación durante el proyecto.

Al grupo de investigación Saneamiento y Recursos Hídricos Ambiental (GPH), por brindarme la oportunidad de ser parte de este proyecto.

A los compañeros que nos apoyaron en la campaña de muestreo, sin ellos no hubiésemos culminado este proyecto.

A mis profesores, por la formación brindada durante mi progreso universitario.

A mis amigos especialmente a Yeny, Brayan, Ricardo, Fabian, por los momentos de estudio, las risas y los constantes deseos de seguir aprendiendo.

A las personas que directa o indirectamente fueron parte en mi desarrollo integral en la universidad.

A mi madre, por impulsarme a ser mejor en cada reto, por convertirse en mi mayor inspiración, mi profesora, mi guía y amiga.

A mi padre y mis hermanas por la motivación y el apoyo constante.

Este logro es uno de los muchos que serán dedicados a cada uno de ellos que cree y confía en mí, y aquellos que me brindan la oportunidad para obtener cada triunfo propuesto.

Viviana Andrea Gómez Bonilla

Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Marco conceptual	20
1.1 Contaminación agrícola del agua por fuentes no localizadas.	20
1.2 Enfoque de Monitoreo: Cuencas Pareadas.....	22
1.3 Enfoque de Monitoreo Aguas arriba-Aguas abajo.....	23
1.4 Índices de calidad y contaminación	24
2. Metodología	26
2.1 Descripción del área de estudio	26
2.2 Monitoreo de calidad del agua	28
2.2.1 Campaña de muestreo.	29
2.2.2 Protocolo de análisis bacteriológico.	30
2.3 Análisis estadístico.....	30
3. Resultados y Discusión	31
3.1 Parámetros <i>In situ</i>	31
3.1.1 Caudales.	31
3.1.2 pH.....	32
3.1.3 Conductividad eléctrica.....	33
3.3 Análisis de calidad de agua bajo enfoque de Cuencas Pareadas.....	34
3.3.1 Nutrientes	34

3.3.1.1 Nitrógeno orgánico.	34
3.3.1.2 Nitrógeno amoniacal.	35
3.3.1.3 Nitritos.	35
3.3.1.4 Nitratos.	35
3.3.1.5 Fósforo reactivo total.	36
3.3.1.6 Fósforo total.	37
3.3.2 Sales	38
3.3.2.1 Sólidos disueltos totales (SDT).	38
3.3.2.2 Conductividad eléctrica.	38
3.3.2.3 Dureza.	38
3.3.2.4 Alcalinidad total.	40
3.3.2.5 Potasio.	40
3.3.3 Materia orgánica	41
3.3.3.1 Oxígeno disuelto (OD).	41
3.3.3.2 Porcentaje de saturación de oxígeno.	42
3.3.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).	43
3.3.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO).	43
3.3.4 Sedimentos	44
3.3.4.1 Turbiedad.	44
3.3.4.2 Sólidos suspendidos.	44
3.3.4.3 Sólidos totales.	45
3.3.5 Patógenos	46
3.3.5.1 E. coli.	46

3.4 Índices de calidad y contaminación	47
3.5 Análisis de calidad del agua bajo el enfoque Aguas arriba-Aguas abajo	49
3.5.1 Nutrientes.	49
3.5.2 Sales.	50
3.5.3 Materia orgánica.	52
3.5.4 Sedimentos.	53
3.5.5 Patógenos.	54
3.6 Índices de calidad.....	58
4. Conclusiones	61
Referencias Bibliográficas	63
Apéndices.....	69

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Localización geográfica del área de estudio. El curso del flujo tiene dirección norte. Los mapas adyacentes muestran la localización geográfica a nivel departamental y nacional. ...	27
<i>Figura 2.</i> Valores promedio de concentración de nutrientes.	37
<i>Figura 3.</i> Valores promedio de parametros asociados a las sales.	40
<i>Figura 4.</i> Valores promedio asociados a la materia orgánica.	43
<i>Figura 5.</i> Valores promedios asociados a los sedimentos	46
<i>Figura 6.</i> Valores promedio de E. coli, evaluados en el laboratorio de hidráulica de la Universidad industrial de Santander	47
<i>Figura 7.</i> Variación de carga asociada a nutrientes a lo largo del cauce. A) Variación de carga de nitrógeno orgánico. B) Variación de carga de nitrógeno amoniacal. C) Variación de carga de nitratos. D) Variación de carga de nitritos. E) Variación de carga de fósforo reactivo total. F) Variación de carga de fósforo total.	55
<i>Figura 8.</i> Variación de carga asociada a sales a lo largo del cauce. A) Variación de carga de SDT. B) Variación de concentración de conductividad eléctrica. C) Variación de carga de Alcalinidad. D) Variación de carga de dureza total. E) Variación de carga de potasio total.	56
<i>Figura 9.</i> Variación de carga asociada a materia orgánica a lo largo del cauce. A) Variación de concentración de OD. B) Variación de concentración de porcentaje de saturación de OD. C) Variación de carga de DBO ₅ . D) Variación de carga de DQO.	57

Figura 10 Variación de carga asociada a sedimentos a lo largo del cauce. A) Variación de carga de SST. B) Variación de carga de ST. C) Variación de concentración de turbiedad. 58

Figura 11. Variación de E. coli a lo largo del cauce..... 58

Figura 12. Variación del índice de calidad ISQA a lo largo del cauce. 59

Figura 13. Variación del índice de calidad ICA-IDEAM a lo largo del cauce. 59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Puntos de muestreo para análisis de calidad de agua.</i>	28

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Imágenes de enfoques de monitoreos cuencas pareadas y Aguas arriba-Aguas bajo.....	69
Apéndice B Ecuación de referencia para calcular Índice simplificado de calidad del agua (ISQA).....	70
Apéndice C Ecuación de referencia para calcular Índice de calidad del agua ICA-IDEAM	73
Apéndice D Ecuaciones de referencia para calcular índices de contaminación	76
Apéndice E Parámetros analizados	78
Apéndice F Imágenes campaña de muestreo y monitoreo, páramo de Berlín, febrero 2020	80
Apéndice G Rango de valores de los caudales obtenidos para cada punto, campaña de febrero 2020.....	85
Apéndice H Grafica de caudales registrados para cada punto de muestreo.....	86
Apéndice I Graficas de precipitación y conductividad eléctrica evaluadas en el área de estudio, campaña febrero 2020.....	89
Apéndice J Grafica de variación de pH en todos los puntos de muestreo, campaña febrero 2020	90
Apéndice K Graficas de CE.....	92
Apéndice L. Grafica de variación de conductividad eléctrica en todos los puntos de muestreo, campaña febrero 2020.....	93
Apéndice L Resultados de parámetros en el laboratorio.....	94

Apéndice M Resultados de parámetros <i>in-situ</i> y obtenidos en el GPH-UIS.....	95
Apéndice N Rangos de referencia para consumo y riego	96
Apéndice O Resultados ICAs e ICOs	97

Resumen

Título: Análisis del efecto de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua superficial en el páramo de Berlín (Santander-Colombia) en época seca.*

Autores: Viviana Andrea Gómez Bonilla
Juan Manuel Sebastián Quintero Prada**

Palabras Clave: Agricultura, Páramo, cuencas pareadas, carga contaminante, Aguas arriba-Aguas abajo, índice de calidad del agua, índice de contaminación del agua.

Los sistemas agrícolas en ecosistemas de páramo crecen de manera acelerada, provocando incremento de contaminación no localizada sobre el agua alterando las condiciones naturales de ecosistemas lóticos o cauces superficiales. En este estudio se analizó el efecto de las actividades agrícolas sobre la calidad de agua superficial en un ecosistema de páramo (caso de estudio: Páramo de Berlín, Santander) para tal efecto se seleccionaron dos unidades hidrográficas (UH) objeto de estudio (una intervenida con agricultura y otra sin intervención) y se empleó el enfoque de monitoreo de cuencas pareadas para la evaluación de la calidad del agua. El estudio también consideró metodológicamente el concepto de carga contaminante y el enfoque aguas arriba-aguas abajo para mostrar la variación de la calidad a lo largo del cauce. Por lo tanto, se seleccionaron cuatro puntos de monitoreo en cada UH; uno al nacimiento de la fuente superficial y otro al cierre de las dos UH y dos puntos más, en la confluencia de las UH y aguas abajo de la confluencia. Se analizaron veinte parámetros fisicoquímicos y uno microbiológico, durante tres días en época seca. Además, se consideraron Índices de Calidad del Agua (ICAs) e Índices de Contaminación (ICOs). Los resultados mostraron diferencias en las dos UH en parámetros como nitratos, fosfatos, dureza, Conductividad eléctrica y *E. coli*, lo que determina la afectación de la calidad del agua debido a las prácticas agrícolas con presencia de ganado. A su vez, mostró un incremento de carga de los nutrientes, los sedimentos, la materia orgánica y los patógenos aguas abajo de la confluencia de las UH producto del uso de fertilizantes y de las prácticas agrícolas convencionales empleadas. Sin embargo, la evaluación de calidad del agua mediante ICAs e ICOs reflejaron una calidad de agua buena o excelente para todos los puntos de muestreo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director

Abstract

Title: Analysis of the effect of agricultural activities on the quality of surface water in the paramo of Berlin (Santander-Colombia) in the dry season.*

Authors: Viviana Andrea Gómez Bonilla
Juan Manuel Sebastián Quintero Prada**

Keywords: Agriculture, Páramo, paired basins, pollution load, above/below station, water quality index, water contamination index.

Agricultural systems in a paramo ecosystem grow rapidly, causing an increase of non-point pollution, which alters the natural conditions of lotic ecosystems or surface flow. This study analyzed the effects of agricultural activities on surface water in a paramo ecosystem (case study: Páramo de Berlin); for this purpose, two hydrographic units (UH) were selected (one with agricultural intervention and the other one without intervention) and the paired catchment analysis was used to assess the water quality. Also, the study considered methodologically the concept of pollutant load and the upstream/downstream monitoring approach to show the variation of water quality along the stream bed. Therefore, four sampling points were selected in both UH; one in the water source and the other at the end of both UH and the remaining two in the confluence of both UH and downstream the confluence. Twenty physicochemical parameters and one microbiological were analyzed during three days in dry season. Furthermore, Water Quality Index (ICA) and Water Contamination Index (ICO) were considered. The results show differences between the two UH in parameters like nitrates, phosphates, hardness, Electrical Conductivity and *E.coli*, which determines the impact on water quality due to agricultural practices with the presence of livestock. In turn, it showed an increase in the load of nutrients, sediments, organic matter and pathogens downstream from the confluence of the UH due to the use of fertilizers and conventional agricultural practices. However, water quality assessment using ICAs and ICOs reflected good or excellent water quality for all sampling points.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director

Introducción

El páramo se puede definir como un ecosistema de alta montaña, localizado entre el límite superior del bosque andino y el límite inferior de los glaciares (REDACCIÓN MEDIOAMBIENTE, 2016) que se caracteriza por tener suelos con alto contenido de humedad y coberturas predominantes de pastizales. Su altitud generalmente oscila entre los 3000 y 5000 m.s.n.m (Buytaert et al., 2006). Los páramos crean un ambiente único y son considerados ecosistemas de transición debido a la combinación entre la altura y su ubicación tropical, encontrándose una variación estacional climática diaria, lo cual hace que su biodiversidad sea endémica y requiera de unas condiciones específicas para su supervivencia (Mena-Vásquez & Farley, 2019).

Los páramos son los principales reguladores de agua principalmente en las regiones de Centroamérica y Suramérica (Buytaert et al., 2006)(Buytaert et al., 2007), transformando la neblina en recurso hídrico precipitándose sobre la vegetación e infiltrándose en sus capas subsuperficiales y subterráneas hasta encontrar una salida estable para ser expulsada, generando el nacimiento de lagos y ríos (REDACCIÓN MEDIOAMBIENTE, 2016). Además de ello, ofrecen otros beneficios para los demás ecosistemas al retener el carbono en su suelo (Buytaert et al., 2007).

En Colombia, la cordillera oriental concentra la mayor superficie general de páramos (REDACCIÓN MEDIOAMBIENTE, 2016). Asimismo, es el país que posee la mayor extensión de los páramos existentes en el mundo (REDACCIÓN MEDIOAMBIENTE, 2016) y dentro de estos se encuentra el páramo de Berlín, ubicado al nororiente del departamento de Santander y suroccidente del departamento de Norte de Santander (Madriñán et al., 2013).

Los territorios en zona de páramo a lo largo de los años han sido poblados por agricultores que encuentran en sus suelos condiciones ideales para cultivar o pastorear ganado y el Páramo de Berlín, no es la excepción al constituirse el cultivo de cebolla junca (*Allium fistulosum* L) dentro de las principales actividades económicas. Sin embargo, las actividades realizadas para la adecuación de suelos para uso agrícola, el cambio de cobertura natural y los productos usados para mantener los cultivos, ocasionan efectos negativos en el suelo (Estupiñán et al., 2009), así como en la calidad del agua y su ciclo (Buytaert et al., 2006) a causa de la pérdida de condiciones naturales y la descarga de contaminantes y sedimentos en las aguas superficiales y/o subterráneas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55, 1997).

La calidad del agua depende fundamentalmente de las características de la unidad hidrográfica (UH), especialmente de los suelos y de la geología, pero la actividad antrópica es la más influyente en su afectación. La intensa actividad agrícola, ganadera y la urbanización presente determinan la alteración de diversos parámetros físicos, químicos y microbiológicos que son usados para evaluar la calidad del agua (Buytaert et al., 2006). Este estudio analiza los efectos de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua del páramo de Berlín en época seca. Para ello, comparando la calidad del agua de dos unidades hidrográficas UH mediante el enfoque de monitoreo de cuencas pareadas y a su vez, determinando la variación de la calidad del agua de la UH intervenida mediante el enfoque de monitoreo aguas arriba-aguas abajo. Por otra parte, se buscará asociar estos parámetros utilizando índices evaluativos de calidad y contaminación. Este trabajo de grado se realizó en el marco del proyecto de investigación titulado “Análisis Participativo de la influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos de Suministro y Regulación Ofertados por el

Ecosistema de Páramo Seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander-Colombia)”, que actualmente desarrolla el GPH, CEMOS y GPAD de la Universidad Industrial de Santander.

1. Marco conceptual

1.1 Contaminación agrícola del agua por fuentes no localizadas.

Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55, 1997), la contaminación por fuentes no localizadas, anteriormente conocida como contaminación difusa del agua, corresponde a aquellas descargas contaminantes que no tienen un punto claro de ingreso en las fuentes hídricas. Por ello, toda práctica agrícola se considera una fuente de contaminación no localizada pues presenta dificultades para el control directo. Si bien las industrias y los centros urbanos aportan cantidades significativas de residuos contaminantes al agua, la agricultura se considera la mayor fuente de contaminación hídrica a nivel mundial (FAO and IWMI, 2018). El riego procedente de los cultivos es el mayor volumen de agua residual que es liberado hacia el medio ambiente y, como consecuencia, la agricultura es responsable de descargas significativas de agroquímicos, materia orgánica, metales pesados, sedimentos y drenaje salino en los cuerpos de agua. La contaminación del agua resultante plantea riesgos demostrados para los ecosistemas acuáticos, la salud humana y la actividad productiva (Doetterl et al., 2012). El pastoreo a su vez emite toneladas de residuos fecales y por consiguiente contaminantes microbiológicos patógenos que son transportados a través de la

escorrentía, el agua de riego, o por infiltración en agua subsuperficial, lo cual resulta perjudicial para la salud de los ecosistemas acuáticos. Estos residuos patógenos, están asociados a infecciones zoonóticas alrededor del mundo (FAO and IWMI, 2018).

Por otro lado, el uso de pesticidas, fertilizantes y otros insumos sintéticos elevan las concentraciones de contaminantes químicos como los nitratos y fosfatos procedentes de estos (FAO and IWMI, 2018) y esas alteraciones pueden transformarse desde pequeños cambios al sistema natural hasta graves trastornos del ciclo biológico del ecosistema. También es importante resaltar que el uso inadecuado de fertilizantes es una de las principales causas de la eutrofización e hipoxia de los cuerpos de agua debido a los nutrientes principalmente en forma de nitratos, nitritos, potasio y fosfatos (FAO and IWMI, 2018).

En cuanto a los sedimentos producidos por el arado y la labranza, se ha demostrado que estos transportan fosfatos causando pérdida de hábitat y desovaderos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55, 1997). A su vez los altos niveles de turbidez producidos por los sedimentos, limitan la penetración de la luz solar en el cuerpo de agua, lo que restringe o impide el crecimiento de las algas y de las plantas acuáticas enraizadas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55, 1997).

Complementariamente, el acondicionamiento constante de los terrenos altera la salinidad del suelo al desprender sales y minerales inherentes a la geología lo que incrementa drásticamente la salinidad de los cuerpos de agua receptores de estos residuos una vez son descargados en ellos. El agua salinizada puede aumentar potencialmente la liberación de nitrógeno, fósforo y sílice del suelo natural hacia el agua lo que interrumpe los procesos naturales como la desnitrificación, reduce la capacidad de almacenar de carbono e incrementa la mineralización de este y causa un

aumento en generación de compuestos de azufre que son tóxicos para plantas y animales (FAO and IWMI, 2018).

1.2 Enfoque de Monitoreo: Cuencas Pareadas

El estudio de cuencas pareadas usualmente es utilizado para evaluar y cuantificar los efectos de las prácticas de gestión sobre la cantidad y calidad de agua (Dressing & Meals, 2005). El enfoque básico requiere mínimo de dos unidades hidrográficas: una de “control” y otra de “estudio”, en dos periodos: “calibración” (pretratamiento) y “tratamiento” (postratamiento), (ver Figura A1-Apéndice A) (United States Environmental Protection Agency EPA, 1993). Durante el período de calibración se recolectan datos de las dos unidades hidrográficas tratándolas de forma idéntica. Estos datos podrían ser medidos de forma anual, mensual, semanal o en eventos más cortos, dependiendo del objetivo de dicho estudio (Dressing & Meals, 2005). El período de tratamiento consiste en implementar una “mejor práctica de manejo” (BMP, por sus siglas en inglés) en la cuenca de estudio (United States Environmental Protection Agency EPA, 1993) . El objetivo principal del estudio de cuencas pareadas es que exista una confiabilidad de los datos de calidad del agua, controlando los efectos de variación hidrológica y climática, permitiendo una clara atribución de la gestión implementada en la unidad tratada (Dressing & Meals, 2005), (United States Environmental Protection Agency EPA, 1993). Aunque el enfoque de monitoreo de cuencas pareadas emplea dos períodos para su realización, existen estudios donde se emplea solo el período de calibración, con el propósito de cuantificar el efecto de la implementación de sistemas agrícolas en vegetación nativa (Elledge & Thornton, 2017), (Rodrigues et al., 2018), (Kändler et al., 2017), y/o en escorrentía superficial(Taniwaki et al., 2017).

En este estudio se empleó la etapa de la calibración, en dos UH con características similares con el propósito de evaluar y cuantificar los efectos de sistemas agrícolas como la cebolla junca sobre la calidad del agua empleados en el páramo de Berlín.

1.3 Enfoque de Monitoreo Aguas arriba-Aguas abajo

El enfoque de monitoreo Aguas arriba-Aguas abajo fue desarrollado por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos NRCS-USDA, con el fin de estudiar los efectos que tiene un determinado uso del suelo sobre una unidad hidrográfica. Este enfoque es usado en una única cuenca con monitoreo en un punto en el curso antes de que el cauce atraviese la zona de actividad agrícola y otro inmediatamente en el punto en que el cauce ha finalizado el paso por esta zona (Natural Resources Conservation Service U.S.A Department of agriculture, 2003), como se muestra en Figura A2- Apéndice A. En la mayoría de los casos (aunque esto puede ser erróneo) se considera que la estación de monitoreo aguas arriba se considera que la estación de monitoreo aguas arriba se considera que la estación de monitoreo aguas arriba representa la calidad intacta del agua y la de abajo la influenciada por determinadas actividades agrícolas (Natural Resources Conservation Service U.S.A Department of agriculture, 2003). A través de este enfoque es posible concluir sobre los cambios en la calidad del agua que son debidos al tipo de intervención que se tiene entre puntos de muestreo (Dressing & Meals, 2005). Esta técnica es ampliamente usada debido a que permite el análisis espacial y temporal del curso de agua, detectando zonas de descarga contaminante y facilitando el registro de la evolución de la calidad del agua. Sin embargo, una de las principales desventajas de este método es que los resultados en la estación aguas abajo, no registra datos independientes, ya que

se ha demostrado que es función de las concentraciones aguas arriba, así como también sus resultados pueden verse afectados directamente por las condiciones geológicas de los suelos de la cuenca (Natural Resources Conservation Service U.S.A Department of agriculture, 2003).

El enfoque Aguas arriba-Aguas abajo fue manejado a través del concepto de carga contaminante. La carga de contaminantes es la masa o el peso del contaminante que pasa una sección transversal del río en un período de tiempo específico. Las cargas se expresan en unidades de masa (p. Ej., Toneladas, kilogramos) (Richards, 1998). El flujo de esta carga es el concepto en sí mismo, es la velocidad a la que la carga está pasando un punto de referencia llamada estación de muestreo (Richards, 1998) y tiene unidades de masa / tiempo. Se calcula una vez son obtenidos los datos de concentración de los parámetros aplicando la siguiente ecuación:

$$Carga = k * c * Q \quad [1]$$

Donde

Carga= Carga contaminante instantánea [kg/día]

K=factor de conversión de unidad. K=0.0864

c= concentración del parámetro estudiado [mg/L]

Q= Caudal del punto estudiado [L/s]

1.4 Índices de calidad y contaminación

El índice general de calidad del agua (ICA) fue desarrollado en 1970 para los primeros monitoreos realizados por agencias estatales de los Estados Unidos (Eugenia et al., 2007).

En España el índice de calidad del agua se formuló a partir del Índice de Lomantange y Provencher del estado de Québec (Canadá) (Eugenia et al., 2007), y fue modificado generando el

Índice simplificado de Calidad del Agua (ISQA) para el año 1982(Raxhón, 2015). Este método utiliza cinco parámetros físicos y químicos de tipo general, como son la temperatura, DQO, los sólidos suspendidos totales, el oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica como se muestra en las ecuaciones de referencia del Apéndice B.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (IDEAM, 2011) adoptó la metodología Universal Water Quality Index UWQI (Caho-Rodríguez & López-Barrera, 2017), con el cual es posible calcular el índice específicamente para corrientes superficiales involucrando 5 o 6 parámetros como se observa en el Apéndice C. Los valores calculados del indicador se comparan con los establecidos en tablas de interpretación permitiéndose clasificar la calidad del agua de forma cualitativa en una de cinco categorías (buena, aceptable, regular, mala o muy mala) que a su vez se asocian a un determinado color (azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente). Esta escala de color es replicada por todos los índices.

La concentración de cada una de las variables involucradas en el cálculo de este ICA fue monitoreada en un total de 90 corrientes superficiales(IDEAM, 2011). Estas variables o parámetros son: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica y pH total. El nitrógeno total y fósforo total se estableció como variante en el cálculo según la disponibilidad de parámetros del muestreo.

Asimismo, en Colombia se desarrolló una metodología de Índices de contaminación los cuales durante los últimos años han sido aplicados principalmente a aguas que reciben efluentes de la industria petrolera (Ramírez et al., 1997). Estos índices a su vez, permiten en una escala de 0 a 1, determinar qué tanta contaminación posee el cuerpo de agua a partir de la asociación de distintos parámetros; se agrupan correspondientemente de acuerdo a su aporte contaminante al agua y cada uno se calcula como se muestra en las ecuaciones de referencia del Apéndice D.

2. Metodología

2.1 Descripción del área de estudio

El proyecto fue realizado en el páramo de Berlín, ubicado, como se muestra en la Figura 1, al nororiente colombiano, en el departamento de Santander aproximadamente a 60 kilómetros de su capital Bucaramanga. A nivel general, actualmente el suelo del área del Páramo de Berlín se encuentra en uso de vegetación natural de páramo (correspondientes pajonales, herbáceas de páramos y arbustos) (Restrepo et al., 2008). Esta zona se ubica a una altitud que oscila entre los 3300 msnm y 3650 msnm con una precipitación medida entre los meses de noviembre y febrero de los años 2019 y 2020 de 505mm y que registró una temperatura diaria para el mes de febrero de 2020 que varió de 7°C a 10°C (Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental GPH-UIS, 2020).

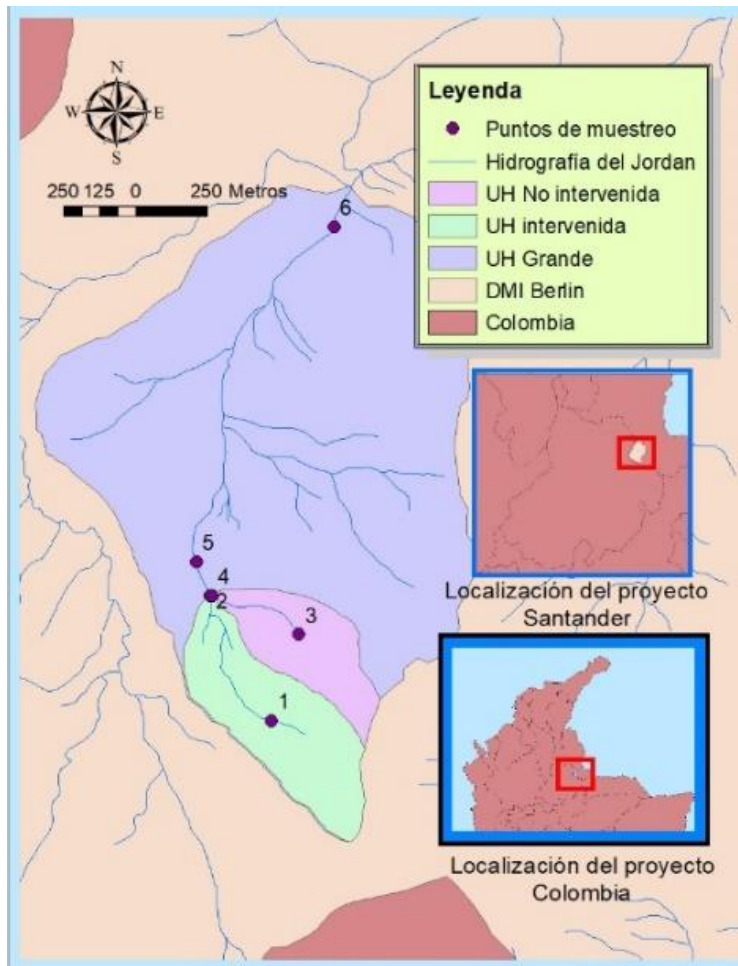


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. El curso del flujo tiene dirección norte. Los mapas adyacentes muestran la localización geográfica a nivel departamental y nacional.

Para el desarrollo del proyecto se establecieron seis puntos de muestreo descritos en la Tabla 1, cuatro de estos puntos se ubican en dos UH previamente seleccionadas por el grupo de investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental GPH-UIS el cual caracterizó cada una por medio de análisis del uso de suelo a través de imágenes satelitales como intervenida y no intervenida. Los dos puntos restantes, se encuentran en la UH de orden superior con un área de drenaje aproximada de 215 Ha que hace parte de la cuenca alta del Río Jordán, tributario del Río Chitagá. La unidad hidrográfica intervenida tiene un área de 23.8 Ha la cual posee en su cobertura

de suelo terreno cultivado de papa y cebolla junca, mientras que la no intervenida, que cuenta con un área aproximada de 15 Ha, posee vegetación natural del páramo. Para determinar la variación de la calidad se tomó el punto inicial la naciente de la UH intervenida y el final como el punto aguas abajo, aproximadamente en el cierre de la UH de orden superior. Durante este trayecto se observó que el uso de los suelos aledaños al cauce es principalmente para múltiples campos agrícolas de cebolla junca y papa (*Solanum tuberosum*).

Tabla 1.

Puntos de muestreo para análisis de calidad de agua.

Puntos de muestreo	Descripción	Altitud [msnm]
1	Naciente de la unidad hidrográfica intervenida	3508
2	Cierre de la unidad hidrográfica intervenida	3419
3	Naciente de la unidad hidrográfica no intervenida	3500
4	Cierre de la unidad hidrográfica no intervenida	3422
5	Confluencia de las dos unidades hidrográficas	3418
6	Aguas abajo de la confluencia	3384

2.2 Monitoreo de calidad del agua

El protocolo de monitoreo y muestreo utilizado en este estudio, fue adaptado del documento técnico del IDEAM (IDEAM et al., 2017). En primer lugar, se realizó un recorrido por el área de estudio para reconocimiento y acondicionamiento de los puntos de muestreo, los cuales fueron definidos meses atrás por el grupo de investigación GPH-UIS. Dado que el alcance del monitoreo abarcaba solamente el agua superficial, se prosiguió a definir los métodos de aforo, midiendo los caudales en cada estación. En los puntos de muestreo donde presentaron caudales bajos (< 5 L/s), el aforo se realizó mediante el método volumétrico, estos puntos correspondieron a las nacientes

(puntos 1 y 3) y cierres de las dos unidades hidrográficas (puntos 2 y 4) y su punto de confluencia (punto 5). En la estación aguas abajo de la confluencia (punto 6), se encontró un cauce con ancho de 114 cm, de sección transversal no homogénea, con profundidad del agua menor a 1 metro y velocidad horizontal en toda la sección transversal, por lo tanto, se aforó mediante el método de área-velocidad utilizando un medidor magnético marca HACH.

Determinados los métodos de aforo, se definieron los parámetros a analizar con base en la posible carga contaminante aportada por los insumos empleados en el área agrícola de estudio. Se seleccionaron 20 parámetros, (4 se analizaron *in situ* y 18 en laboratorio). Estos parámetros se analizaron siguiendo los métodos estandarizados de APHA-AWWA-WPCF para análisis de calidad del agua (ver Apéndice E).

2.2.1 Campaña de muestreo. La campaña de monitoreo se realizó en la primera época seca de 2020, durante tres días (21, 24 y 27 de febrero). Cada día se tomaron muestras compuestas en cada punto, lo cual abarcó jornadas de 6 horas aproximadamente, iniciando a las 8:00 a.m., período durante el cual se realizaron aforos, se tomaron las respectivas alícuotas y mediciones *in situ* cada media hora. Las variables *in situ* (pH, conductividad eléctrica y temperatura) se midieron con equipos portátiles multiparamétricos de marca Mettler Toledo. Para medir el oxígeno disuelto (OD) y el porcentaje de saturación de oxígeno se utilizó un oxímetro portátil marca Mettler Toledo. Debido a que para el análisis de algunos parámetros se requería muestras puntuales, éstas fueron tomadas al final de la jornada. Todas las muestras fueron almacenadas y preservadas siguiendo los protocolos del IDEAM (IDEAM et al., 2017), se mantuvieron refrigeradas a menos de 4°C para no alterar las condiciones naturales de las muestras, y se trasladaron a la brevedad posible al

laboratorio SIAMA S.A.S., en la ciudad de Bucaramanga, y al Laboratorio de Hidráulica de la UIS para su procesamiento (ver Apéndice F).

2.2.2 Protocolo de análisis bacteriológico. El estudio bacteriológico de *E. coli.*, se realizó siguiendo el método de filtración por membrana en agar Chromocult® de Merck, y tomando como referencia el protocolo del IDEAM(Navarro, 2007). Con las indicaciones mencionadas en el documento técnico, se dispusieron las membranas con el medio de cultivo en las cajas Petri (esterilizadas previamente) y se filtraron las muestras utilizando bombas de vacío en recipientes esterilizados con metanol. Las membranas sembradas se incubaron las cajas Petri en posición invertida a 36°C durante 24 horas, pasado este tiempo se leyeron el número de unidades formadoras de colonias resultantes. El procedimiento se realizó por duplicado para cada punto de muestreo, y en algunos casos, según la turbiedad y concentración potencial, fue necesario diluir la muestra con solución salina estéril (ver Figura F6-Apéndice F).

2.3 Análisis estadístico

La metodología estadística aplicada para el caso de estudio se hizo a partir de estadística descriptiva: percentiles, rangos, medias, medianas, además de correlaciones y análisis gráfico para las muestras obtenidas.

Los gráficos de barras de error se usaron para observar la variabilidad de los datos e indicar el error (o incertidumbre) en los parámetros comparados. Las barras de error ayudan a determinar si las diferencias son significativas estadísticamente.

3. Resultados y Discusión

3.1 Parámetros *In situ*

3.1.1 Caudales. La variación de caudales para los tres días de muestreo se representa en el Apéndice G, por medio de gráficos de boxplots. Se observa que la variación de los caudales durante el mismo día por cada punto de muestreo no es significativa, de allí que las cajas en los gráficos sean tan estrechas. El último punto manejó volúmenes superiores, sujeto a usos del agua por los pobladores, que pueden influenciar la variación de sus datos por extracciones y posibles vertimientos.

Estos datos, junto con los gráficos de caudal del Figura F1-Apéndice H fueron contrastados con los registros de precipitación del Apéndice I. Se observaron 2 eventos de precipitación de intensidades considerables. El primero de mayor intensidad se presentó durante los días 13 y 17 de febrero con valores de hasta 18.9 mm. El segundo evento, durante el 21 y 23 de febrero con valores de 3 mm. Los mayores caudales pueden relacionarse con la magnitud de la lluvia del primer evento en el primer día de muestreo, así como con el evento de precipitación ocurrido un día antes del segundo día de monitoreo. A su vez, es de resaltar que para el segundo día de muestreo se observó que los agricultores no habilitaron las motobombas de extracción para el riego.

Respecto a la UH intervenida, se observa en el tercer día, un caudal inferior al presentado al nacimiento, distinto a lo ocurrido en los días anteriores de muestreo. Esto está relacionado con la extracción de agua para el riego agrícola durante ese día. Por otro lado, los caudales entre

nacimiento y cierre para esta UH tienen un incremento aproximado de 0.5 L/s asociado a una derivación de agua que es empleada para diversos propósitos.

3.1.2 pH. El pH es un término usado para expresar la actividad de ion hidrogeno, indicando la magnitud de acidez o basicidad, que esté presente en una solución (Sawyer et al., 2001); Oscila en un rango de 0 a 14, donde, los valores que fluctúan entre 0 y 7 se encuentran en rango ácido, y los valores superiores a 7 se encuentran en rango alcalino; El valor de pH igual a 7 a una temperatura de 25°C, se interpreta como “neutralidad absoluta” (Sawyer et al., 2001). Los valores registrados de pH se encuentran entre 7.12 y 7.84 unidades de pH, estos valores se registraron en las nacientes, de la UH no intervenida e intervenida, respectivamente, como se observa en el Apéndice J.

Esto puede asociarse a los altos residuos vegetales y materia orgánica que presenta la UH no intervenida comparada con la UH intervenida. Los cierres de las UH presentaron comportamientos diferentes con respecto a sus nacientes, en el cierre de la UH intervenida se presentaron valores de pH más bajos que en la naciente, esto puede asociarse al uso de fertilizantes nitrogenados, agregando ácidos al suelo y al agua a lo largo del cauce. Por otro lado, en la UH no intervenida, el cierre presenta un valor promedio de pH mayor que el promedio de los valores registrados en la naciente, esto se puede ver relacionado al cambio de la cobertura del suelo, debido a que en el punto del cierre se observó menos material orgánico que en la naciente, por lo tanto, podría contribuir en poca solubilidad con componentes ácidos al cauce. Los valores registrados en el punto de confluencia de las UH fueron menores a los dos cierres, la razón de este resultado puede ser asociado a la escorrentía aguas arriba del punto de confluencia y aguas abajo de los dos cierres, donde se presenciaba mayor cobertura y descomposición vegetal, aportando ácidos al cauce. El

punto de cierre aguas abajo del punto de confluencia, presentó valores aleatorios, esto puede relacionarse a las condiciones naturales en que encuentra este punto, como la lluvia, o las altas temperaturas. Los valores registrados a lo largo de los días de muestreo se presentan en el Apéndice J.

3.1.3 Conductividad eléctrica. Es la propiedad que posee una solución acuosa para conducir corriente eléctrica, dependiendo de la cantidad de iones: su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura que estén presentes (Sawyer et al., 2001). Los valores de conductividad eléctrica presentados en las nacientes de las UH se comportan de manera semejante entre ellas, como se observa en el Apéndice K, con valores cercanos a 30 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], esto puede deberse a los componentes naturales del suelo, componentes iónicos como el potasio, sodio, carbonatos y bicarbonatos que son comunes en los suelos orgánicos.

En el cierre de la UH no intervenida se presentan valores aleatorios cercanos a los valores de su nacimiento, la pequeña variación de estos valores puede darse por la adición de componentes iónicos naturales presentados en el suelo y que son adheridos por la escorrentía. El cierre de la UH intervenida por el contrario muestra valores altos de CE en comparación con el otro cierre y con la nacimiento, esto puede deberse a las sales provenientes de los fertilizantes inorgánicos que son aplicados en el área agrícola, de igual manera este comportamiento se ve reflejado en el cierre aguas abajo del punto de confluencia. Por el contrario, el punto de confluencia muestra valores más bajos que el cierre de la UH intervenida, esto es debido al flujo con factor de dilución proveniente de la UH no intervenida.

3.3 Análisis de calidad de agua bajo enfoque de Cuencas Pareadas

El análisis presentado a continuación, es el promedio de los resultados obtenidos de los días de muestreo (*in situ* y de laboratorio) (ver Apéndice L y M) , clasificados en nutrientes, sales, sedimentos, materia orgánica y patógenos.

3.3.1 Nutrientes

3.3.1.1 Nitrógeno orgánico. Es la concentración del nitrógeno presente por aminoácidos, polipéptidos, aminas, proteínas, entre otros compuestos orgánicos (INEN, 2013). Se obtiene mediante la diferencia del nitrógeno Kjeldahl y el nitrógeno amoniacal (INEN, 2013). Como se observa en la Figura 2, el valor máximo se presentó en la naciente de la UH no intervenida, con un valor de 0.15 mg N/L, la mineralización del nitrógeno se ve directamente reflejado por la degradación de la materia orgánica que se encontraba en esta naciente. Por otro lado, como fue mencionado en el previo análisis de pH (4.1.2), la naciente de la UH intervenida carece de degradación de materia orgánica y vegetal, tal como se refleja en la Figura 2, presentando el mínimo valor con 0.02 mg N/L. Este contraste de valores puede verse asociado a las condiciones naturales en que se encuentran los dos puntos; dado que la naciente natural presenta mayor vegetación que la naciente intervenida, aportando mayor descomposición orgánica.

El valor de nitrógeno orgánico es menor en el cierre de la UH no intervenida con respecto a su nacimiento, registrando un valor de 0.06 mg N/L, este descenso puede asociarse con la nitrificación, degradando al nitrógeno orgánico por medio de la oxidación. El cierre de la naciente intervenida presenta un pequeño incremento con respecto a su naciente, con un valor de 0.06 mg

N/L, este comportamiento es frecuente en las zonas de prácticas agrícolas, debido al uso de fertilizantes orgánicos, ya que estos añaden nutrientes al suelo y por medio de escorrentía llegan al agua.

3.3.1.2 Nitrógeno amoniacal. El nitrógeno amoniacal se origina por la degradación del nitrógeno orgánico (González, 2013). La UH intervenida presenta los valores máximos en la naciente y el cierre, con concentraciones de 0.26 mg $\text{NH}_4\text{-N/L}$, por lo que se podría decir que, durante estos días, no se presenciaron cargas de nitrógeno amoniacal por uso de fertilizantes. En la UH no intervenida se ve una variación desde la naciente con 0.15 mg $\text{N/L NH}_4\text{-N/L}$, hasta el cierre con un valor de 0.19 mg $\text{NH}_4\text{-N/L}$, el cual puede estar asociado al incremento de la degradación biológica del nitrógeno orgánico como se observa en la Figura 2.

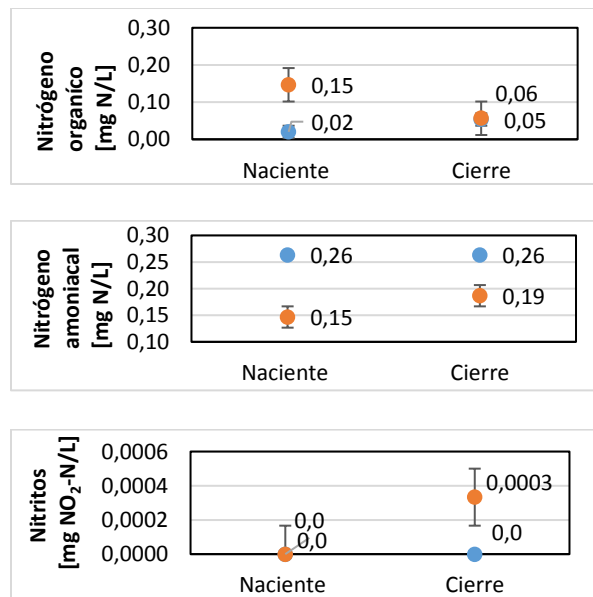
3.3.1.3 Nitritos. Se origina mediante la oxidación del nitrógeno orgánico por acción bacteriana (INEN, 2013). El análisis de nitritos en las dos unidades tanto en nacientes como en cierres, fueron de valor casi nulo, el valor más alto en promedio de los 3 días de estudio, lo presentó el cierre de la unidad no intervenida con 0.0003 mg $\text{NO}_2\text{-N/L}$. Esto puede asociarse a los bajos porcentajes de nitrógeno orgánicos presente en las dos unidades, y a la fase de oxidación biológica rápida que presentan los nitrógenos orgánicos, para transformarse en nitrógeno amoniacal, posteriormente a nitritos y finalmente a nitratos [29].

3.3.1.4 Nitratos. Es uno de los contaminantes más frecuentes por el uso de fertilizantes, y también por la oxidación final de nitrógeno orgánico [29]. Los valores mínimos de los nitratos se evidencian en las nacientes de las dos unidades de estudio, UH no intervenida e intervenida, con

valores de 0.02 y 0 mg NO₃-N/L, reflejando la baja contaminación específicamente en estos dos puntos. En los cierres, la UH intervenida presenta el mayor valor con 1.40 mg NO₃-N/L, por el contrario, el punto 4 presenta un valor bajo de 0.2 mg NO₃-N/L. Esta diferencia se asocia a la nitrificación del nitrógeno procedente de fertilizantes nitrogenados, los cuales no son absorbidos por el suelo y son removidos por escorrentía, oxidándose a nitratos.

3.3.1.5 Fósforo reactivo total. El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y otros seres vivos en el agua.

Generalmente, se encuentra en aguas naturales y residuales como fosfatos (fósforo reactivo) (Suarez, 2007). El fósforo reactivo o fosfatos, en una muestra tratada, es la suma del fósforo ácido hidrolizable y el fósforo que se encuentra después de una digestión suave [31]. La UH intervenida presentó un incremento considerable con respecto al comportamiento de la UH no intervenida, esto puede asociarse a descargas contaminantes de fertilizantes fosforado.



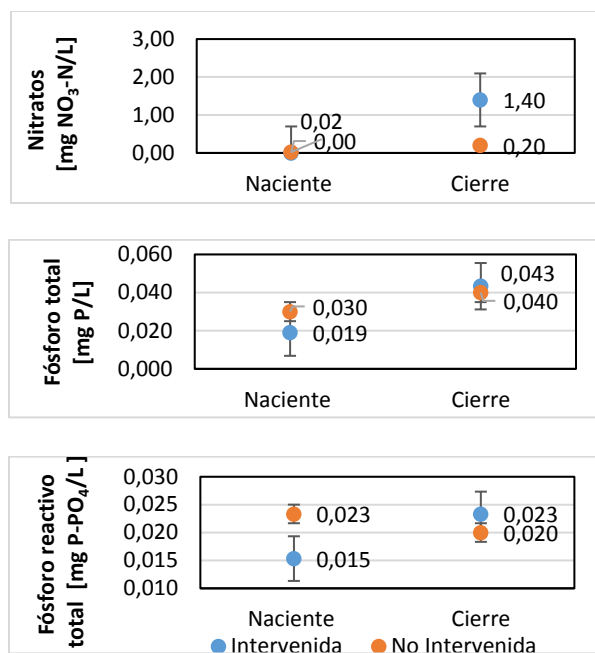


Figura 2. Valores promedio de concentración de nutrientes.

En la naciente de la UH no intervenida, presenta un valor a de 0.023 mg P-PO₄/L, el permanece casi en todo el trayecto del cauce hasta el punto de cierre con un valor de 0.020 mg P-PO₄/L, este leve descenso esto puede asociarse a una dilución de condición natural en el trayecto, como una lluvia, la cual haya disminuido la concentración del fosfato presente en el cauce.

3.3.1.6 Fósforo total. Se define como fósforo total a todas las formas de P que están presentes en una muestra de agua sin filtrar (Suarez, 2007). El fósforo total al igual que el fósforo reactivo presenta valores bajos en las dos UH y su comportamiento es semejante entre sí. El máximo valor lo presenta el punto de cierre de la UH intervenida con 0.043 mg P/L, esto puede asociarse al uso de fertilizantes sintéticos por los agricultores.

El Segundo valor más alto se muestra en el punto de cierre de la UH no intervenida, con un valor de 0.040 mg P/L, esto puede deberse a la materia que es adherida a lo largo del cauce.

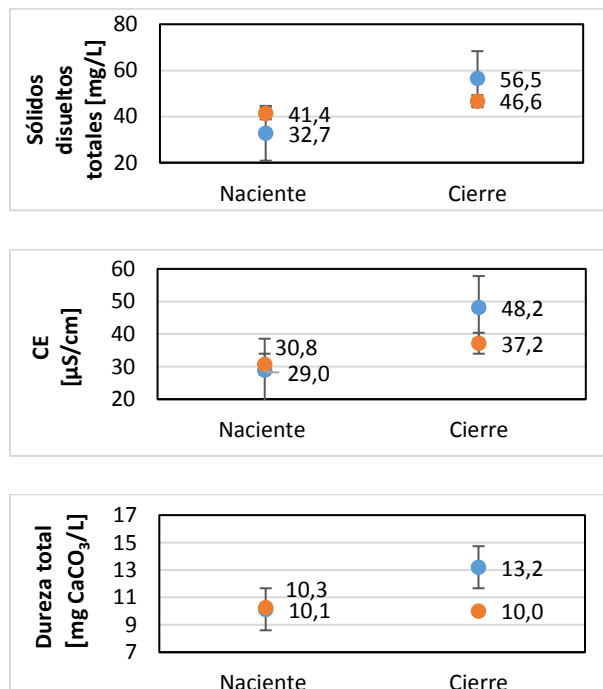
3.3.2 Sales

3.3.2.1 Sólidos disueltos totales (SDT). Los SDT representan la suma de todos los minerales, metales y sales que se encuentran disueltos en una muestra de agua (Gorchev & Ozolins, 1984), y se calcula a partir de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos totales. Los valores mínimo y máximo lo presentaron la unidad intervenida, en la naciente, con 32.7 mg/L, y en el cierre, con 56.5 mg/L, respectivamente, esto puede deberse a la concentración de sólidos contaminantes por insumos agrícolas y a los métodos de labranza que generan los agricultores en el suelo. La unidad no intervenida presentó en la naciente un valor alto de 41.4 mg/L, y en el cierre de 46.6 mg/L, esto puede relacionarse a las partículas finas presentes en su suelo, las cuales son arrastradas a lo largo del trayecto del cauce.

3.3.2.2 Conductividad eléctrica. Como se observa en la Figura 3, la UH intervenida presenta un incremento en comparación con la UH no intervenida. En el cierre de la UH intervenida refleja el máximo valor, con 48.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto puede relacionarse a la concentración de sales, producto de los insumos agrícolas como fertilizantes inorgánicos. En la UH no intervenida se presentó un incremento menor a la UH intervenida, en su naciente con un valor de 30.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en su cierre de 37.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto puede relacionarse a sales que se encuentran en el suelo subterráneo de páramo, los cuales son ascendidos a la superficie por la evaporación, y arrastradas por escorrentía (Llambí et al., 2012).

3.3.2.3 Dureza. La dureza del agua está asociada a la cantidad de iones de calcio y magnesio que estén presentes (Sawyer et al., 2001). En aguas superficiales la dureza se presenta por las

formaciones geológicas con las que el agua ha estado en contacto (Sawyer et al., 2001).. Al igual que la conductividad eléctrica y los SDT, la unidad intervenida fue la que presentó mayor concentración en el cierre con valor de 13.2 mg CaCO₃/L, esto puede asociarse a la descarga contaminante de cal a lo largo del cauce, aplicada en el área agrícola para la mejora de los suelos para una mejor absorción de nutrientes en los cultivos. La unidad no intervenida presentó valores semejantes entre la naciente y el cierre, y la naciente de la unidad intervenida, con valores de 10.1, 10 y 10.3 mg CaCO₃/L, respectivamente, comprobando la baja dureza del suelo natural de páramo. Los suelos de páramo, son naturalmente ácidos, por lo tanto, para la agricultura se requiere de cal para neutralizarlos, consiguiendo que los cultivos absorban los cationes y nutrientes del suelo(Díaz-Granados Ortiz et al., 2005), (Espinosa & Molina, 1999). La concentración de dureza presentada en las UH se encuentran en el rango de 0-60 mg CaCO₃/L clasificando como agua blanda, es decir de baja dureza (Gorchev & Ozolins, 1984).



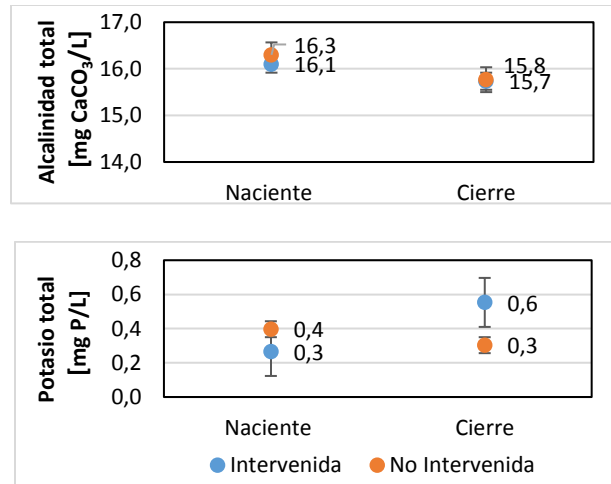


Figura 3. Valores promedio de parametros asociados a las sales.

3.3.2.4 Alcalinidad total. La alcalinidad total es la suma de alcalinidad por hidróxido, carbonato y bicarbonato que se encuentran presentes en una muestra de agua (Sawyer et al., 2001). Los valores promedio de alcalinidad fueron similares en las dos UH entre nacientes y cierres, presentando un comportamiento semejante entre las ellas. En las nacientes se registraron los valores máximos de 16.3 y 16.1 mg CaCO₃/L en la UH intervenida y no intervenida, respectivamente y en los cierres, esto puede asociarse a los iones de carbonato y bicarbonato que se presentan en los suelos naturales [28]. Por otro lado, valores mínimos se presentaron en el cierre de la UH intervenida con un valor de 15.8 mg CaCO₃/L y en el cierre de la naciente de la UH no intervenida un valor de 15.7 mg CaCO₃/L, esto puede relacionarse a una dilución por factores naturales, como lluvias en las UH.

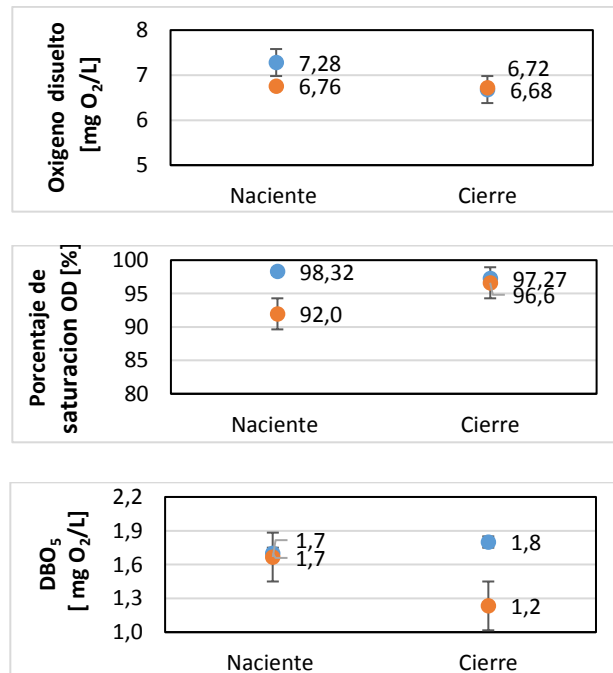
3.3.2.5 Potasio. El potasio (K) es un catión que se encuentra en una concentración baja en el agua de nacientes, y en el cauce se presenta en mayor cantidad por el uso de fertilizantes en el suelo (Caribe, 2014). Al igual que el fósforo y el nitrógeno, el potasio es un macronutriente para la supervivencia de las plantas, pero una concentración alta, puede ocasionar daños en las semillas

de germinación, inhibiendo la absorción de otros minerales y reduciendo la calidad de cultivo (Caribe, 2014). La mayor concentración de potasio se registró en el cierre de la unidad intervenida con un valor de 0.6 mg P/L, y en su nacimiento 0.3 mg P/L, esto puede asociarse a la descarga contaminante durante el trayecto del cauce, por el contrario, la UH no intervenida presentó valores de un rango pequeño, en la nacimiento de 0.4 mg P/L y en el cierre un valor de 0.3 mg P/L, esto puede deberse a la baja presencia de este nutriente en el suelo, el cual es añadido por escorrentía lo largo del cauce.

3.3.3 Materia orgánica

3.3.3.1 Oxígeno disuelto (OD). El oxígeno disuelto en un cuerpo de agua puede verse afectado por la degradación microbiana de la materia orgánica en condiciones aerobias (Sawyer et al., 2001). La UH intervenida presenta la mayor concentración en la nacimiento con un valor de 7.28 mg O₂/L, a medida que el cauce va recibiendo mayores descargas de contaminantes de nitrógenos, partículas de materia orgánica, microorganismos, el OD desciende a un valor de 6.68 mg O₂/L, esto puede relacionarse a que el nitrógeno requiere de oxígeno para realizar su nitrificación, del mismo modo los microorganismos requieren de oxígeno para descomponer la materia orgánica que se encuentre presente en el cauce. En la UH no intervenida se presenta un descenso menor a la UH intervenida, mostrando un menor consumo de OD, este consumo puede asociarse a la nitrificación, como se observó en la Figura 2, donde los valores de nitrógeno orgánico descendieron y los valores de nitrato ascendieron en el cierre.

3.3.3.2 Porcentaje de saturación de oxígeno. Es una medición en porcentaje del oxígeno disuelto presente en el agua (Sawyer et al., 2001). El valor máximo se presentó en la naciente de la unidad intervenida con un valor de 98.32%, y el valor mínimo en la naciente de la unidad no intervenida con 92%, los cierres presentaron valores cercanos al punto 1, en el punto 2 con un valor de 97.27% y en el punto 4 de 96.6%. Esto puede relacionarse a un descenso en la unidad hidrográfica intervenida producto de microorganismos que requieren mayor consumo de oxígeno para degradar la materia orgánica presente, por el contrario, en la unidad hidrográfica con vegetación, se presentaron valores de 92% en la naciente y 97.27% en el cierre, presentando un aumento del 5% de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, esto puede deberse a la ausencia de materia orgánica biodegradable a lo largo del cauce, comportamiento semejante a los resultados de OD.



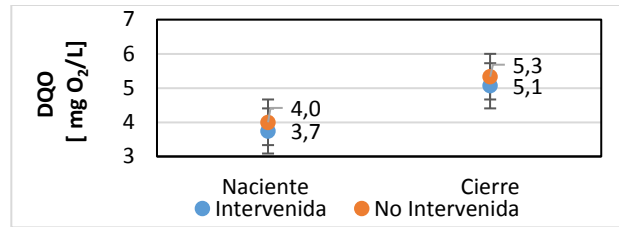


Figura 4. Valores promedio asociados a la materia orgánica

3.3.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). La DBO₅ es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar mediante procesos biológicos aerobios la cantidad de materia carbonada presente en una muestra durante un período de 5 días a una temperatura de 20 °C (Sawyer et al., 2001). En la UH no intervenida registra un descenso desde la naciente hasta el cierre, con valores de 1.7 a 1.2 mg O₂/L, esto es congruente con los resultados presentados anteriormente para OD y porcentaje de saturación, donde refleja niveles de oxígeno altos, los cuales pueden deberse al consumo de oxígeno que requieren las bajas concentraciones de nitrógeno presentes para su proceso de nitrificación, así como se reflejó en la Figura 2, por otro lado, la UH intervenida demostró un valor semejante desde la naciente hasta el cierre, esto puede asociarse a la fotosíntesis que contribuye su alta presencia de vegetación, y su baja presencia de materia carbonada, reflejando valores semejantes entre ellas. La unidad intervenida presenta un comportamiento de incremento muy bajo, esto puede asociarse a la cantidad de oxígeno que se precisa para la oxidación de la carga orgánica de los sedimentos, que se encuentra presente en el cauce.

3.3.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO). La DQO, mide la cantidad total de oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua (Sawyer et al., 2001). Por lo tanto, es representativa de la cantidad de materia orgánica total (biodegradable y no biodegradable) (Sawyer et al., 2001). Su unidad de medida se representa como mg O₂/L (Sawyer et

al., 2001). A diferencia de los resultados de DBO₅ en la unidad no intervenida, el punto de cierre tuvo un valor mayor de DQO que en la naciente, con valores de 5.1 y 3.7 mg O₂/L, respectivamente, lo que significa que predominan las formas no biodegradables de materia orgánica, requiriendo de mayor reactivo oxidante para su oxidación. La unidad intervenida presenta un comportamiento semejante con al UH no intervenida, esto puede asociarse a las concentraciones cercanas de materia no biodegradable en las dos UH.

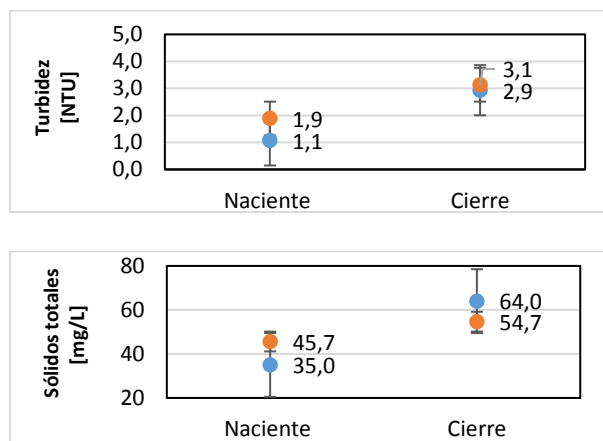
3.3.4 Sedimentos

3.3.4.1 Turbiedad. La turbiedad en una muestra de agua, es la medida del grado de transparencia que pierde una solución, provocando que la luz sea remitida y no transmitida, es causada por la materia suspendida y coloidal, como la arcilla, sedimentos, materia orgánica e inorgánica en partículas finas (IDEAM, 2015). En este estudio, los valores máximos los presentaron los cierres de las dos unidades, 3.1 NTU en el cierre de la unidad no intervenida y 2.9 NTU en el cierre de la unidad no intervenida, y los valores mínimos se reflejaron en las nacientes con valores de 1.1 y 1.9 NTU, en la unidad intervenida y no intervenida respectivamente, esto puede deberse a la mayor intensidad de dispersión por el arrastre de material disuelto como arcillas y limos que se pueden encontrar en el suelo durante su trayecto del cauce.

3.3.4.2 Sólidos suspendidos. Los sólidos suspendidos son el material no filtrado de los sólidos totales presentes en el agua (Sawyer et al., 2001). La mayor concentración de sólidos suspendidos se presentó en los cierres de las dos unidades, en el punto 4 con 8.0 mg/L, y en el punto 2 con 7.5 mg/L. La unidad intervenida presentó un incremento superior a la unidad no intervenida, dado que

el valor de la naciente presento el mínimo valor, con un valor de 2.3 mg/L, asociándose a la mayor cantidad de materia orgánica e inorgánica debido a materiales antropogénicos arrastrados durante el trayecto del cauce intervenido, asimismo el incremento menor de la UH no intervenida es asociado a la materia orgánica, que impide el impacto de la lluvia o la escorrentía para arrastrar sedimentos(Elledge & Thornton, 2017).

3.3.4.3 Sólidos totales. La cantidad de sólidos totales incluyen material disuelto (residuo filtrable) y no disuelto (sólidos suspendidos) (Sawyer et al., 2001). Las unidades presentaron altos niveles de ST en comparación con los SS, lo que significa que la mayoría de ST son materiales disueltos, comportándose congruente con los SD presentados en la Figura 3, los valores máximos también se reflejaron en los cierres de la UH intervenida y no intervenida, con 64 y 54.7 mg/L, respectivamente, los altos niveles de sólidos presentados en cierre de la unidad intervenida pueden ser causados por la erosión del suelo, e insumos aplicados por las actividades agrícolas, reflejando un incremento superior con respecto a la UH no intervenida, la cual, presenta valores cercanos entre su naciente con un valor de 45 mg/L y el cierre, asociándose a un menor arrastre de sólidos.



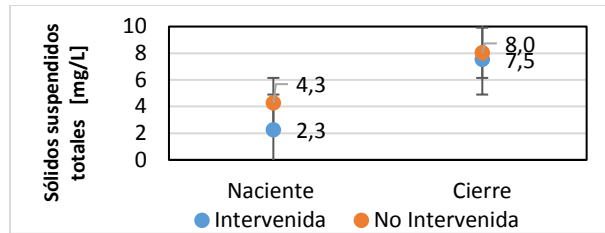


Figura 5. Valores promedios asociados a los sedimentos

3.3.5 Patógenos

3.3.5.1 E. coli. Esta bacteria se encuentra en el grupo de coliformes termo tolerantes, la cual se presenta en gran cantidad en los residuos fecales de animales de sangre caliente y en humanos (Gorchev & Ozolins, 1984). Su unidad representativa es “Unidades formadoras de colonias UFC/100mL”, o “Número más probable/100mL de agua NMP/100mL (Gorchev & Ozolins, 1984). Un estudio realizado en la Sierra Nevada de Santa Marta revela la gran cantidad de descarga contaminante que produce la materia fecal de ganado (Derlet & Carlson, 2006). Así mismo, se observa como los valores más altos se presentaron en el cierre de la unidad intervenida, con valor de 2951 UFC/100mL, asociándose a la presencia de ganado, a posibles sistemas de saneamiento individual de los habitantes o a defecaciones a campo abierto. En la UH no intervenida, se presentaron valores altos tanto en el nacimiento con 677 UFC/100mL, como en el cierre con 300 UFC/100mL, estos valores son debido a la materia fecal presentada cerca al cauce, siendo procedente del ganado transitado, donde se reflejó mayor descarga de contaminación fecal en el día 3 (ver Apéndice M).

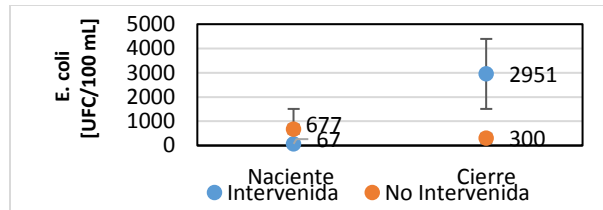


Figura 6. Valores promedio de E. coli, evaluados en el laboratorio de hidráulica de la Universidad industrial de Santander

Los parámetros que no cumplen con los rangos admisibles para consumo según el RAS (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), la resolución 2115 de 2007 (Ministerio de la protección social, 2007) y la OMS (Gorchev & Ozolins, 1984) son DBO₅, Turbiedad, E. coli. Por otro lado, todos los parámetros mencionados por la FAO para la agricultura, son aceptables para uso de riego (Water quality for agriculture, n.d.) (Ver tabla 10-Apéndice N).

3.4 Índices de calidad y contaminación

Se aplicaron 6 diferentes tipos de índices, que involucran las concentraciones de los parámetros que fueron obtenidos a partir de las muestras tomadas. Es así como se aplicó: ICA-IDEAM, ISQA (índice simplificado de calidad del agua), ICOpH (Índice de contaminación por pH), ICOMI (Índice de contaminación por mineralización), ICOSUS (Índice de contaminación por sólidos suspendidos) e ICOTRO (Índice de contaminación trófico-Fósforo total).

El Apéndice N permite observar en su totalidad los valores de índices para cada punto de muestreo durante los 3 días de campaña.

Los valores obtenidos para el índice ISQA arrojaron una calificación que oscila entre 80 y 97 sugiere que la calidad del agua se encuentra entre buena y excelente como se menciona en la referencia del cálculo del índice (Rivera, 2008), “la calidad del agua está protegida contra un menor

grado de amenazas; las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseados” y para los puntos de más alta calidad: “La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas; las condiciones son cercanas a los niveles naturales” según la Tabla 2 de referencia del Apéndice B. El primer y tercer día de muestreo denotaron cierta cercanía en el rango de valores, mientras que en el segundo día, el índice de todos los puntos se elevó; esto puede ser consecuencia de los eventos de precipitación en los días previos al día de muestreo como se observa en el Apéndice I, eventos que posiblemente contribuyeron a la autodepuración y oxigenación de los cuerpos de agua.

De igual modo, la tendencia registrada para el ICA-IDEAM es similar al ISQA, con una calificación que oscila entre 0.7 Y 0.9 de lo cual se obtiene una calificación general de Aceptable para todos los puntos de muestreo según la Tabla 4 de valores de referencia del Apéndice C. Para este índice se puede observar que los mayores valores se registran en las nacientes y en el cierre de la UH no intervenida, que corresponde a los valores esperados ya que los parámetros de estos puntos son afectados principalmente por la naturalidad del ecosistema en lugar de actividades antrópicas como corresponde a los demás puntos de muestreo.

Por otra parte, los resultados obtenidos para los Índices de Contaminación (ICO) como se mencionó anteriormente están enfocados a las aguas de la industria petrolera la cual posee grandes concentraciones de los parámetros involucrados en las ecuaciones del cálculo de cada uno de los índices o en otras palabras grandes descargas contaminantes. En el caso del presente estudio, los resultados de estos índices tienden a 0 debido a que la concentración de los parámetros analizados es relativamente baja al contrastarlos con cursos de agua que reciben efluentes industriales. Los valores de calificación ICO establecen un límite de 1, como se muestran en la Tabla 5 de referencia del Apéndice D, arrojando una calificación de aguas sin contaminación. Sin embargo, se concluye

que, en su mayoría, no se considera aplicable realizar una evaluación por el método de ICOs para la zona de estudio.

Pese a que el valor mínimo de contaminación que propone el índice ICOTRO fue el que se obtuvo, cabe mencionar que casi la totalidad de las muestras mostradas en la Tabla 10, exhiben concentraciones de fósforo que denotan eutrofización lo cual es señal de afectación debido a actividades agrícolas (Ramírez & Cardenosa, 1999) y al arrastre de material por lavado de los suelos y riego.

3.5 Análisis de calidad del agua bajo el enfoque Aguas arriba-Aguas abajo

Los resultados obtenidos a través de este enfoque se analizaron a partir de la comparación espacial de los promedios de las cargas contaminantes de origen agrícola agrupados por categorías, cabe resaltar que a algunos de ellos es imposible analizarlos bajo el concepto de carga contaminante luego se analizó por su concentración. Las gráficas mostradas en las Figuras 14-18 muestran la variación de las cargas contaminantes a lo largo del cauce tomando como punto 0 la naciente de la unidad hidrográfica intervenida. La distancia de los demás puntos de muestreo para este análisis con respecto al punto inicial fue de 0.55 Km al cierre de la unidad, 0.68 Km a la confluencia de las unidades y 2.05 Km al punto aguas abajo de la confluencia.

3.5.1 Nutrientes. La carga de nitrógeno orgánico tuvo valores de hasta 0.25 Kg/d como se muestra en la Figura 7A, aguas abajo de la confluencia, mientras que el nitrógeno amoniacal osciló entre 0.03 y 0.42 Kg N/d como se muestra en la Figura 7B.

En cuanto a los valores de carga de nitratos se obtuvo una tendencia de concentración constante durante los días de muestreo, basado en la presencia de cultivos dentro de la unidad y consecuentemente la utilización de agroquímicos para estos. Se puede observar que con mayor presencia de cultivos adyacentes a medida que avanza espacialmente el curso, la carga incrementa hasta su valor máximo en el punto aguas abajo de la unión con un valor de 5.26 kg NO₃-N/d registrado en la Figura 7C.

Para el valor de los nitritos se evidenció cargas en su mayoría nulas evidenciado en la Figura 7D, luego se puede concluir la ausencia de este parámetro en la zona de estudio.

Los fosfatos presentaron oscilación entre 0 Kg P-PO₄/ en la naciente y 0.03 en el punto aguas abajo de la unión de las UH. Las Figuras 7E y 7F muestran la variación de estos resultados.

Conforme el curso atravieza campos de actividad agrícola refleja el impacto sobre la carga de compuestos nitrogenados a lo largo del cauce debido a la descarga de múltiples fertilizantes nitrogenados utilizados en la agricultura de la zona siendo estos uno de los mayores contaminantes para ecosistemas de alta montaña(Peng et al., 2012).

Los valores de fosfatos y fósforos conllevan a concluir riesgos de eutrofización e incremento de la acidez (Aranguren-Riaño et al., 2018). Estas dos afectaciones son reafirmadas en este estudio a partir del índice ICOTRO y los valores de pH en la Tabla 8 del Apéndice L en la que se evidencia una reducción de 0,5 unidades de pH entre la naciente y el punto aguas abajo de la confluencia.

3.5.2 Sales. Las cargas de SDT mostraron un rango de valores entre 3.8 y 160.22 Kg/d en promedio, como se puede observar en la Figura 8A. Este crecimiento espacial de valores se le atribuye principalmente a la escorrentía del volumen de riego de las actividades agrícolas y a la contaminación doméstica aledaña(González-Martínez et al., 2019).

La conductividad eléctrica incrementó su magnitud con la presencia de las descargas contaminantes agrícolas (Figura 8B), por lo que en el cierre de la unidad hidrográfica intervenida y aguas abajo de la confluencia presenta un incremento, siendo el punto aguas abajo de la unión donde su valor es máximo con un total de 62.85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en promedio. Los valores obtenidos se enmarcan dentro de los límites esperados para este ecosistema que son entre 20 y 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ propuestos por previos investigadores, lo cual permite observar que únicamente el punto aguas abajo de la confluencia, superó dicho límite lo cual conlleva a concluir que el valor de sulfatos y demás sales provenientes principalmente de fertilizantes y agroquímicos utilizados y descargados en este punto afecta las concentraciones normales de conductividad (Castro et al., 2009).

La concentración de alcalinidad osciló entre 15 y 16.23 mgCaCO_3/L (Figura 8C), con un comportamiento descendiente desde el punto naciente hasta la confluencia donde empieza a aumentar hasta su valor máximo en el punto aguas abajo de la unión. Estos valores son contrastados con el límite vigente de máximo de la normativa colombiana que es de 200 mgCaCO_3/L (Ministerio de la protección social, 2007) para consumo humano, lo que concluye que la concentración de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos permiten una adecuada neutralización del pH en esta agua.

La dureza por su parte, tuvo valores entre 10 y 18.8 mgCaCO_3/L (Figura 8D). La descarga del cauce de la unidad no intervenida hace que la concentración en la confluencia disminuya en ese punto, sin embargo vuelve a presentar un comportamiento creciente hasta llegar al punto aguas abajo. Análogamente a la alcalinidad, un valor en promedio de 18 mgCaCO_3/L fue encontrado por previos investigadores (Chavarro & Gelvez Bernal, 2016). EL rango de valores en este estudio se puede clasificar como un agua blanda, por lo cual no tiene efectos adversos sobre la salud

humana (Ministerio de la protección social, 2007) ni para riego pues no causan corrosión sobre los sistemas (Gutierrez., 2006) .

En cuanto al potasio total, los valores oscilaron entre 0.02 Kg K/d y 2 Kg K/d como está registrado en la Figura 8E, el potasio es un elemento natural del agua y el ecosistema, sin embargo a partir de su gráfica es posible relacionar el aumento de la carga con algunos fertilizantes potásicos utilizados en los cultivos a lo largo del curso. Pese a su incremento, este valor no representaría ningún riesgo para consumo humano ya que la OMS sugiere un límite de 3 Kg/d (Domínguez Mesa, 2018) de ingesta de potasio, valor que no alcanza a superar el punto aguas abajo aun cuando es el que mayor caudal tiene.

3.5.3 Materia orgánica. El OD fluctuó entre puntos con un rango de 6.8 a 7.5 mgO₂/L (Figura 9A). Fue posible observar un decrecimiento importante en el punto de confluencia de unidades, donde se presentó el valor mínimo mientras que el valor máximo se registró en la naciente. Sin embargo, no superó el rango de valores es el esperado para aguas no contaminadas que es entre 7 y 8 mgO₂/L (Corporación autónoma del Tolima, 2013).

Por otro lado el porcentaje de saturación del oxígeno en 3 de los 4 puntos, se mantuvo valores cercanos al 100% que es la saturación de referencia. Únicamente en el punto aguas abajo de la unión el oxígeno disuelto superó el 100% de porcentaje de saturación. (Figura 9B) lo que indica una presencia superior a la normal de productores (algas y fitoplancton) , desarrollados gracias a la cantidad de nutrientes explicados en la anterior sección dando ratificación a la eutrofización en dicho punto.

Correspondientemente a los resultados de OD, tanto para cargas como para concentración de DBO₅ y DQO, se pudo observar un incremento en la confluencia de las unidades. Los valores

máximos de carga se obtuvieron nuevamente en el punto aguas abajo siendo para la DBO_5 3.1 KgO_2/d (Figura 9C) y para la DQO 11.9 KgO_2/d (Figura 9D) en promedio. Los valores de OD y DBO_5 permiten ser comparados con el estudio realizado en la Quebrada Mamarramos de Boyacá previamente mencionada (Cerón-Vivas et al., 2019), ya que el valor de OD de dicho estudio fue en promedio 7.54 mgO_2/L y su rango de DBO_5 osciló entre 0.1 y 0.6 KgO_2/d , similares a los encontrados en este estudio en la mayoría de los puntos estudiados, lo cual concluyó en la referencia citada en una excelente calidad de agua.

El análisis de la carga asociada a materia orgánica a partir de la comparación con un ecosistema similar, permite evidenciar el deterioro de la calidad del agua en el punto aguas abajo de la confluencia al recibir efluentes no localizados de residuos orgánicos, presencia proliferada de algas y a microorganismos procedentes de contaminación agrícola.

3.5.4 Sedimentos. Los SST (Figura 10A), presentaron un incremento significativo entre el cierre de la unidad hidrográfica y la confluencia de las dos unidades. Su rango de valores estuvo entre 0.8 y 31 Kg/d . Este último valor se registró en el punto aguas abajo de la unión. Se puede concluir por la diferencia de magnitud entre los SDT y los SST, que los primeros son los que más aportan a la cantidad de sólidos totales presentes. Esto concluye que la contaminación del curso por carga de sedimentos es aproximadamente de tipo homogénea constituida por sales inorgánicas y materia orgánica (Sawyer et al., 2001).

Respecto de la turbiedad, registró un incremento de hasta 14 NTU, en la unión de las dos UH. Este valor puede comparado con los hallados en una región minera de carbón en Cundinamarca (González-Martínez et al., 2019) los cuales registraron un valor máximo de 17 NTU en la zona de mayor contaminación que fue la de descarga de drenaje urbano, luego permite

concluir una drástica contaminación debido a este parámetro en dicho punto. Solamente la naciente, con valor de 0.67 NTU en promedio se considera una fuente aceptable de calidad al no superar el valor de 2 NTU (Ministerio de la protección social, 2007). Es de notar que el curso del agua y su fluir, ayudan a diluir las unidades de medición por lo que se aprecia cómo aguas abajo de la unión el parámetro ha decrecido considerablemente.

3.5.5 Patógenos. El conteo realizado de *E. coli* mostró su valor mínimo en la naciente de la unidad hidrográfica intervenida como se aprecia en la Figura 11. Este valor no superó en promedio las 67 UFC/100ml. El punto de cierre de la unidad mostró una elevada concentración de 2951 UFC/100ml en promedio registrándose como el mayor de todos los puntos Este valor disminuyó a medida que la distancia espacial fue aumentando.

Es importante recalcar que este valor de parámetro imposibilita que esta agua sea consumida sin ningún tratamiento de acuerdo a los límites establecidos por el Ministerio de Protección Social (Ministerio de la protección social, 2007) que es de 0 UFC/100 ml y, a excepción de la naciente, ningún valor es aceptado para un cultivo como el de cebolla, pues al estar en contacto directo con el agua, como lo expresa el Instituto de Agricultura de la Universidad de Tennessee (Amundson et al., 2012), establece valores máximos de 235 UFC/100 ml.

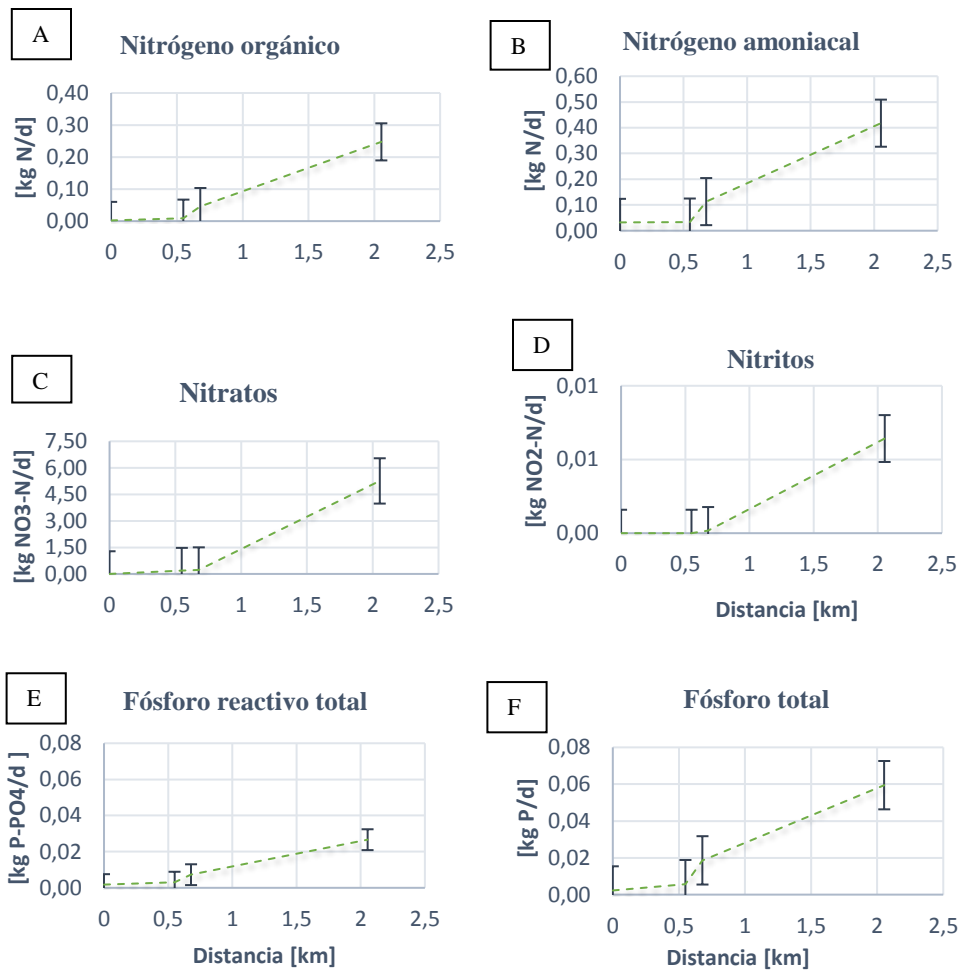


Figura 7. Variación de carga asociada a nutrientes a lo largo del cauce. A) Variación de carga de nitrógeno orgánico. B) Variación de carga de nitrógeno amoniacal. C) Variación de carga de nitratos. D) Variación de carga de nitritos. E) Variación de carga de fósforo reactivo total. F) Variación de carga de fósforo total.

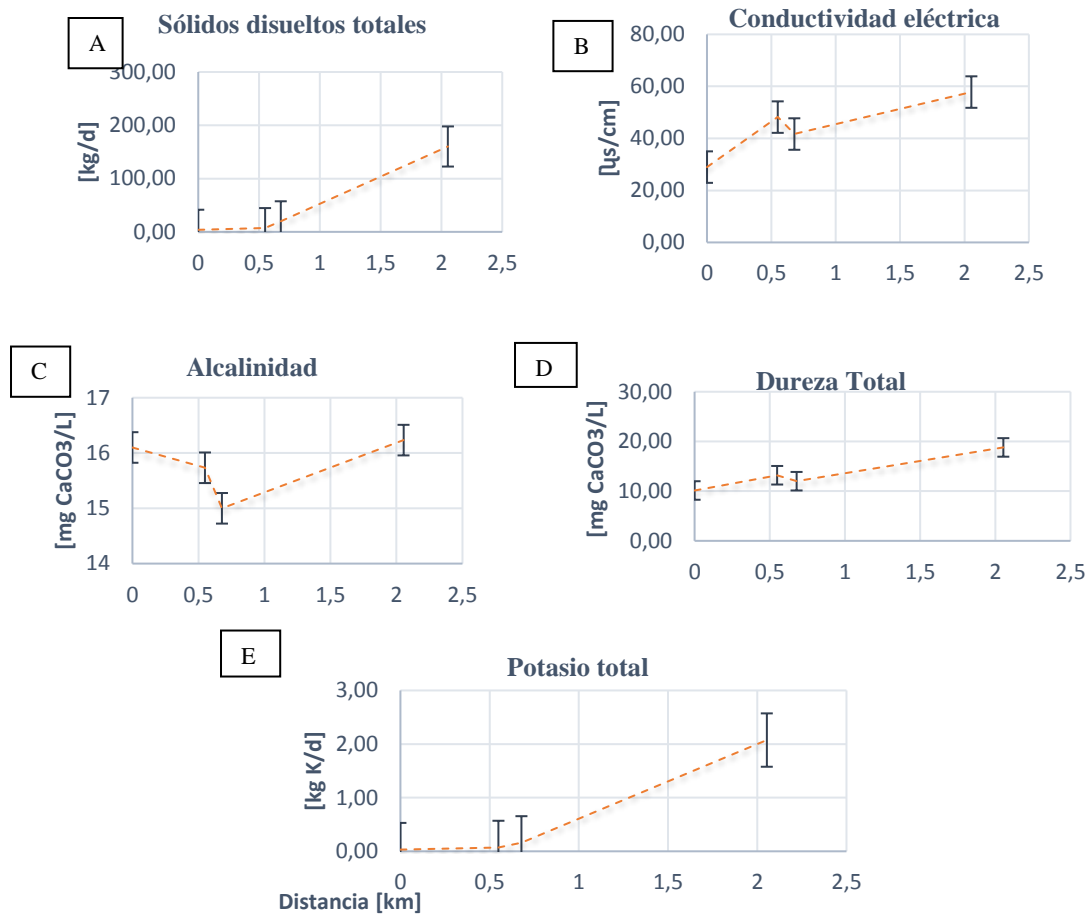


Figura 8. Variación de carga asociada a sales a lo largo del cauce. A) Variación de carga de SDT. B) Variación de concentración de conductividad eléctrica. C) Variación de carga de Alcalinidad. D) Variación de carga de dureza total. E) Variación de carga de potasio total.

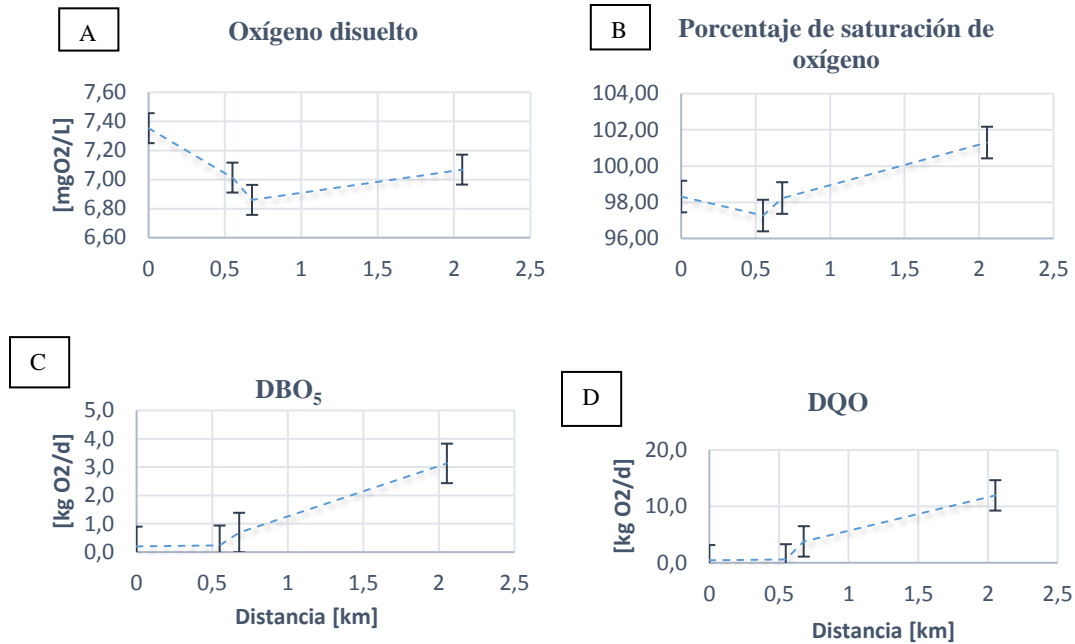


Figura 9. Variación de carga asociada a materia orgánica a lo largo del cauce. A) Variación de concentración de OD. B) Variación de concentración de porcentaje de saturación de OD. C) Variación de carga de DBO_5 . D) Variación de carga de DQO.

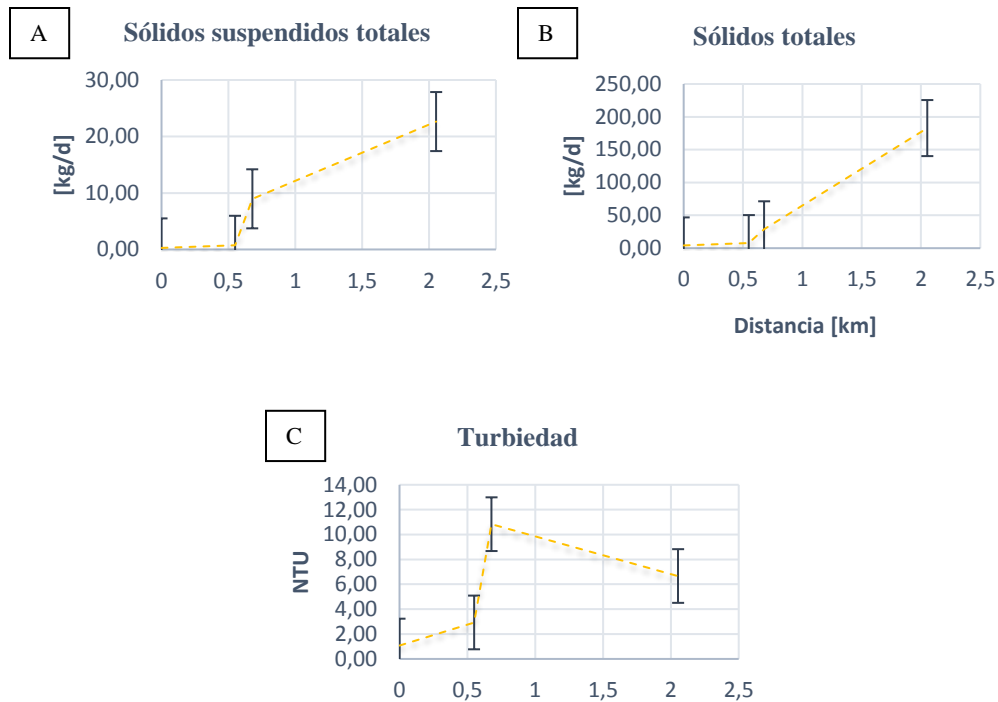


Figura 10 Variación de carga asociada a sedimentos a lo largo del cauce. A) Variación de carga de SST. B) Variación de carga de ST. C) Variación de concentración de turbiedad.

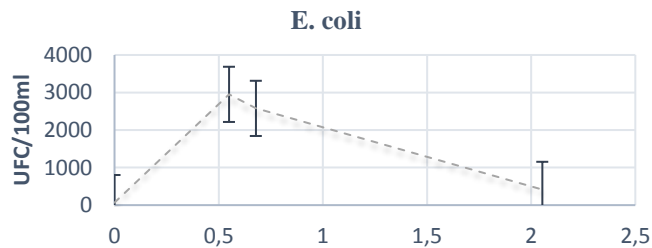


Figura 11. Variación de E. coli a lo largo del cauce.

3.6 Índices de calidad

A partir del análisis por índices descrito en la anterior sección, se realizaron gráficos que permitiese comparar la variación del índice de calidad a lo largo del cauce de la UH intervenida.

En la Figura 12 se observa el mayor índice de calidad en la naciente y, conforme el cauce avanza en las inmediaciones de los cultivos, este descende, sin embargo, una vez al cauce principal lo tributan otros cursos de agua, como sucede en el punto aguas abajo de la confluencia este tiende a mejorar por lo que en el último punto el valor nuevamente tiende a crecer debido a que la concentración de los parámetros involucrados se regula por efecto de dilución y limpieza natural del curso.

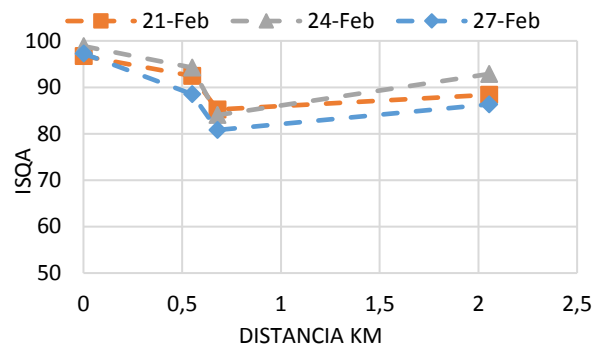


Figura 12. Variación del índice de calidad ISQA a lo largo del cauce.

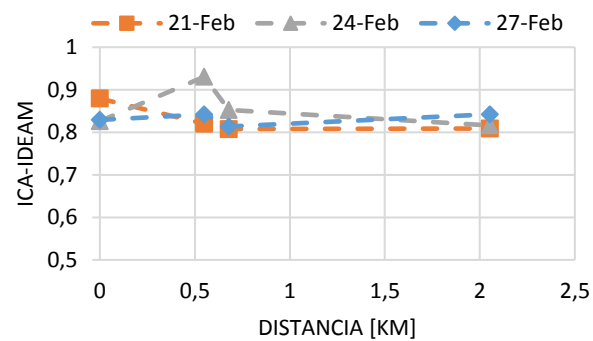


Figura 13. Variación del índice de calidad ICA-IDEAM a lo largo del cauce.

No obstante, el índice ICA-IDEAM, como se puede observar en la Figura 13, presenta un valor sustancialmente alto en para el punto de cierre de la unidad intervenida para el segundo día de

muestreo, esto no corresponde a los resultados de los demás parámetros fisicoquímicos y microbiológicos y el análisis de cargas contaminantes realizado pues se vio que este punto era un foco donde el agua comenzaba a registrar contaminación después del nacimiento. Finalmente, este índice no permite evidenciar la evolución de la calidad dado que las demás curvas trazan poca variabilidad entre los puntos.

4. Conclusiones

Este estudio mostró la afectación de la calidad del agua debido a las prácticas agrícolas en una UH en el páramo de Berlín. A partir del enfoque de monitoreo de cuencas pareadas en el período de calibración se presentaron diferencias en las dos UH en parámetros como nitratos, fosfatos, dureza, CE y *E. coli*, producto del uso del suelo agrícola con presencia de ganado en la UH intervenida. Por otra parte, no se identificó una influencia significativa en contaminación asociada a materia orgánica ni arrastre de sedimentos como se deriva de ello los resultados de OD, DBO₅, DQO, SST y turbiedad.

El análisis de carga contaminante bajo el enfoque Aguas arriba-Aguas abajo mostró una alteración drástica debido a la carga de los nutrientes particularmente en los nitrógenos, conforme el curso atraviesa los campos agrícolas y recibe las descargas contaminantes debido a fertilizantes nitrogenados.

A su vez, fue posible registrar contaminación por carga de materia orgánica en el punto aguas abajo a través de parámetros como la DBO₅ y la DQO, los cuales aumentaron a lo largo del cauce. Complementariamente los sedimentos mostraron una contaminación en algunos puntos de muestreo con comparaciones de magnitud aproximada a la de un cuerpo de agua de alta montaña con descargas de drenaje urbano de una zona minera en Cundinamarca (González-Martínez et al., 2019).

La mayor parte de parámetros cumplen con normativas para consumo y riego a excepción de la Turbiedad en puntos que no son naciente, y la *E. coli* y la DBO₅ en todos los puntos.

Los valores de patógenos presentes superaron las normativas establecidas sin embargo es de resaltar que el curso del agua diluyó las concentraciones especialmente desde la confluencia de las UH hasta el punto aguas abajo.

En contraste, no fue evidente observar que la carga contaminante debido a sales fuese representativa ya que se mantuvo dentro de rangos esperados y normales según normativas y otros estudios de ecosistemas de alta montaña en puntos no intervenidos por actividades antrópicas.

A partir de los índices de calidad se pudo observar que la calidad del agua superficial en las cuencas seleccionadas permanece en un estado de buena o excelente calidad. Sin embargo, el índice de contaminación por componentes tróficos denota que la calidad del agua superficial está degradada por la presencia de fósforos y fosfatos con alto riesgo de eutrofización, evidenciándose en el cierre de la unidad hidrográfica intervenida y aguas abajo de la confluencia.

Finalmente, para controlar la contaminación de fuentes no localizadas de manera efectiva, se deben implementar mejores y apropiadas prácticas y productos agrícolas mejorando las técnicas convencionales que se emplean en el área de estudio. Este estudio es un primer acercamiento a las cargas contaminantes y la afectación sobre la calidad del agua en esta zona de páramo, por lo tanto, se recomienda seguir con el estudio de monitoreo en otras épocas para obtener un período de calibración más amplio y poder implementar una mejora en la zona agrícola y así completar el estudio bajo el enfoque de cuencas pareadas. Asimismo, es necesario continuar con el registro de parámetros en puntos de muestreo para conocer la evolución de la calidad del agua a través del tiempo y el espacio de la UH, con una mayor cantidad de datos que sean lo suficientemente representativos para el enfoque Aguas arriba-Aguas abajo.

Referencias Bibliográficas

- Amundson, S., McCarty, G., Critzer, F., Lockwood, D., Wszelaki, A., & Bihn, E. (2012). Interpreting Water Quality Test Results for Fruit and Vegetable Production. *University of Tennessee*, 06, 1–4.
- Aranguren-Riaño, N. J., Shurin, J. B., Pedroza-Ramos, A., Muñoz-López, C. L., López, R., & Cely, O. (2018). Sources of nutrients behind recent eutrophication of Lago de Tota, a high mountain Andean lake. *Aquatic Sciences*, 80(4), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0588-x>
- Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, B. De, Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bievre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water ´ ramo yield in the Andean pa. *Forest Ecology and Managment* 251, 251, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Caho-Rodríguez, C. A., & López-Barrera, E. A. (2017). Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*, 12(2), 35–49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Caribe, S. (2014). *Determinación de cationes en agua potable del cantón de Grecia, Costa Rica por absorción atómica*. XV, 93–106.
- Castro, G., Medina, P., & V, A. C. P. (2009). Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán. *Ingeniería*, 13(1), 49–58.
- Cerón-Vivas, A., Gamarra, Y., Villamizar, M., Restrepo, R., & Arenas, R. (2019). Water quality of Mamarramos stream. The sanctuary of fauna and Flora Iguaque, Colombia. *Tecnología*

- y *Ciencias Del Agua*, 10(6), 90–116. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-04>
- Chavarro, A. G., & Gelvez Bernal, E. J. (2016). Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo. *Revista Mutis*, 6(2), 19–31. <https://doi.org/10.21789/22561498.1148>
- Corporación autónoma del Tolima. (2013). *CALIDAD DE AGUAS*. Cuenca Amoyá Fase 2. https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_amoya/diagnostico/1211.pdf
- Derlet, R. W., & Carlson, J. R. (2006). Coliform bacteria in Sierra Nevada wilderness lakes and streams: What is the impact of backpackers, pack animals, and cattle? *Wilderness and Environmental Medicine*, 17(1), 15–20. <https://doi.org/10.1580/PR05-05.1>
- Díaz-Granados Ortiz, M., Navarrete González, J., & Suárez López, T. (2005). Páramos: Sensitive Hydrosystems. *Revista de Ingeniería*, 22, 64–75.
- Doetterl, S., Van Oost, K., & Six, J. (2012). Towards constraining the magnitude of global agricultural sediment and soil organic carbon fluxes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(6), 642–655. <https://doi.org/10.1002/esp.3198>
- Domínguez Mesa, N. (2018). *Contenido en sodio y potasio en aguas de consumo de algunos municipios de Tenerife y su posible relación con la hipertensión en cada uno de ellos*. Tesis de grado [Universidad de La Laguna]. <https://www.uspceu.com/oferta-academica/grado/grado-en-farmacologia#practicass>
- Dressing, S. A., & Meals, D. W. (2005). Designing water quality monitoring programs for watershed projects. *Tech Notes 2*, July, 1–20.
- Elledge, A., & Thornton, C. (2017). Effect of changing land use from virgin brigalow (*Acacia harpophylla*) woodland to a crop or pasture system on sediment, nitrogen and phosphorus in runoff over 25 years in subtropical Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.031>
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. *Accs*, 1, 1–46.

- Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., & Limas, L. F. (2009). *CUNDINAMARCA-COLOMBIA) EFFECT CAUSED BY AGRICULTURAL ACTIVITIES ON SOIL CHARACTERISTICS IN THE PARAMO EL GRANIZO (CUNDINAMARCA-COLOMBIA)*.
- Eugenia, N., Ruiz, S., Carvajal, Y., & Carlos, J. (2007). *Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators*. 27(3), 172–181.
- FAO and IWMI. (2018). *More people, more food, worse water? a global review of water pollution from agriculture*. <http://www.fao.org/3/CA0146EN/ca0146en.pdf>
- González-Martínez, M. D., Huguet, C., Pearse, J., McIntyre, N., & Camacho, L. A. (2019). Assessment of potential contamination of Paramo soil and downstream water supplies in a coal-mining region of Colombia. *Applied Geochemistry*, 108(July), 104382. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104382>
- González, L. (2013). Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Universidad Tecnológica de Panamá*, 12–13.
- Gorchev, H. G., & Ozolins, G. (1984). WHO guidelines for drinking- water quality. *WHO Chronicle*, 38(3), 104–108.
- Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental GPH-UIS. (2020). *Análisis Participativo de la influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos de Suministro y Regulación Ofertados por el Ecosistema de Páramo seco Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander-Colombia) Documento inédito*.
- Gutierrez., M. (2006). *Dureza En Aguas De Consumo Humano Y Uso Industrial, Impactos Y Medidas De Mitigación. Estudio De Caso: Chile*. 83.
- IDEAM. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial (Issue 96)*. www.ideam.gov.co
- IDEAM. (2015). *Turbiedad Por Nefelometría (Metodo B). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 9. <https://doi.org/TP0443>

IDEAM, INVEMAR, & MINAMBIENTE. (2017). Protocolo de Monitoreo del Agua - Colombia. In *Ideam* (p. 587).

INEN. (2013). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1204:2013 Primera revisión AGUA. DETERMINACIÓN DEL NITRÓGENO ORGÁNICO.*

Kändler, M., Blechinger, K., Seidler, C., Pavlů, V., Šanda, M., Dostál, T., Krása, J., Vitvar, T., & Štich, M. (2017). Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany. *Science of the Total Environment*, 586, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.221>

Llambí, L. D., Soto, A., Borja, P., Ochoa, B., Celleri, R., & Bievre, B. (2012). Páramos Andinos: Ecología, hidrología y suelos de páramos. In *Páramos andinos*. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56477.pdf>

Madriñán, S., Cortés, A. J., & Richardson, J. E. (2013). *Páramo is the world 's fastest evolving and coolest biodiversity hotspot.* 4(October), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fgene.2013.00192>

Mena-Vásquez, P., & Farley, K. A. (2019). Andean Páramo grasslands. In *Salem Press Encyclopedia of Science*. <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2070/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=94981212&lang=es&site=eds-live>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - Título C. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 336.

Ministerio de la protección social. (2007). Resolución 2115/2007. *Gaceta Oficial*, 23. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Natural Resources Conservation Service U.S.A Department of agriculture. (2003). *National water quality handbook*. September, 1–368.

Navarro, M. O. (2007). Determinación de *Escherichia coli* Y coliformes totales en agua por el metodo de filtración por membrana en Agar Chromocult. *Ideam*, 3, 2–3.

- <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+A+gua+Filtración+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174>
- Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55. (1997). *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. Recuperado de [fao.org/3/W2598S/w2598s03.htm#capítulo 1](http://fao.org/3/W2598S/w2598s03.htm#capítulo%201) contaminación agrícola de los recursos h&iacut
- Peng, T. R., Lin, H. J., Wang, C. H., Liu, T. Sen, & Kao, S. J. (2012). Pollution and variation of stream nitrate in a protected high-mountain watershed of Central Taiwan: Evidence from nitrate concentration and nitrogen and oxygen isotope compositions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(8), 4985–4998. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2314-1>
- Ramirez, & Cardenosa, M. (1999). Indices de contaminacion para caracterizacion de aguas continentales y vertimientos. Formulaciones. *CT y F - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 1(5).
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. formulaciones y aplicación. *CT y F - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 1(3), 135–153.
- Raxhón, A. O. A. (2015). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL ÍNDICE SIMPLIFICADO DE CALIDAD DEL AGUA (ISQA) Y EL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA), APLICADOS AL MONITOREO DE AGUAS SUPERFICIALES EN EL RÍO LA QUEBRADA, EL FRUTAL. In *UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA*. <http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/wp-content/subidas/6ARTÍCULO-III-INDESA-SIE.pdf>
- REDACCIÓN MEDIOAMBIENTE. (2016). Cinco razones para proteger los páramos. *El Tiempo*, 1. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16505013>
- Restrepo, J., Suárez, C. A., & Álvarez, M. Y. (2008). Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales “Páramo de Berlín.” In *Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga*. https://corponor.gov.co/areasnaturalesestrategicas/descargas/DMI_Berlin_PMA_aprobado_agosto2008.pdf

- Richards, R. P. (1998). Estimation of pollutant loads in rivers and streams: A guidance document for {NPS} programs. *Project Report Prepared under Grant X, 998397*, 108.
- Rivera, J. (2008). *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la parte alta de la cuenca del Río Naranjo, ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango*. 162.
- Rodrigues, V., Estrany, J., Ranzini, M., de Cicco, V., Martín-Benito, J. M. T., Hedo, J., & Lucas-Borja, M. E. (2018). Effects of land use and seasonality on stream water quality in a small tropical catchment: The headwater of Córrego Água Limpa, São Paulo (Brazil). *Science of the Total Environment*, 622–623, 1553–1561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.028>
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2001). *QUÍMICA PARA INGENIERÍA AMBIENTAL-CLAIR N. SAWYER-CUARTA EDICIÓN-2.pdf* (p. 494).
- Suarez, D. (2007). Fósforo Total En Agua Por Digestion Acida, Método Del Acido Ascorbico. *Instituto De Hidrologia, Meteorología Y Estudios Ambientales*, 008(32), 1–10.
- Taniwaki, R. H., Cassiano, C. C., Filoso, S., Ferraz, S. F. de B., Camargo, P. B. de, & Martinelli, L. A. (2017). Impacts of converting low-intensity pastureland to high-intensity bioenergy cropland on the water quality of tropical streams in Brazil. *Science of the Total Environment*, 584–585, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.150>
- United States Environmental Protection Agency EPA. (1993). *Paired Watershed Study Design. Water quality for agriculture*. (n.d.).

Apéndices

Apéndice A Imágenes de enfoques de monitoreos cuencas pareadas y Aguas arriba-Aguas bajo.

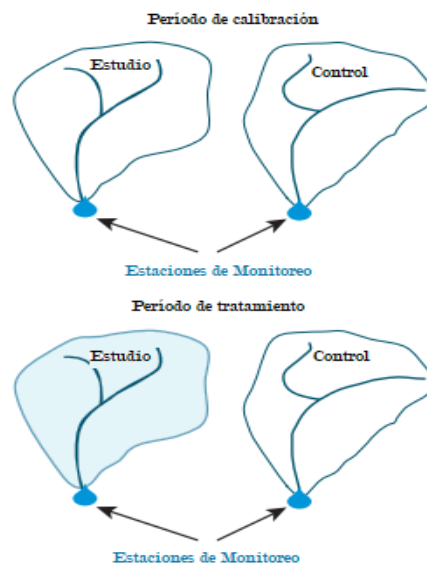


Figura A1 Modelo estándar del enfoque de monitoreo de cuencas pareadas. [10]

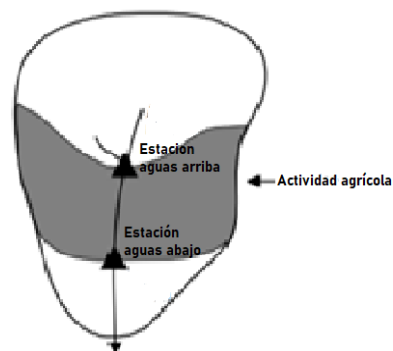


Figura A2 Modelo estándar del enfoque de monitoreo Aguas arriba-Aguas abajo [17]

Apéndice B Ecuación de referencia para calcular Índice simplificado de calidad del agua (ISQA)

$$ISQA = T * (A + B + C + D)$$

Donde:

T: temperatura del agua [°C]. Puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1 según:

$$T = 1 \text{ si } t \leq 20 \text{ °C}$$

$$T = 1 - (t - 20) \cdot 0,0125 \text{ si } t > 20 \text{ °C}$$

- A: demanda química de oxígeno en mg/L. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:

$$A = 30 - a \text{ si } a \leq 10 \text{ mg/L}$$

$$A = 21 - (0,35 \cdot a) \text{ si } 60 \text{ mg/L} \geq a > 10 \text{ mg/L}$$

$$A = 0 \text{ si } a > 60 \text{ mg/L}$$

- B: sólidos en suspensión totales (SST en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:

$$B = 25 - (0,15 \cdot SST) \text{ si } SST \leq 100 \text{ mg/L}$$

$$B = 17 - (0,07 \cdot SST) \text{ si } 250 \text{ mg/L} \geq SST > 100 \text{ mg/L}$$

$$B = 0 \text{ si } SST > 250 \text{ mg/L}$$

- C: oxígeno disuelto (O₂ en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:

$$C = 2,5 \cdot O_2 \text{ si } O_2 < 10 \text{ mg/L}$$

$$C = 25 \text{ si } O_2 \geq 10 \text{ mg/L}$$

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

$$D = (3,6 - \log CE) \cdot 15,4 \text{ si } CE \leq 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$$

$$D = 0 \text{ si } CE > 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$$

Tabla 1

Valores de referencia para calificar el ISQA [44]

Valor del Índice	Categoría	Descripción	Escala de color
90-100	Excelente	La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas; las condiciones son cercanas a los niveles naturales.	Azul
80-90	Buena	La calidad del agua está protegida contra un menor grado de amenazas; las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseados	Verde
70-80	Intermedia	La calidad del agua es ocasionalmente afectada; las condiciones a veces no cumplen con los niveles deseados.	Amarillo
60-70	Admisible	La calidad del agua es frecuentemente afectada; las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.	Naranja

Valor del Índice	Categoría	Descripción	Escala de color
0-60	Inadmisible	La calidad del agua es continuamente afectada; las condiciones no cumplen con los niveles deseados	Rojo

Apéndice C Ecuación de referencia para calcular Índice de calidad del agua ICA-IDEAM

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \right)$$

Donde

ICA_{njt} Es el Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.

W_i Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

I_{ikjt} Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada en el trimestre k, del período de tiempo t. n Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione' para el presente estudio se tomaron 6 parámetros.

Tabla 2.

Valores de ponderación de parámetros según IDEAM [21]

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD	% Saturación	0.17
sólidos suspendidos totales, SST	mg/L	0.17
Demanda Química de oxígeno, DQO	mg/l	0.17
Conductividad eléctrica, C.E.	μS/cm	0.17

Variable	Unidad de medida	Ponderación
pH	Unidades de pH	0.17
NT/PT (Nitrógeno total, potasio total)	-	0.17

Cada índice de las variables es calculado mediante las siguientes ecuaciones de referencia:

- Oxígeno disuelto

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * OD[\%sat])$$

si %OD>100 entonces la ecuación es:

$$I_{OD} = 1 - (0.01 * OD[\%sat] - 1)$$

- Solidos suspendidos totales (SST)

$$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST)$$

Si $SST \leq 4.5$ $I_{SST} = 1$

Si $SST \geq 320$ $I_{SST} = 0$

- Demanda Química de Oxígeno

Si $DQO \leq 20$, entonces $I_{DQO} = 0,91$

Si $20 < DQO \leq 25$, entonces $I_{DQO} = 0,71$

Si $25 < DQO \leq 40$, entonces $I_{DQO} = 0,51$

Si $40 < DQO \leq 80$, entonces $I_{DQO} = 0,26$

Si $DQO > 80$, entonces $I_{DQO} = 0,125$

- Conductividad eléctrica

$$I_{CE} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \text{ Log}(CE))}$$

$I_{CE} = 0$ si $CE = 0$

- pH

Si $pH < 4$, entonces $I_{pH} = 0,1$

Si $4 \leq pH \leq 7$, entonces $I_{pH} = 0,02628419 * e^{(pH * 0.520025)}$

Si $7 < pH \leq 8$, entonces $I_{pH} = 1$

Si $8 < pH \leq 11$, entonces $I_{pH} = e^{((pH-8)-0.5187742)}$

Si $pH > 11$, entonces $I_{pH} = 0,1$

- Nitrógeno total/Fosforo total (NT/PT)

Si $15 \leq NT/PT \leq 20$, entonces $I_{NT/PT} = 0,8$

Si $10 < NT/PT < 15$, entonces $I_{NT/PT} = 0,6$

Si $5 < NT/PT \leq 10$, entonces $I_{NT/PT} = 0,35$

Si $NT/PT \leq 5$ o $NT / PT > 20$ entonces $I_{NT/PT} = 0,15$

Tabla 3

Valores de referencia para ICA-IDEAM[21]

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0-0.25	Muy mala	ROJO
0.26-0.5	Mala	NARANJA
0.51-0.7	Regular	AMARILLO
0.71-0.9	Aceptable	VERDE
0.91-1	Buena	AZUL

Apéndice D Ecuaciones de referencia para calcular índices de contaminación

Tabla 4

Valores de referencia para calificación del ICO[23]

ICO	Contaminación	Escala de color
0-0.2	Ninguna	Azul
>0.2-0.4	Baja	Verde
>0.4-0.6	Media	Amarillo
>0.6-0.8	Alta	Naranja
>0.8-1	Muy alta	Rojo

Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{conductividad} + I_{dureza} + I_{alcalinidad})$$

Donde:

- Índice de conductividad

$$\log_{10} I_{conductividad} = -3.26 + 1.34 * \log_{10} \text{conductividad } \mu\text{S/cm}$$

$$I_{conductividad} = 10^{\log I_{conductividad}}$$

Conductividades mayores a 270 $\mu\text{S/cm}$, tienen un índice de conductividad=1

- Índice de dureza

$$\log_{10} I_{dureza} = -9.09 + 4.4 * \log_{10} \text{Dureza } [\text{g} * \text{m}^{-3}]$$

$$I_{dureza} = 10^{\log I_{dureza}}$$

Durezas mayores a 110 $[\text{g} * \text{m}^{-3}]$ tienen un índice de dureza=1

Durezas menores a 30 $[\text{g} * \text{m}^{-3}]$ tienen un índice de dureza=0

- Índice de alcalinidad

$$I_{alcalinidad} = -0.25 + 0.005 * alcalinidad [g*m^{-3}]$$

Alcalinidades mayores a 250[g*m-3] tienen índice de alcalinidad= 1

Alcalinidades menores a 50 [g*m-3] tienen índice de alcalinidad=0

Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 * Sólidos\ suspendidos\ totales [g*m^{-3}]$$

Sólidos suspendidos totales mayores a 340 [g*m-3] tienen un ICOSUS=1

Sólidos suspendidos totales menores a 10 [g*m-3] tienen un ICOSUS=0

Índice de contaminación por componente pH (ICOpH)

$$ICOpH = \frac{e^{-31.08} + 3.45 * pH}{1 + e^{-31.08+3.45*pH}}$$

Si pH es menor a 7 entonces pH=pH' donde pH'=14-pH

Índice de contaminación por componente trófico (ICOTRO)

El ICOTRO se fundamenta en la concentración del fósforo total y la concentración del fósforo total define por sí misma una categoría discreta, por tanto, el índice corresponde así:

Tabla 5

Valores de referencia para calificación del ICOTRO [45]

Fósforo total	
Concentración	Calidad
0.17	Deseable potable
<0.01	Oligotrófica
0.01-0.02	Mesotrófica
>0.02	Eutrófica

Apéndice E Parámetros analizados

Tabla 6.

Parámetros evaluados de calidad del agua.

Lugar de evaluación		Parámetros evaluados	Método de análisis
Parámetros <i>in situ</i>		pH	Potenciometría
		Conductividad eléctrica	Conductimetría
		Oxígeno disuelto	Electrodo de membrana
Laboratorio	SIAMA	Alcalinidad	SM 2320 B
S.A.S.		Dureza total	SM 2340 C
		Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	SM 5210 B, SM 4500 O H
		Demanda Química de Oxígeno (DQO)	SM 5220 C
		Fósforo reactivo total (Ortofosfatos)	SM 4500 P E
		Fósforo total	SM 4500-P B, E
		Nitratos	Método de espectrometría de absorción molecular, J. Rodier. 9ª Ed. 2009
		Nitritos	SM 4500-NO ₂ B
		Nitrógeno Amoniacal	SM 4500-NH ₃ B, C
		Nitrógeno Kjeldahl	SM 4500-Norg C
			SM 4500 NH ₃ B, C
		Oxígeno disuelto	SM 4500-O C
		Potasio total	SM 3030 F, SM 3111 B
		Sólidos suspendidos totales	SM 2540 D
	Sólidos totales	SM 2540 B	

Lugar de evaluación	Parámetros evaluados	Método de análisis
	Turbiedad	SM 2130 B
Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Industrial de Santander	<i>E. coli</i>	Filtración por membrana

Apéndice F Imágenes campaña de muestreo y monitoreo, páramo de Berlín, febrero 2020



Figura F. Aforos en puntos de muestreo



Figura F2 Mediciones de pH y CE en puntos de muestreo



Figura F3. Medición de oxígeno disuelto



Figura F4 Fuente: Elaboración Propia.



Figura F5 Adición de reactivos a muestras de laboratorio (oxígeno disuelto)



Figura F6 Análisis de E. coli mediante el método de filtración por membrana.

Apéndice G Rango de valores de los caudales obtenidos para cada punto, campaña de febrero 2020

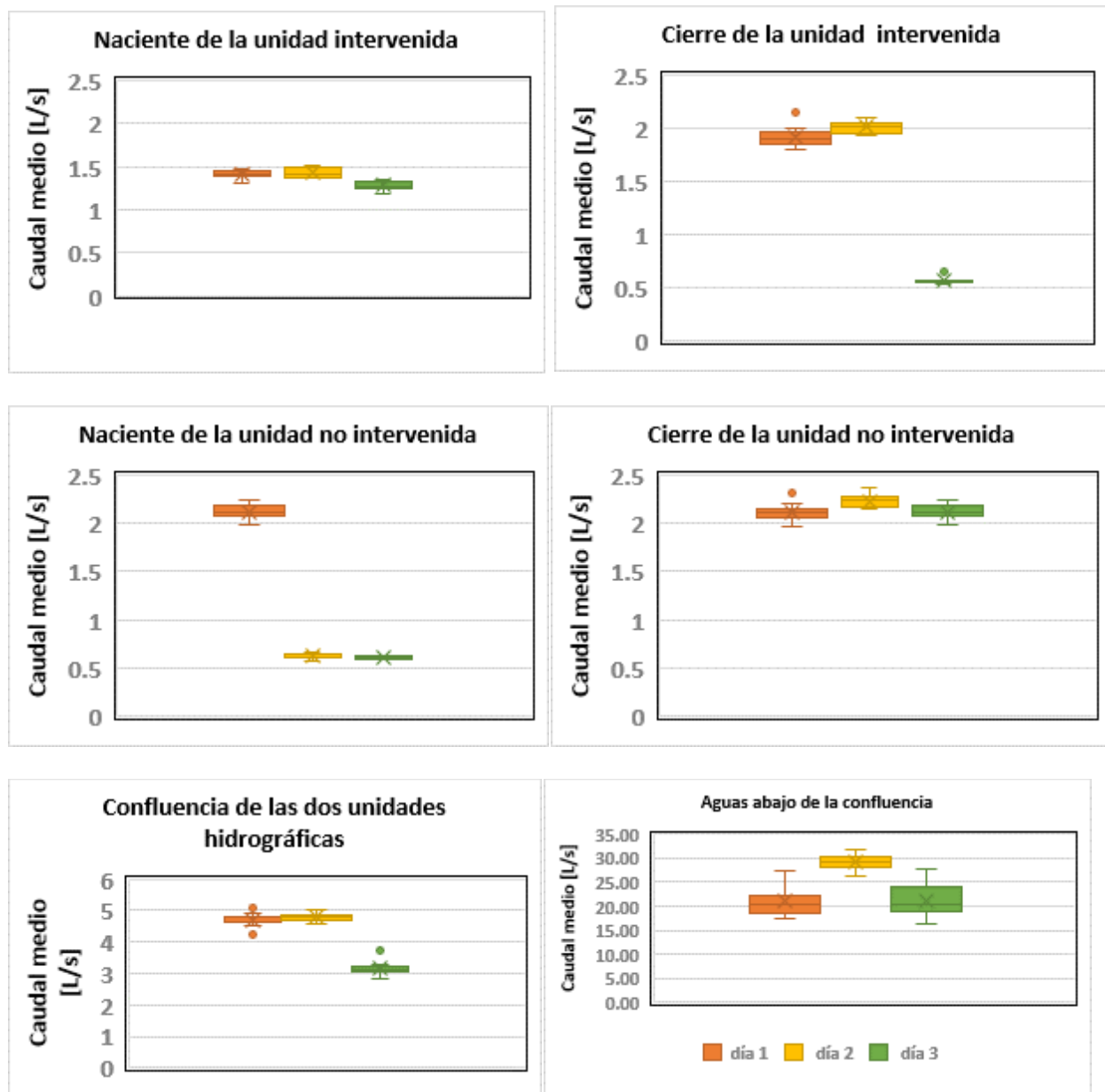
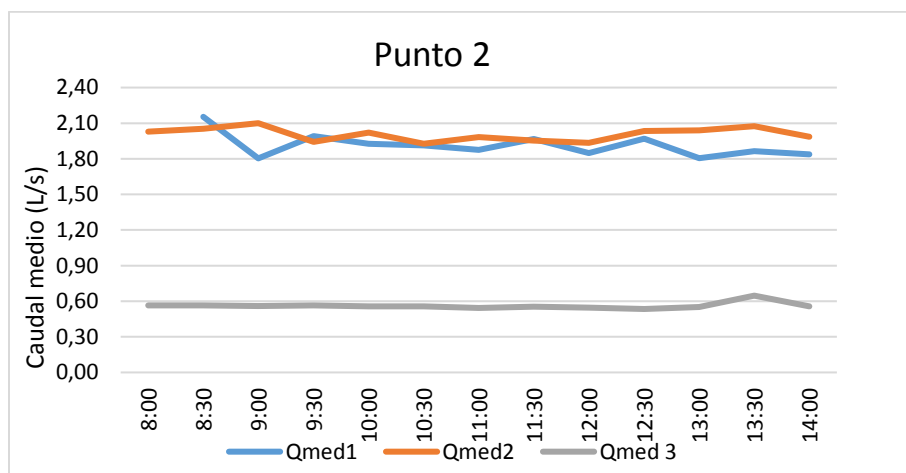
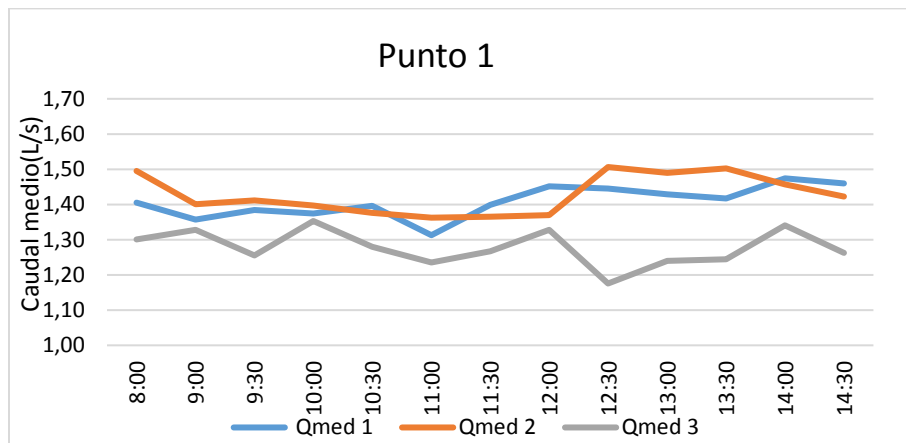
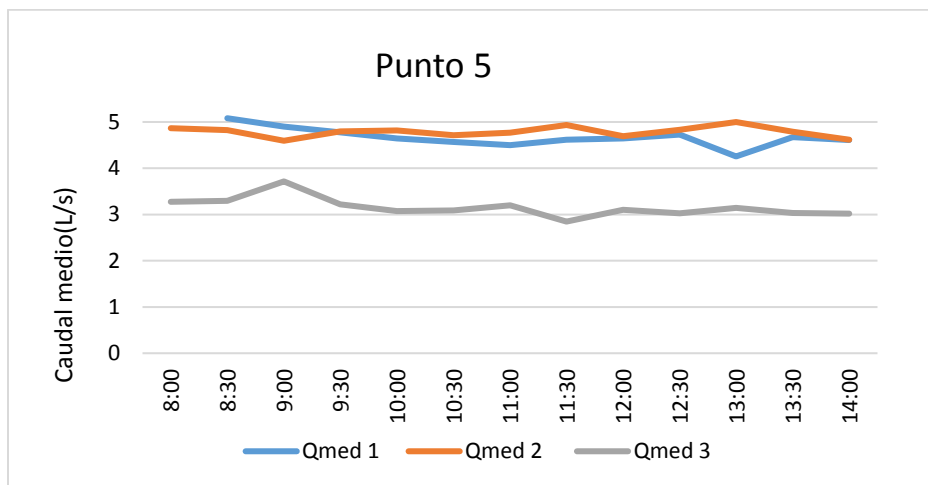
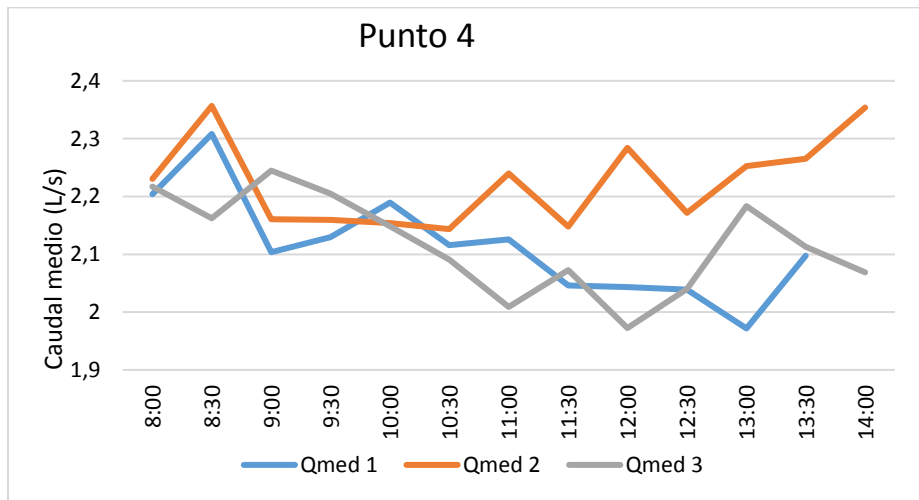
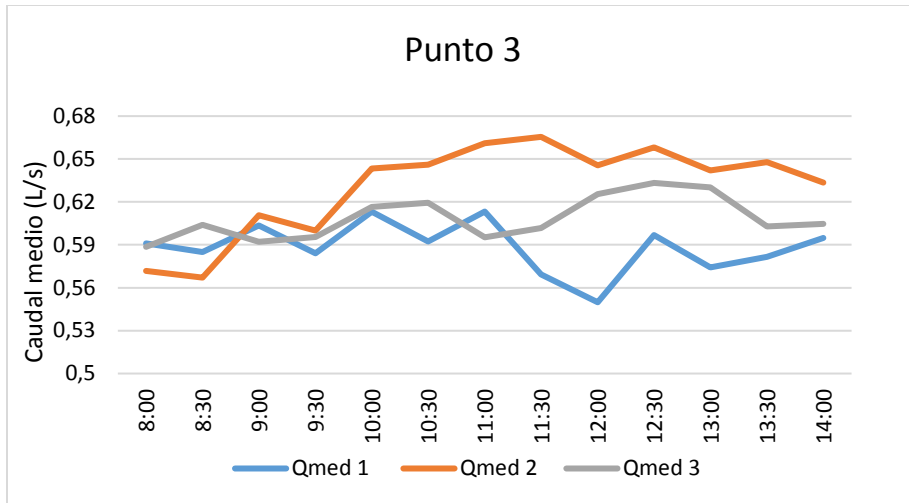
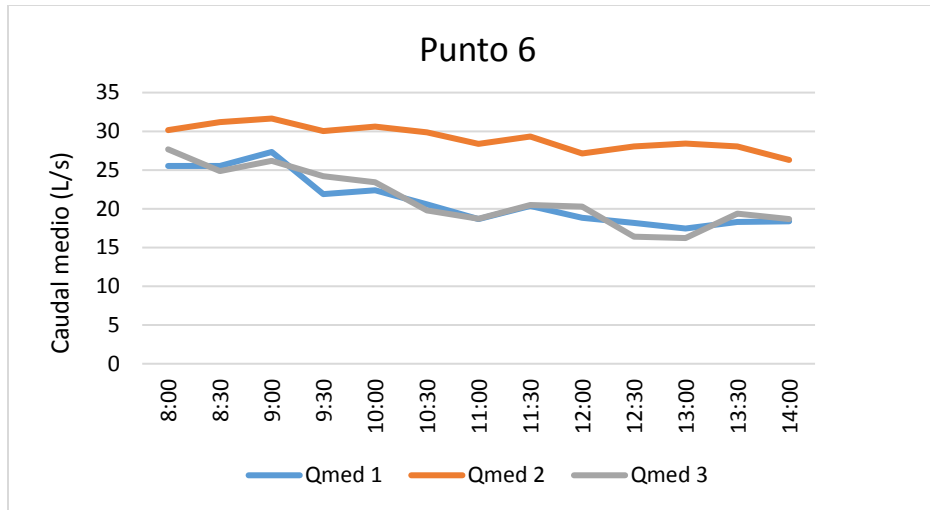


Figura F1 Rango de valores de los caudales obtenidos para cada punto.

Apéndice H Grafica de caudales registrados para cada punto de muestreo







Apéndice I Graficas de precipitación y conductividad eléctrica evaluadas en el área de estudio, campaña febrero 2020

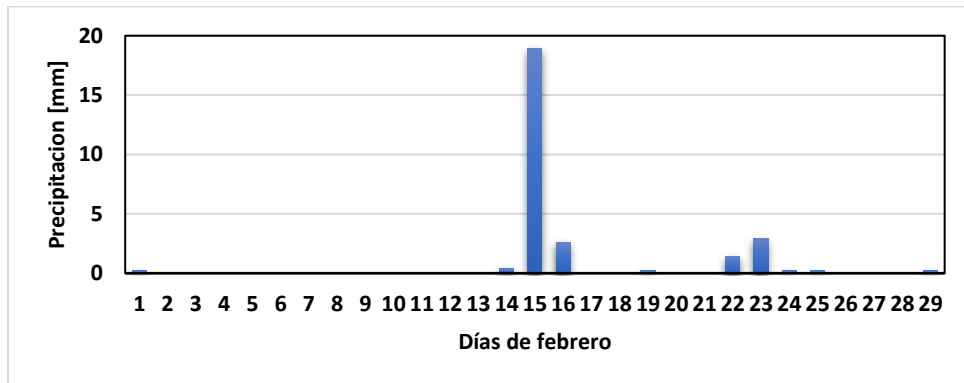


Figura H1 Registro de precipitación para el mes de febrero de 2020. Fuente: GPH-UIS, 2020.[25]

Apéndice J Grafica de variación de pH en todos los puntos de muestreo, campaña febrero 2020

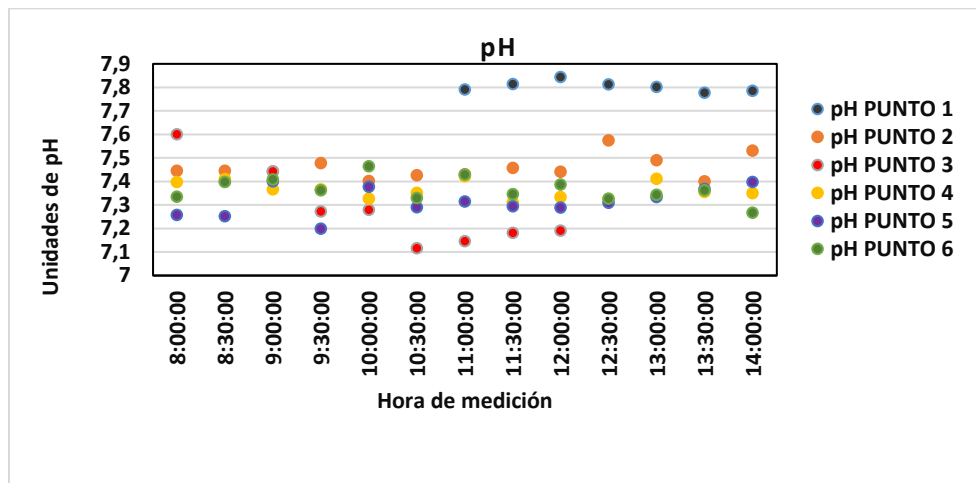
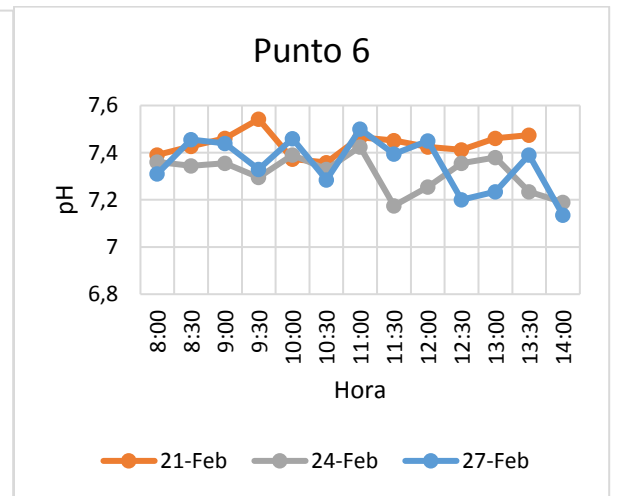
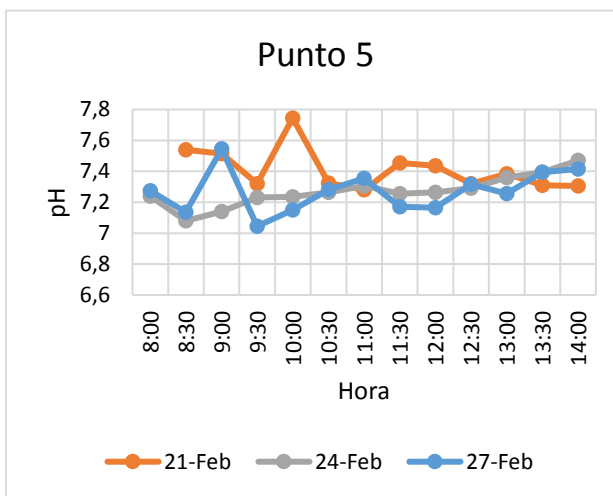
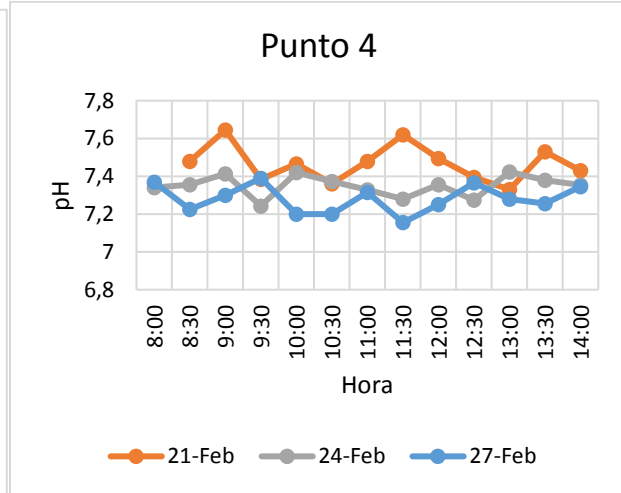
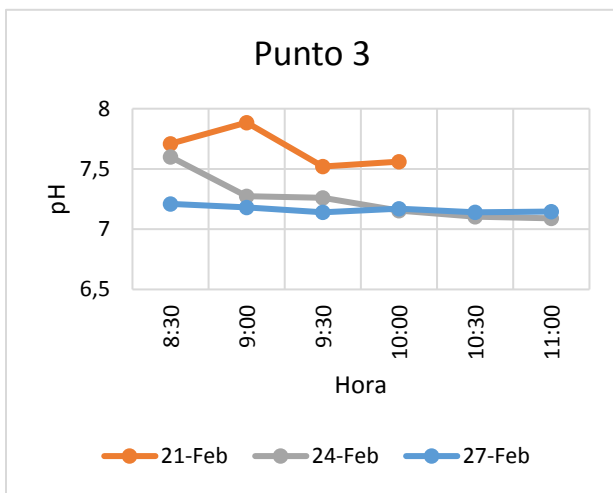
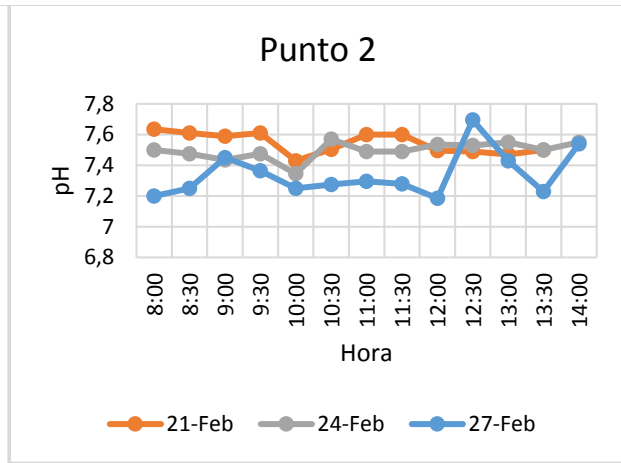
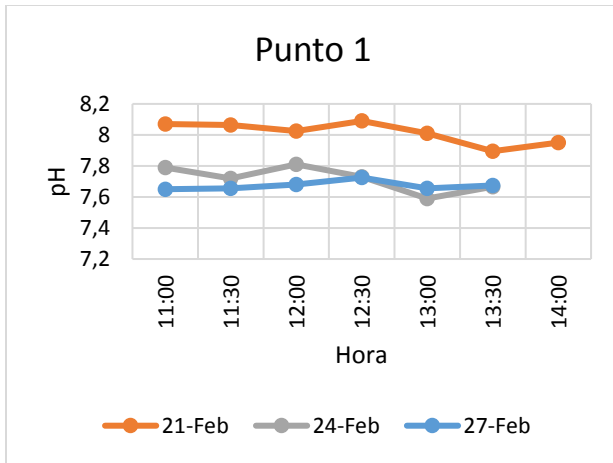
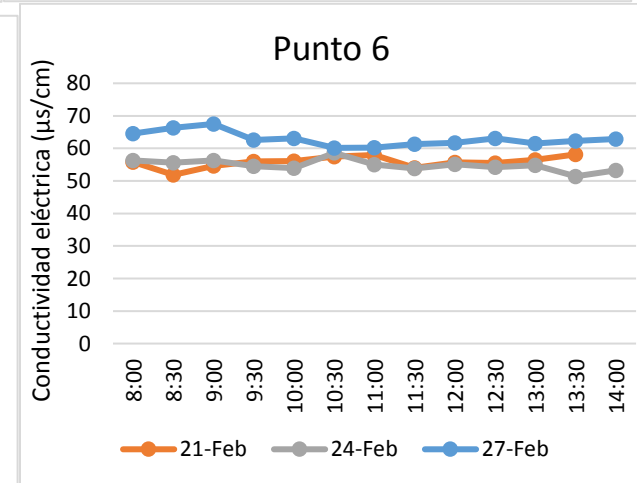
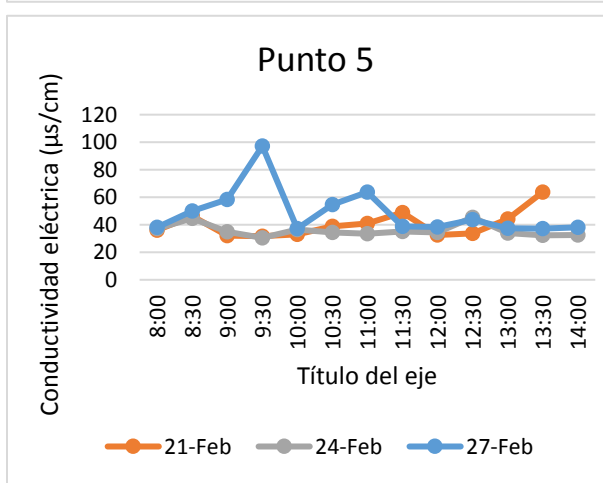
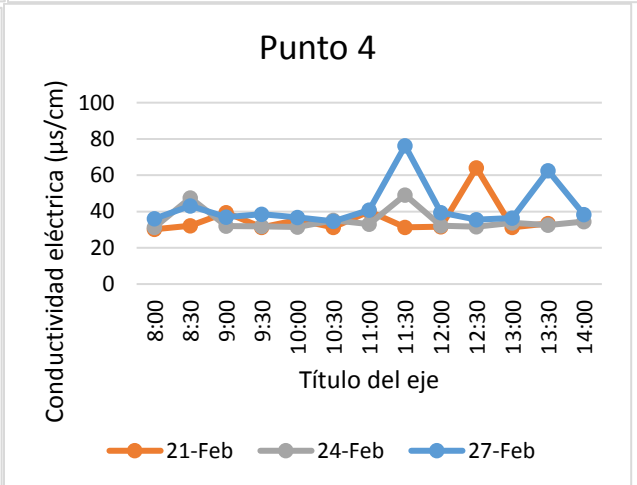
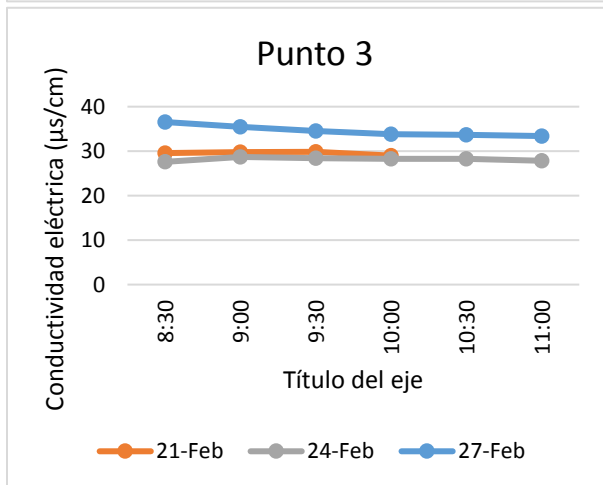
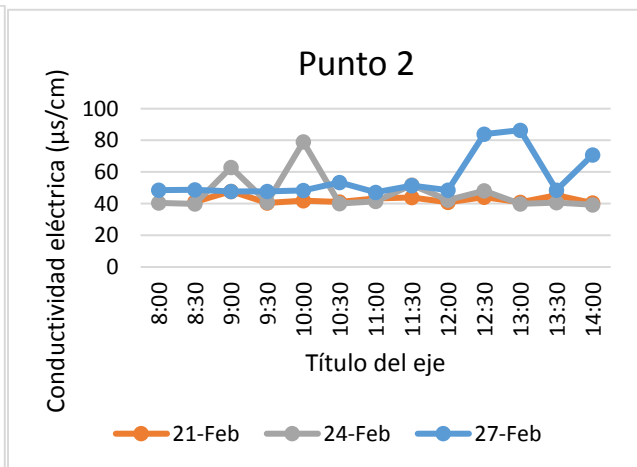
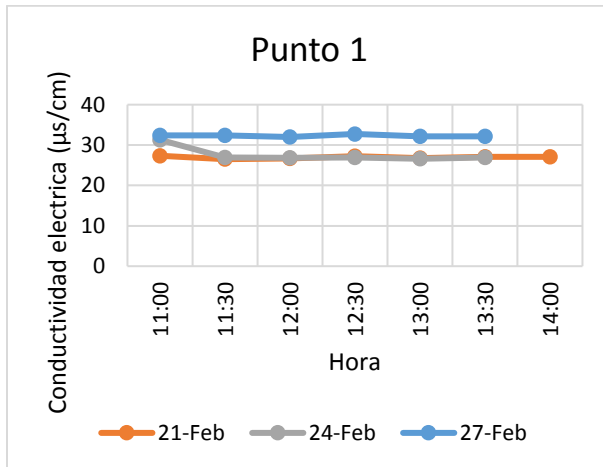


Figura F3 Valores promedio de pH obtenidos durante la campaña de muestreo febrero 2020.



Apéndice K Graficas de CE



Apéndice L. Grafica de variación de conductividad eléctrica en todos los puntos de muestreo, campaña febrero 2020

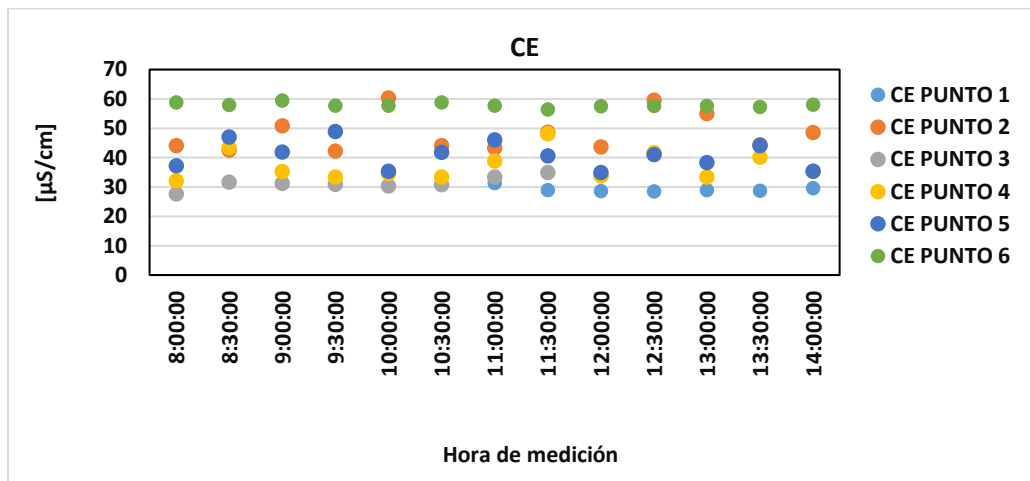


Figura F4 Valores promedio de conductividad eléctrica obtenidos durante la campaña de muestreo febrero 2020.

Apéndice L Resultados de parámetros en el laboratorio

Tabla 7L.

Resultados laboratorio SIAMA de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	PUNTO	RESULTADOS LABORATORIO SIAMMA														
		ALCA. TOTAL	DBO5	DQO	DUREZA	P REACT.	P TOTAL	NITRATO	NITRITOS	N-NH3	N KJE	OD	K TOTAL	SST	ST	TURB
Unidad		[mg CaCO ₃ /L]	mg O ₂ /L]	mg O ₂ /L	[mg CaCO ₃ /L]	[mg P-PO ₄ /L]	[mg P/L]	[mg NO ₃ -N/L]	[mg NO ₂ -N/L]	[mg N/L]	[mg N/L]	mg O ₂ /L	[mg K/L]	[mg/L]	[mg/L]	[NTU]
Viernes 21 de feb	1	16.7	1.7	4.8	10.4	0.016	0.017	0	0	0.34	0.34		0.4	1.5	33	0.67
	2	15	1.9	5.6	14.2	0.03	0.06	1.47	0	0.17	0.17		0.69	3.3	54	1
	3	16.2	1.9	4	10.8	0.03	0.03	0.01	0	0	0.21		0.55	5.5	52	2.6
	4	15.7	1.9	9.6	11.2	0.02	0.04	0.18	0	0.28	0.28		0.3	2.3	49	1.51
	5	14.6	1.9	8	12.4	0.02	0.06	0.68	0	0.17	0.17		0.43	35	84	14
	6	16.7	1.7	8	19.6	0.02	0.03	2.48	0	0.11	0.11		1.04	8.8	76	4.1
Lunes 24 de feb	1	16	1.7	2.44	10	0.01	0.02	0	0	0.45	0.45		0.2	3.8	37	1.46
	2	14.9	1.9	3.2	12.2	0.02	0.03	1.62	0	0.34	0.5		0.44	5.8	60	2
	3	16	1.7	2.4	10.6	0.02	0.03	0.03	0	0.22	0.45		0.33	6.8	46	2.4
	4	15.5	0.8	0.8	9.4	0.02	0.04	0.2	0	0.11	0.28		0.3	4.8	49	2.3
	5	14.7	1.9	11.2	12.2	0.02	0.05	0.72	0	0.06	0.39		0.45	18	80	10.2
	6	15.6	1.7	3.2	18	0.01	0.02	2.52	0.004	0.17	0.45		1.02	8	90	6.2
Jueves 27 de feb	1	15.6	1.7	4	10	0.02	0.02	0	0	0	0.06	7.28	0.2	1.5	35	1.1
	2	17.3	1.6	6.4	13.2	0.02	0.04	1.1	0	0.28	0.28	6.68	0.53	13.5	78	5.8
	3	16.7	1.4	5.6	9.4	0.02	0.03	0.03	0	0.22	0.22	6.76	0.31	0.5	39	0.66
	4	16.1	1	5.6	9.4	0.02	0.04	0.21	0.001	0.17	0.17	6.72	0.31	17	66	5.6
	5	15.7	1.9	12.8	11.4	0.02	0.04	0.35	0.002	0.9	0.9	6.34	0.41	19.5	70	8.3
	6	16.4	1.1	7.2	18.8	0.01	0.04	2.68	0.005	0.34	0.36	6.06	0.96	17.3	100	9.7

Apéndice M Resultados de parámetros *in-situ* y obtenidos en el GPH-UIS

Tabla 8

Resultados de parámetros *in-situ* y analizados en el laboratorio del grupo de investigación GPH-UIS

Parámetro	PUNTO	Parámetros <i>In-situ</i>								GPH
		pH	T°	CE	T°	OD	T°	OD %	Q	E. coli
Unidad		Unidades de pH	°C	µS/cm	°C	MgO ₂ /L	°C		(L/s)	UFC/100mL
Viernes 21 de feb	1	8.02	10.78	26.96		7.22	10.5	97.8	1.41	24
	2	7.54	15.43	42.34	16.7	6.975	12.15	97.2	1.91	2525
	3	7.67	10.45	29.54	11.3	6.69	11.4	92.2	0.59	610
	4	7.47	15.42	35.32	16.4	6.915	11.75	95.75	2.11	368
	5	7.41	17.71	40.18	18.4	6.815	13.4	97.8	4.67	5800
	6	7.44	13.71	55.79	17.1	7.25	106.8	14.7	19.24	881
Lunes 24 de feb	1	7.72	9.57	27.59		7.31	10.2	97	1.43	123
	2	7.50	13.60	46.81	15.5	7.09	11.95	98.2	2.01	2328
	3	7.25	10.53	28.20	11.3	6.14	14.25	91	0.63	150
	4	7.35	13.57	34.24	14.9	7.07	12.1	98.6	2.22	298
	5	7.27	15.13	35.81	16.3	7.015	12.1	97.7	4.79	800
	6	7.31	12.19	54.82	14.4	7.055	12.7	99.2	28.46	240
Jueves 27 de feb	1	7.67	10.02	32.33		7.53	9.7	100.15	1.28	54
	2	7.34	14.29	55.42	15.1	6.975	11.75	96.4	0.56	4000
	3	7.17	10.99	34.54	11.3	6.5	12.8	92.7	0.61	1270
	4	7.28	14.28	42.00	15.5	6.83	12.2	95.5	2.12	235
	5	7.27	16.45	49.05	17.3	6.75	14.5	99.2	3.16	1132
	6	7.35	13.52	62.85	15.6	6.9	15.8	100	21.25	251

Apéndice N Rangos de referencia para consumo y riego

Tabla 10

Normativas para consumo y riego

	Parámetro	Unidad	Máximo	Mínimo	Rangos admisibles para consumo	Referencia	Admisible	Rangos admisibles para riego	Admisible	Referencia
Resultados Laboratorio SIAMA S.A.S	ALCA. TOTAL	[mg CaCO3/L]	17.3	14.9	< 200	[44], [48]	Si	-	-	-
	DBO5	mg O2/L]	1.9	0.8	< 1.5	[27], [44], [48]	No	-	-	-
	DQO	mg O2/L	9.6	0.8	-	-	-	-	-	-
	DUREZA	[mg CaCO3/L]	14.2	9.4	< 100	[27], [44]	Si	-	-	-
	P REACT. TOTAL	[mg P-PO4/L]	0.03	0.01	< 0,5	[44]	Si	< 2	Si	[29]
	P TOTAL	[mg P/L]	0.06	0.017	< 0,5	[44]	Si	< 2	Si	[29]
	NITRATO	[mg NO3-N/L]	1.62	0	< 10	[44]	Si	< 10	Si	[29]
	NITRITOS	[mg NO2-N/L]	0.001	0	< 0.1	[44]	Si	-	-	-
	N-NH3	[mg N/L]	0.45	0	-	-	-	< 5	Si	[29]
	OD	mg O2/L	7.28	6.68	> 4	[48]	Si	-	-	-
	K TOTAL	[mg K /L]	0.69	0.2	-	-	-	< 2	Si	[29]
	SDT	[mg/L]	17	0.5	-	-	-	< 2000	Si	[29]
	TURB	[NTU]	5.8	0.66	< 2	[44]	No	-	-	-
E. coli	UFC/100 MI	690	56	0	[44]	No	-	-	-	
Parámetros In situ	pH	Unidades de pH	8.015	7.169375	6,5 - 9,0	[44]	Si	6,5 - 8,4	Si	[29]
	CE	μS/cm	55.4230769	26.9571429	< 1000	[44]	Si	< 3000	Si	[29]

Apéndice O Resultados ICAs e ICOs

Tabla 11.

Resultados índices de calidad y contaminación para cada punto por día de campaña

	PUNTO	ISQA	ICA-IDEAM	ICOMI	ICOMO	ICOSUS	ICOPH	ICOTRO
Viernes 21 de feb	1	96.75	0.87	0.015	0.007	0	0.031	Mesotrófica
	2	92.44	0.81	0.027	0.009	0	0.006	Eutrófica
	3	95.10	0.84	0.017	0.049	0	0.009	Eutrófica
	4	89.51	0.85	0.021	0.014	0	0.004	Eutrófica
	5	85.22	0.80	0.025	0.007	0.085	0.004	Eutrófica
	6	88.35	0.80	0.040	0	0	0.004	Eutrófica
Lunes 24 de feb	1	98.86	0.82	0.015	0.01	0	0.011	Mesotrófica
	2	94.22	0.92	0.031	0.006	0	0.005	Eutrófica
	3	95.40	0.91	0.016	0.03	0	0.002	Eutrófica
	4	98.37	0.85	0.021	0.004	0	0.003	Eutrófica
	5	84.01	0.84	0.022	0.007	0.034	0.002	Eutrófica
	6	92.88	0.80	0.039	0.002	0	0.002	Mesotrófica
Jueves 27 de feb	1	97.27	0.82	0.019	0	0	0.009	Mesotrófica
	2	88.50	0.83	0.040	0.061	0.020	0.003	Eutrófica
	3	92.87	0.85	0.021	0.024	0	0.001	Eutrófica
	4	90.00	0.80	0.028	0.015	0.031	0.002	Eutrófica
	5	80.80	0.80	0.033	0.153	0.038	0.002	Eutrófica
	6	86.31	0.83	0.047	0.198	0.031	0.003	Eutrófica