

**ANÁLISIS DE LA PERTURBACIÓN ANTRÓPICA DE LAS QUEBRADAS  
DIOS TE DÉ Y LORENZO EN EL MUNICIPIO DE SUAREZ CAUCA  
MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA,  
ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN Y HUELLA HÍDRICA GRIS**

**LUIS ERNESTO GUTIÉRREZ PEDRAZA**

**Estudiante de Ingeniería Ambiental**

**Código estudiantil: 104912020617**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2019**

**ANÁLISIS DE LA PERTURBACIÓN ANTRÓPICA DE LAS QUEBRADAS  
DIOS TE DÉ Y LORENZO EN EL MUNICIPIO DE SUAREZ CAUCA  
MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA,  
ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN Y HUELLA HÍDRICA GRIS**

**LUIS ERNESTO GUTIÉRREZ PEDRAZA**  
Estudiante de Ingeniería Ambiental

**Propuesta de trabajo de grado modalidad investigación como requisito parcial  
para optar al título de Ingeniero Ambiental**

**DIRECTOR:**

**Ms.c JOSÉ ANTONIO GALLO CORREDOR**

**CODIRECTOR:**

**Ph.D. NAZLY EFREDIS SÁNCHEZ PEÑA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2019**

## Nota de aceptación

El director y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio.



---

Firma del director José Antonio Gallo

---

Firma del Jurado Darwin Hoyos

---

Firma del Jurado Rodrigo Sarria

## **Agradecimientos**

*En estas líneas expreso mi agradecimiento a todas y cada una de las personas que me acompañaron en el transcurso de mi formación profesional y en especial de esta investigación, a todas las personas que de alguna forma estuvieron en los momentos difíciles y alegres; en especial a mi familia por darme apoyo incondicional, amor y compañía a lo largo de toda mi formación. Gracias a Dios por sus bendiciones y brindarme la fortaleza para continuar, a mis amigos y profesores por brindarme una amistad y ayuda desinteresadamente. Agradezco de manera especial por las asesorías y acompañamiento por parte del director Antonio Gallo y la Codirectora Nazly Sánchez.*

*Quiero agradecer a la Universidad del Cauca por la formación académica, al grupo de investigación GIQA y el departamento de ingeniería ambiental quienes facilitaron el uso de las instalaciones y préstamo de las herramientas para el desarrollo de este trabajo y a la comunidad de Suárez, en especial las veredas de Maravélez y la Turbina quienes me abrieron sus puertas y compartieron sus conocimientos y guía para el desarrollo de este trabajo.*

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	5
TABLA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE ANEXOS .....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVOS.....	14
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	14
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
5. MARCO DE REFERENCIA.....	15
5.1 ANTECEDENTES .....	15
5.2 MARCO TEÓRICO .....	18
5.2.1 Índices de calidad del agua.....	18
5.2.2 Índices de contaminación del agua.....	19
5.2.3 Huella hídrica gris (HHG) .....	20
5.3 MARCO LEGAL .....	21
6. METODOLOGÍA.....	22
6.1 Área de estudio.....	22
Fuente: Elaboración propia.....	23
6.2 Identificación de focos de contaminación .....	23
6.3 Evaluación de la calidad del agua.....	24
6.4 Efecto de los vertimientos de aguas residuales de las unidades de producción minera (UPM).....	30
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32

7.1 Focos de contaminación identificados.....	32
7.3 Evaluación de la calidad del agua.....	37
7.4 Efecto de los vertimientos de aguas residuales de las unidades de producción minera (UPM).....	53
7.5 Resultados estadísticos .....	59
8. CONCLUSIONES.....	64
9. RECOMENDACIONES .....	66
REFERENCIAS .....	67
ANEXOS .....	82

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Índices de contaminación. ....	19
<b>Tabla 2.</b> Coordenadas de los puntos de muestreo.....	25
<b>Tabla 3.</b> Parámetros Fisicoquímicos y microbiológicos.....	28
<b>Tabla 4.</b> Índices de Calidad y Contaminación del agua.....	28
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de índices de calidad y contaminación .....	29
<b>Tabla 6.</b> Ubicación de unidades productivas mineras (UPM) estudiadas. ....	31
<b>Tabla 7.</b> Respuesta a encuestas del área de estudio Quebrada Dios te Dé. ....	34
<b>Tabla 8.</b> Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Quebrada Dios te Dé. ....	38
<b>Tabla 9.</b> Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Quebrada Lorenzo .....	38
<b>Tabla 10.</b> Clasificación del Índice de calidad del agua .....	46
<b>Tabla 11.</b> Índices de contaminación. ....	50
<b>Tabla 12.</b> Huella Hídrica Gris.....	57
<b>Tabla 13.</b> Resultados estadísticos de parámetros analizados en laboratorio, Quebrada Dios te Dé .....	60
<b>Tabla 14.</b> Resultados estadísticos de parámetros analizados en laboratorio, Quebrada Lorenzo.....	61
<b>Tabla 15.</b> Resultados del análisis de varianza Quebrada Dios te Dé.....	62
<b>Tabla 16.</b> Resultados del análisis de varianza Quebrada Lorenzo (ANOVA). ....	62
<b>Tabla 17.</b> Resultados del análisis de varianza Quebrada Lorenzo (Tukey).....	63

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Área de estudio.....	23
<b>Figura 2.</b> Estaciones de muestreo. <b>A.</b> Microcuenca Lorenzo y <b>B.</b> Microcuenca Dios te Dé.....	26
<b>Figura 3.</b> Mapa de ubicación de Unidades de Producción minera (UPM), Vereda Maravélez. ....	30
<b>Figura 4.</b> Fuentes de contaminación Quebradas Dios te Dé y Lorenzo. <b>A.</b> Casas rurales Microcuenca Dios te Dé. <b>B.</b> Casas rurales Microcuenca Lorenzo. <b>C.</b> U.P.M y minas. ....	33
<b>Figura 5.</b> Aporte de sedimentos de las minas a la quebrada.....	36
<b>Figura 6.</b> Calidad del agua de las quebradas Dios Te Dé y Lorenzo.....	48
<b>Figura 7.</b> Proceso de extracción de Oro.....	54
<b>Figura 8.</b> Vertimiento de los dos tipos de UPM .....	55



## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Encuesta General Sobre el Recurso Hídrico y Saneamiento Básico.....	82
<b>Anexo 2.</b> Mapa de coberturas Vegetales, Quebrada Dios te Dé y Lorenzo. ....	84
<b>Anexo 3.</b> Mapa de pendiente y perfiles de elevación del cauce principal de las quebradas Dios te Dé y Lorenzo.....	85
<b>Anexo 4.</b> Cálculo tipo del índice de calidad del agua ICA – IDEAM .....	87
<b>Anexo 5.</b> Cálculo tipo de los índices de contaminación ICOS .....	88
<b>Anexo 6.</b> Cálculo tipo de la Huella Hídrica Gris (HHG) .....	89
<b>Anexo 7.</b> Evidencias de Campo .....	90

## INTRODUCCIÓN

El agua se ha tratado y gestionado tradicionalmente como si fuese un recurso ilimitado debido a su naturaleza renovable; sin embargo, el incremento de su uso trajo consigo un acelerado deterioro en su calidad, ocasionadas principalmente por el crecimiento y actividades económicas de la población. (López, Figueroa & Corrales, 2016).

Históricamente en Colombia se ha realizado la extracción de oro, este tipo de producción minera se ha hecho en gran medida a través de la minería artesanal y a pequeña escala, estas se caracterizan por escasa tecnificación, uso intensivo de mano de obra no calificada y bajos márgenes de producción (Pantoja y Pantoja, 2016). La minería siempre ha representado un renglón importante en la economía local y regional de Colombia, los gobiernos de turno han dirigido su mirada al sector minero, proyectándolo como uno de los mayores promotores para el crecimiento de la economía (Gómez & Rojas, 2014). Los departamentos como Chocó, Antioquia y Cauca son pilares en extracción de minerales preciosos que se exportan a países altamente industrializados (Pérez & Betancur, 2016).

Aunque esta actividad contribuye de manera significativa al desarrollo económico en Colombia, la riqueza aparente resultante de la extracción de oro contrasta con la pérdida de los ecosistemas, la salud y el deterioro social en las comunidades (Turizo et al., 2014), generando impactos ambientales y sociales ya que comprometen la cantidad y calidad de los servicios ecosistémicos y en consecuencia la calidad de vida (Gamboa, 2015); “la calidad de vida de la población de las zonas de explotación de minerales no sólo no mejoró, sino que, en la mayoría de los casos, vio consolidar su retraso en contraste con otras regiones” (Silva, 2014).

En el caso del municipio de Suárez se registra impacto sobre los recursos naturales, paisaje y vegetación (Alcaldía Municipal Suárez-Cauca, 2016), observándose un deterioro en la calidad y pérdida de los recursos naturales, en especial los cuerpos de agua, por ende se hizo necesario investigar y conocer el estado de los recursos hídricos,

ya que en el área estudiada la principal actividad económica es la extracción del mineral aurífero.

La investigación se realizó teniendo como objetivo el conocer la calidad del agua de las quebradas Lorenzo y Dios Te Dé ejecutada bajo el proyecto de valoración de los servicios ecosistémicos del recurso hídrico asociado a minería artesanal de oro en las veredas Maravélez, Miravalle, La Turbina y Tamboral, a fin de generar bases técnicas que favorezcan la ejecución de planes de ordenamiento del recurso hídrico destinados a mejorar la calidad de vida de las comunidades aledañas a las quebradas.

Por ello en el presente documento se exponen los siguientes ítems que contribuyeron al conocimiento de la calidad del agua en las quebradas estudiadas al momento de realizar este estudio.

- Focos de contaminación hallados en la zona de estudio.
- Calidad de las quebradas estudiadas mediante la aplicación del índice de calidad del agua e índices de contaminación.
- Efecto encontrado por los vertimientos de las unidades de producción minera mediante la huella hídrica gris.

Con lo hallado se contribuyó al conocimiento acerca de la inferencia que tienen las diferentes actividades antrópicas en la zona sobre la calidad de agua en las quebradas. Estos datos de referencia pueden servir de apoyo en procesos de gestión del recurso hídrico, monitoreo y seguimiento de la calidad del agua en la zona estudiada.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las actividades productivas del hombre y el consumo de agua de las poblaciones humanas generan aguas residuales y producción de desechos, los que constituyen contaminantes que menoscaban la calidad del agua de los cuerpos superficiales (Chán & Peña, 2014); dichas fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos, estas permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales (Torres, Cruz & Patiño, 2009).

Es importante resaltar que el uso del agua aumenta a nivel mundial, en función del crecimiento poblacional, el desarrollo económico y los patrones de consumo cambiantes, entre otros factores (WWAP, 2018), por ende las actividades insostenibles deterioran la calidad del agua y genera consecuencias sobre la salud humana, los ecosistemas, la biodiversidad, la producción de alimentos y el crecimiento económico. Si bien la mejora de la calidad del agua en todo el mundo es esencial para el desarrollo sostenible; los datos confiables son escasos, especialmente en áreas remotas y países en desarrollo donde faltan redes de monitoreo y capacidad (UNESCO, 2018).

Colombia tiene un potencial hídrico tres veces mayor que el promedio suramericano y seis veces mayor que la oferta hídrica específica promedio mundial (IDEAM, 2010); aun así en el país se contaminan las aguas superficiales principalmente por el escurrimiento de agua de zonas de producción ganadera y agrícola, las aguas residuales industriales y domésticas, y las aguas procedentes de la minería, principalmente del oro, que vierten a nuestros ríos más de 200 toneladas de mercurio al año; Las actividades antrópicas han alterado, también, el agua en términos del incremento de su carga sólida por descarga de sedimentos (Villafrades, 2017).

En el departamento del Cauca existen diferentes formas de explotación minera, el sistema a cielo abierto con el azufre y la bauxita en Morales (Pérez, 2014); la minería subterránea representada por la pequeña y mediana minería del oro y carbón particularmente en las estribaciones de la Cordillera Occidental en El Tambo, Suárez

y Buenos Aires; y la minería aluvial, que se aplica en la extracción de oro y gravas, tanto manual como mecanizada (Ponce, 2005), como resultado de dicha actividad las perturbaciones ambientales producidas dejan en el camino una alta variedad de contaminantes; estos se difunden en el entorno y dan lugar a problemas de contaminación del agua, el aire y el suelo (Li et al., 2017).

Para el caso particular del municipio de Suárez se evidencian grandes problemas a nivel ambiental repercutiendo sobre las fuentes hídricas, ocasionando un aporte de sedimentos, introducción a los ecosistemas de metales pesados, además de otros contaminantes; contribuyendo al deterioro y pérdida del equilibrio de los ecosistemas, alterando las cotas de inundación y generando variaciones en los cauces de las cuencas, taponamientos y problemas de salud en las comunidades aledañas a estas fuentes de agua, todo esto como resultado del procesos de extracción de minerales (CRC, 2006).

Esta problemática se está presentando actualmente en las veredas Maravélez y la Turbina de Suárez – Cauca, donde las comunidades realizan actividades extractivas de oro, generando el vertimiento de las aguas residuales de esta actividad a los cuerpos de agua, alterando así los parámetros fisicoquímicos y con ello el ecosistema acuático; estos efectos desencadenan con el tiempo en posibles consecuencias en la salud pública de la comunidad, por lo cual se hace necesario estudiar y monitorear la calidad de agua actual de las quebradas Dios te Dé y Lorenzo, a fin de generar bases técnicas que permitan la toma de decisiones futuras.

Dado lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Se ve afectada la calidad del agua de las quebradas Dios Te Dé y Lorenzo a causa de las actividades antrópicas por parte de la comunidad de las veredas Maravélez y La Turbina en el municipio de Suárez - Cauca?.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de cualquier actividad antrópica genera una serie de impactos y repercusiones que se ponen de manifiesto en las condiciones ambientales propias del territorio en el cual se llevan a cabo; sin embargo, se debe tener presente que existen actividades que generan mayor alteración ambiental que otras, tal es el caso de la minería (Pérez & Betancur, 2016); en un país como Colombia gracias a su diversidad de ambientes, dispone de una variada oferta de productos mineros, entre los que se incluyen carbón, oro, platino, níquel, esmeraldas y caliza; dicho esto la extracción de minerales está generando uno de los mayores impactos negativos sobre los recursos naturales del país (Güiza, 2011).

Uno de los recursos con mayor afectación es el agua debido al uso insostenible y los constantes vertimientos de aguas residuales; por ende se debe hacer uso de herramientas que permitan reducir los efectos negativos; una de las más importantes es el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos el cual tiene el desafío de proporcionar las bases para proteger el medio ambiente contra los efectos biológicos adversos de la contaminación química antropogénica de fuentes difusas y puntuales (Altenburger et al., 2015).

La evaluación de la calidad de las fuentes hídricas mediante los índices de calidad del agua (ICA), aporta un análisis general de la calidad del agua en diferentes niveles y contribuye a conocer la vulnerabilidad del cuerpo de agua frente a amenazas potenciales (Soni & Thomas, 2014), otros elementos que aportan conocimiento acerca del nivel de contaminación del agua son los índices de contaminación (ICOs) que mediante la agrupación de variables fisicoquímicas que denotan la misma condición ambiental. Lo mencionado agiliza y contribuye en el proceso de formulación de políticas públicas y seguimiento de los impactos a las fuentes hídricas sean más eficientes (Torres, Cruz & Patiño, 2009).

Evaluar las quebradas estudiadas con estos índices aportará un diagnóstico acertado acerca de la calidad del agua que poseen estas, tal como sucedió en los estudios

realizados por Chavarro y Gelvez-Bernal; Mosquera y Restrepo en el 2016 entre otros; los cuales hacen uso de estos índices para estimar el estado de la calidad de los cuerpos de agua en Colombia, con lo cual generan información técnica fiable que contribuye a la gestión del recurso hídrico.

Lo anterior se evidencia el municipio de Suárez, donde las fuentes hídricas circundantes a la actividad minera se desarrollan en los corregimientos de Mindalá y La Toma, aquí las sustancias químicas e industriales utilizadas en los procesos de obtención del metal, se vierten al embalse La Salvajina y a las quebradas cercanas, alterando las características fisicoquímicas del recurso (Defensoría del Pueblo, 2015).

Dada la afectación que se evidencia en los cuerpos de agua es necesario estudiar los efectos en la calidad del agua de las corrientes de las quebradas estudiadas mediante índices de calidad y contaminación, este proceso se requiere en forma intensiva en Colombia, debido a que los recursos hídricos no cuenta con una adecuada planificación y los conflictos por los usos están presentes en la mayoría de ellos (Castro, 2015), la compilación de datos mediante estos estudios permitirán identificar fuentes principales de contaminación, entender e identificar proceso de transformación de la calidad de agua dominantes, magnitudes de cargas contaminantes principales, sitios y variables importantes de medición (Camacho & Díaz, 2003).

La principal contribución que busca el desarrollo de esta investigación es brindar información técnica que permita comprender el estado de la calidad del agua en las quebradas estudiadas a fin de generar bases técnicas para futuros planes de gestión del recurso hídrico, en este caso de las quebradas Lorenzo y Dios Te Dé en las veredas Maravélez y La Turbina.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar las perturbaciones ocasionadas por intervenciones antrópicas en las quebradas Dios Te Dé y Lorenzo, ubicadas en el municipio de Suárez – Cauca.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Ubicar los diferentes focos de contaminación antrópica que inciden sobre las quebradas Lorenzo y Dios Te Dé.
- Evaluar el estado de calidad del agua de las quebradas Lorenzo y Dios Te Dé afectadas por actividades antrópicas mediante la aplicación de índice de calidad del agua e índices de contaminación.
- Analizar el efecto de los vertimientos de aguas residuales provenientes de los principales centros de procesamiento de material minero sobre la calidad del agua en la quebrada Dios Te Dé.



## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1 ANTECEDENTES

A través del tiempo las fuentes de agua se han contaminado por actividades antrópicas, lo que ha generado un problema para las comunidades que habitan cerca de las fuentes y las poblaciones de seres humanos para las cuales tener agua en cantidad y calidad suficientes se ha convertido en un grave problema (Breña *et al.*, 2009); los niveles de impacto a las cuencas hidrográficas son altos, dado que el aprovechamiento del recurso no es de forma sustentable (Elosegi & Sabater, 2009).

Una de dichas actividades que afecta el recurso hídrico es la extracción de minerales, esta altera la calidad de los cuerpos de agua superficial y subterráneas posibilitando el transporte de contaminantes, sedimentos, drenaje ácido, introducción de metales pesados, variación de las cotas de inundación y el desvío de cauces, alteración del balance energético, alteración de condiciones físicas y químicas, entre otras; en general dicha actividad genera una demanda y consumo de agua que conduce a una pérdida de reservas y con ello a una pérdida del recurso (CRC, 2006; Oyarzun, Higuera & Lillo, 2011; Bustamante., *et al* 2016).

En la minería aurífera la afectación a los ecosistemas se refleja con un notable deterioro de la calidad de los recursos, afectación a su fauna y flora, e incluso en las poblaciones humanas (Garzón & Rodríguez, 2015; Casallas & Martínez 2016; Albert., *et al* 2017). El ser humano sufre problemas asociados a la alta toxicidad de metales como el mercurio, usado en minería; esto se puede contemplar desde daños menores hasta carcinogénesis, teratogénesis y neurotoxicidad (Cordy., *et al* 2011; Saldarriaga., *et al* 2013; Zapata., *et al* 2014; Olivero., *et al* 2011); cuando se hace uso del mercurio se generan fuentes de dispersión de éste en la atmósfera, flora y fauna contribuyendo a la contaminación por metilmercurio; el cual es generado a partir de la metilación del mercurio inorgánico por bacterias aerobias y anaerobias; este metal puede ser bioacumulado directamente por organismos acuáticos y biomagnificado a través de la cadena trófica (UPME, 2015).

Las operaciones de minería genera cambios ambientales significativos debido a las enormes cantidades de material movido y procesado, y la presencia de metales pesados en la mayoría de las rocas de desecho y los cuerpos de mineral; la erosión, la competencia por los recursos hídricos y los problemas de cantidad y calidad, así como la contaminación del aire, el agua y el suelo son casi siempre el resultado de tales operaciones (Razo *et al.*, 2004); distintos estudios corroboran esto, por ejemplo (Cobbina., *et al* 2013; Barasa., *et al* 2016; Palleiro, 2016) encuentran alteración en las características hidráulicas y morfológicas de la cuenca en el primer caso; en el segundo se observa que la variación de parámetros físicos y químicos que afectan la calidad del recurso, evidenciando la problemática que genera la extracción de oro.

Horton (1965) y Brown *et al.*, (1970) plantearon el índice de calidad, NSFQWI (National Sanitation Foundation WQI); mediante el cual se evaluaron parámetros fisicoquímicos que aportaron información acerca del estado de las fuentes de agua; a partir de estos se han generado diversos estudios a nivel global con la implementación de índices de calidad y adaptaciones de estos dependiendo de las fuentes hídricas; Tripathi & Singal (2019), son ejemplo de esto pues proponen un índice que evalúe la calidad del agua del río Ganges, India mediante el análisis de componentes principales y la evaluación fisicoquímica del agua.

En Colombia, Díaz (2015) realizó un análisis sobre el impacto de la minería de oro y las consecuencias que trae sobre las fuentes hídricas destinadas para consumo humano; los departamentos de Antioquia (43%), Chocó (37%), Bolívar (8%), Cauca (4%), Caldas (3%) y Nariño (2%) han explotado 265,112.7 kg de Oro entre el 2009 – 2013, siendo los principales productores de oro del país entre los años 2010-2014, generando perturbaciones en los ecosistemas y la salud humana por la introducción del mercurio; estos departamentos son zonas de especial interés por investigadores, ya que es necesario evaluar el grado de afectación de la minería aurífera en el ambiente y la sociedad, así como lo confirman Díaz *et al.*, (2016) quienes además aconsejan que se debe involucrar el efecto actual de ciertos contaminantes sobre la calidad del agua, la salud humana y los ecosistemas, e incluir además el análisis de cuencas hidrológicas

tensas por el aumento de sedimentos y socavación. Siendo estos estudios importantes para la planificación, monitoreo y diseño de estrategias para mejorar los Planes Regionales de Recursos Hídricos.

En el país se ha aportado conocimiento a la dinámica de los ríos y quebradas , tal es el caso de Rubio *et al.*, 2017; Cañas, 2014; CRC, 2011; Castro, 2015 & Arango *et al.*, 2008 entre otros, quienes han evaluado la calidad del agua con diferentes herramientas en departamentos como Cundinamarca, Cauca, Caldas y Antioquia; en el caso de la huella hídrica se tienen estudios realizados por ENA (IDEAM, 2015) y otros orientados a la huella hídrica minera (González *et al.*, 2012, Pardavé & Delvastro, 2017, Alvarez, 2018 ), estos sientan bases para el estudio de la calidad con valores propios a los ríos de Colombia y estiman que la huella hídrica en general; además en el país también se ha implementado la evaluación del estado de las fuentes hídricas mediante la implementación de índices de calidad, para ello se creó el ICA-IDEAM después de realizar el estudio nacional del 2010, donde la autoridad ambiental propone este índice para evaluar fuentes hídricas superficiales (IDEAM, 2011).

Hoyos *et al.* (2018) evaluaron la calidad del agua de una subcuenca hidrográfica del río frío en Cundinamarca, haciendo uso de este ICA; de igual manera en el país se han aplicado índices de contaminación para complementar la información del estado de las cuencas, estos fueron propuestos por Ramírez (1997), y dependiendo de las fuentes de contaminación pueden ser adaptados, como lo hizo Restrepo (2015) quien propuso un índice de contaminación asociado a la actividad minera aurífera en el río Cabí; por otro lado autores como Mosquera (2018), Chavarro & Gélvez (2016) han hecho uso de este tipo de herramientas para conocer el estado de calidad y contaminación de las fuentes hídricas en Colombia.

Para el municipio de Suarez en el departamento del cauca, Vargas y Velasco (2019), evaluaron la afectación de las actividades antrópicas en la calidad del agua, haciendo uso de los índices de calidad y contaminación en aguas superficiales; dichas herramientas pueden interpolarse para el estudio y conocimiento de la calidad del agua

en lugares afectados por actividades antrópicas como en Suárez – Cauca; zona objeto de estudio donde se tomarán las herramientas mencionadas para evaluar la calidad del agua.

## **5.2 MARCO TEÓRICO**

La calidad de las aguas está definida por la composición química de estas y sus características físicas y biológicas, adquiridas a través de los diferentes procesos naturales y antropogénicos. La calidad del agua y su variación en el espacio temporal se modifica por la adición de contaminantes, asociada a las múltiples actividades socioeconómicas, la evaluación de la calidad se realiza a través de monitoreos de calidad de agua, que se identifican como el compendio de información de una serie de localidades a intervalos regulares, destinado a recolectar los datos necesarios para evaluar la calidad del agua (Restrepo, 2015).

### **5.2.1 Índices de calidad del agua**

Los índices de calidad del agua consisten básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad del agua. El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color. Su ventaja radica en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información (Restrepo, 2015). En el caso de estudio se propone la aplicación de dos índices de calidad descritos a continuación;

#### **ICA – IDEAM**

El Índice de calidad del agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables (OD, SST, DQO, C.E, pH, NT/PT), registradas en una estación de monitoreo  $j$  en el tiempo  $t$ . (IDEAM, 2011)

### 5.2.2 Índices de contaminación del agua

Uno de los principales instrumentos establecidos para evaluar la contaminación del recurso hídrico son los índices de contaminación, los cuales son definidos como los criterios de evaluación del nivel de contaminación presente en el agua por uno o varios parámetros, con referencias nacionales e internacionales para distintos procesos antropogénicos y naturales; estos fueron desarrollados inicialmente por Ramírez et al., (1997) en Colombia. Estos índices definen el grado de contaminación de un cuerpo de agua mediante un número, que se encuentra entre 0 (muy bajo nivel de contaminación) y 1 (muy alto nivel de contaminación) (Mosquera, 2016). En el caso de estudio se propone la aplicación de los siguientes índices de contaminación descritos a continuación;

**Tabla 1.** Índices de contaminación.

<b>Índices de contaminación</b>	
<b>ICOSUS</b>	Se determina tan solo mediante la concentración de sólidos suspendidos (mg/L), que se definen como partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución (Ramírez et al., 1999).
<b>ICOMI</b>	Agrupada la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) que expresa el contenido de sólidos disueltos en la corriente del cuerpo de agua, la dureza (mg/L) que se basa en la concentración de cationes de calcio y magnesio y alcalinidad (mg/L) que se expresa a través del contenido de los aniones de carbono y bicarbonato (Martínez, 1976, Ecopetrol, 1993, Roldan, 1992; citado en Cañas, 2014). Este índice se define en un rango de 0 a 1 en el cual los valores cercanos a cero indican baja contaminación por mineralización, por el contrario, los valores cercanos a uno indican una alta contaminación por mineralización (Ramírez et al., 1999).

---

<b>ICOpH</b>	Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO <sub>2</sub> disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo (Cañas, 2014)
--------------	--

---

<b>ICOMO</b>	Se expresa en diferentes variables fisicoquímicas de las cuales se selecciona demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno, de tal manera estas variables en conjunto, recogen efectos distintos de la contaminación orgánica. (Ramírez et al., 1997).
--------------	--

---

<b>ICOMINERO</b>	Índice que permite medir la contaminación de la minería aurífera aluvial. Las variables seleccionadas son turbiedad, sólidos suspendidos totales y concentración de mercurio; el mercurio es un indicador directo del impacto de la minería aurífera (Restrepo, 2015)
------------------	---

---

### **5.2.3 Huella hídrica gris (HHG)**

Volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia las normas de calidad ambiental, asociando los límites establecidos a una buena calidad para el ambiente y para las personas. (UPME, 2016)

### **5.3 MARCO LEGAL**

Legislación Colombiana para el recurso hídrico.

#### **RESOLUCIONES**

- Resolución 0631 del 2015: por la cual “se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.”
- Resolución 2115 de 2007: Por medio de la cual “se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”.
- Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS.
- Decreto 1076 de 2015. Esta versión incorpora las modificaciones introducidas al decreto único reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo sostenible a partir de la fecha de sus expedición.

## **6. METODOLOGÍA**

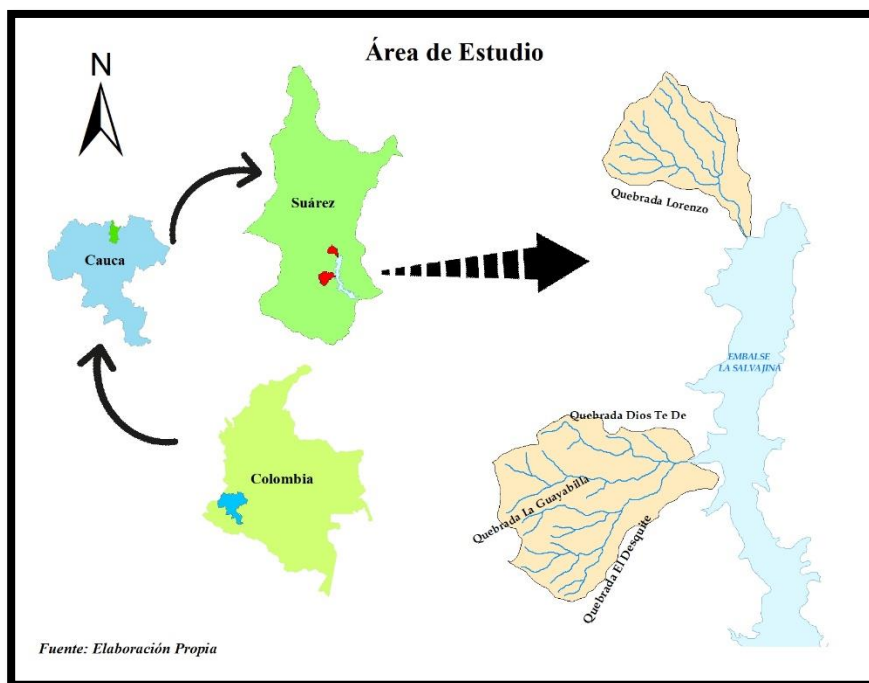
Para alcanzar los objetivos propuestos se realizó una serie de actividades que incluyeron la socialización de los objetivos a las comunidades de las veredas Maravélez y La Turbina, Suarez Cauca; adicionalmente se realizó una visita a las quebradas, con miembros del grupo de investigación GIQA, del departamento de Química de la Universidad del Cauca y una persona de la comunidad, donde se determinaron los puntos de muestreo y las posibles fuentes de contaminación. Posteriormente se inició la fase de campo donde se realizó la toma de muestras para el análisis fisicoquímico llevado a cabo en los laboratorios del grupo de investigación GIQA y el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la universidad del Cauca. La CRC también ejecutó parte de los análisis a fin de recopilar la información necesaria para cumplir satisfactoriamente con los objetivos propuestos.

### **6.1 Área de estudio**

El Distrito Minero Aurífero de Suárez, se localiza en el borde oriental de la cordillera occidental y geográficamente corresponde a una franja paralela al cauce del río Cauca e involucra gran parte de la represa Salvajina (CRC, 2006); este limita al norte y oriente con el municipio de Buenos Aires, al Sur con el Municipio de Morales y al Occidente con López de Micay. El municipio de Suarez en el departamento del Cauca, y tiene una población urbana de 2,874 y una población rural de 15,530 habitantes (DANE, 2019). Cuenta además con ríos importantes como el Cauca, Ovejas, Marilopito, Damián, Inguitó, Asnazú y Marilópez, el municipio posee una altura sobre el nivel del mar de 1,050 m, temperatura media 27°C (Alcaldía Municipal Suárez-Cauca, 2017); Políticamente está dividido en los corregimientos de Mindalá, La Toma, Asnazú, Betulia, Agua Clara, Robles y La Meseta. La investigación se realizó en el corregimiento de Mindalá, compuesto por nueve veredas que son Badeas, Vista Hermosa, San Vicente, Pueblo Nuevo, Maravélez, Tamboral, Miravalle, La Turbina (cabecera corregimiento) y Mindalá (Devia, 2015).



En el caso específico del área de estudio se analizaron las quebradas Dios te Dé y Lorenzo pertenecientes a las veredas Maravélez y la Turbina respectivamente. En cuanto al contexto biofísico de la zona, hay predominancia de un paisaje montañoso y ondulado con relieve quebrado y pendientes marcadas superiores al 50% (Anexo. 3) por lo que hay riesgo de remoción en masa y procesos erosivos, adicional a esto se encuentran diferentes tipos de vegetación que van desde bosque ripario, parches de bosques densos y abiertos, arbustales, herbazales, zonas con poca o nada vegetación y algunos relictos en proceso de sucesión (Anexo. 2). En la figura 1 se presenta la ubicación del área de estudio junto con las cuencas hidrográficas estudiadas, las quebradas Dios te Dé y Lorenzo que comprenden un área de 408 ha y 207 ha respectivamente.



**Figura 1.** Área de estudio  
Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Identificación de focos de contaminación

Con el fin de conocer e identificar las fuentes de contaminación que tienen incidencia sobre las quebradas estudiadas, se realizó la recolección de información secundaria mediante la revisión de antecedentes, posteriormente se confrontó esta información en

campo con ayuda de las juntas acción comunal de cada vereda y el grupo GIQA, realizando una encuesta general semiestructurada (Anexo 1) sobre los recursos hídricos y la percepción de la calidad del agua. Posterior a esto, se realizó una inspección inicial al área de estudio identificando fuentes de contaminación, recursos naturales susceptibles de alteración debido al uso del suelo y áreas de interés para la evaluación de la calidad del agua en las quebradas. Cabe resaltar que para realizar esta identificación se contó con un GPS Garmin E10, luego de esto se realizó interpretación de imágenes satelitales con el software Google Earth Pro y creación de mapas con el software Qgis 3.4, teniendo como cartografía base la plancha 320 IVA del instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

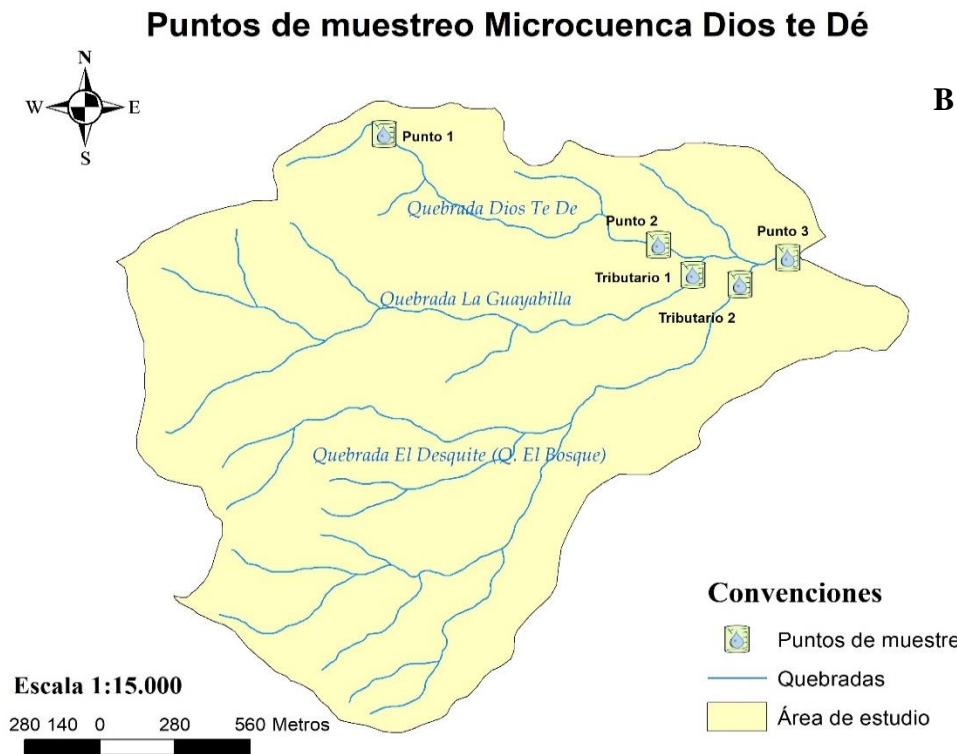
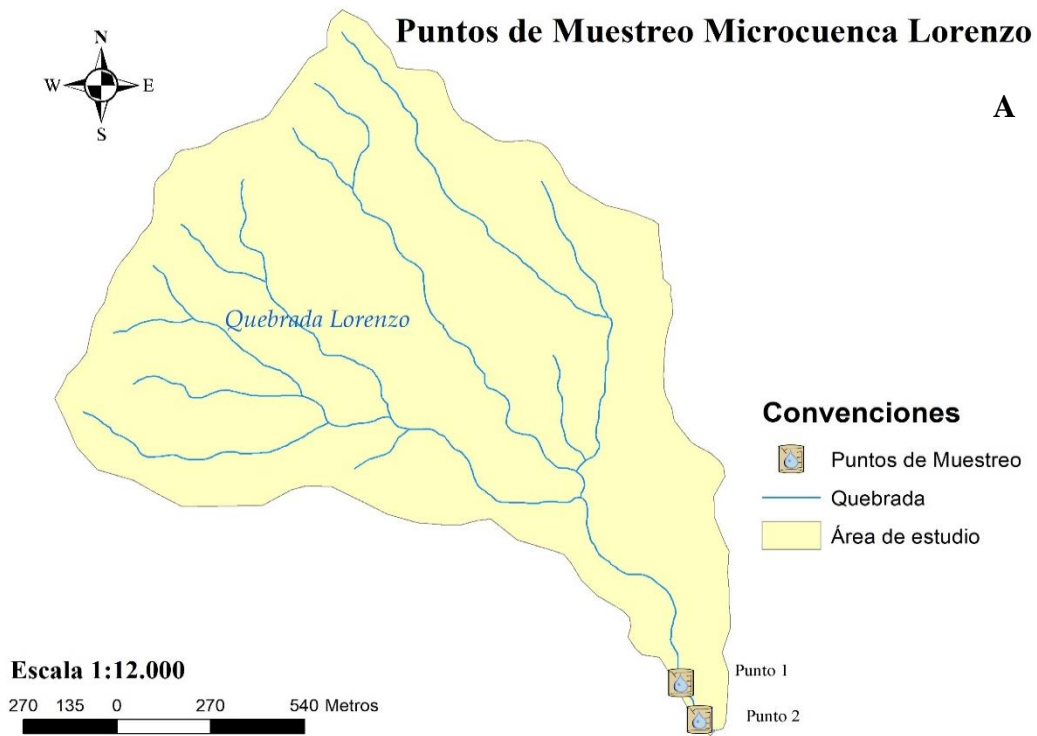
### **6.3 Evaluación de la calidad del agua**

Acorde a lo hallado, el muestreo de las cuencas se realizó de a siguiente manera: Para la quebrada Lorenzo se establecieron dos puntos de muestreo ya que solo se registró un uso del suelo dedicado al establecimiento de pequeños mosaicos de cultivos y viviendas, los puntos están ubicados en la parte baja de la cuenca para evaluar la calidad del agua; en el caso de la quebrada Dios te Dé se registró un uso del suelo marcado principalmente por la minería y en menor medida los ya reportados en la quebrada Lorenzo, por ello se tomaron tres puntos de muestreo sobre la quebrada y dos puntos de muestreo en cada una de las quebradas tributarias. Los puntos de recolección de muestras se presentan en la tabla 2 debidamente georreferenciados, su ubicación se ilustra en la figura 2.

Estos puntos fueron seleccionados teniendo en cuenta los focos de contaminación, los puntos de desembocadura en la represa la salvajina y los puntos donde se registrara poca o nula actividad antrópica. Debido a las condiciones limitantes del terreno tales como pendiente, accesibilidad, la distancia entre los puntos de muestreo no fue homogénea, sin embargo se tomaron de forma que fuera representativas.

**Tabla 2.** Coordenadas de los puntos de muestreo.

Quebrada Dios te dé		
Punto de muestreo	Coordenada	Altitud (m.s.n.m)
Punto 1	76°44'2.657"W 2°55'3.597"N	1588
Punto 2	76°43'29.342"W 2°54'49.818"N	1322
Tributario 1	76°43'24.807"W 2°54'46.329"N	1249
Tributario 2	76°43'19.226"W 2°54'45.457"N	1187
Punto 3	76°43'13.296"W 2°54'48.248"N	1161
Quebrada Lorenzo		
Punto de muestreo	Coordenada	Altitud (m.s.n.m)
Punto 1	76°42'50.071"W 2°56'28.432"N	1265
Punto 2	76°42'48.444"W 2°56'24.727"N	1167



**Figura 2.** Estaciones de muestreo. **A.** Microcuenca Lorenzo y **B.** Microcuenca Dios te Dé. Fuente: Elaboración propia

Para la toma de muestras de agua superficial se siguió el protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos, Aguas superficiales y Subterráneas del IDEAM en el 2002 (IDEAM, 2002); teniendo en cuenta los factores limitantes y condicionantes del área; como accesibilidad al terreno, transporte y análisis de muestras, seguridad, características físicas del terreno. Una vez obtenida esta información se realizaron las campañas de muestreo durante los meses de Octubre y Noviembre del año 2018 en temporada de lluvias (300 a 400 mm) y posteriormente se transportaron las muestras de agua al laboratorio para completar los análisis fisicoquímicos.

En campo se midieron los siguientes parámetros: OD, Temperatura, pH, conductividad, turbiedad y Caudal con ayuda de la sonda de medición multiparamétrica HACH HQ40d; en cada uno de los casos se realizaron mediciones sucesivas hasta la estabilización de lectura en el instrumento. En la medición del caudal se tomaron segmentos rectos de las quebradas y se utilizó el método de flotadores, en este procedimiento se realizó un número suficiente de veces para determinar un valor lo más cerca posible al caudal real; en el caso de los siguientes parámetros DBO, DQO, Alcalinidad, Dureza y SST, se recolectaron muestras simples de las estaciones de muestreo en contenedores previamente esterilizados; la metodología empleada para cada una de estas pruebas se presenta en la tabla 3. Adicionalmente, se recolectaron muestras de agua para el análisis microbiológico y mercurio, este último fue realizado en El Laboratorio Ambiental de la corporación autónoma regional del Cauca (CRC).

Una vez obtenido los resultados del análisis de estos parámetros descritos, se realizó la evaluación de la calidad del agua mediante la implementación de índices de contaminación ICOMI, ICOSUS, ICOpH, ICOMO, ICOMINERO y el índice de calidad del agua ICA-IDEAM.

La metodología empleada para la medición de los parámetros se presenta en la tabla 3. Las ecuaciones y criterios para la clasificación del ICA e ICOS se presentan en las tablas 4 y 5, respectivamente.

**Tabla 3.** Parámetros Fisicoquímicos y microbiológicos.

Parámetro	Lugar	Método	Código IDEAM
Temperatura	In – situ	Potenciómetro	-
Oxígeno Disuelto	In – situ	Electrodo de Membrana Oxímetro	-
pH	In – situ	Potenciómetro	-
Conductividad Eléctrica	In – situ	Potenciómetro	-
Turbidez	In – situ	Nefelómetro	-
Alcalinidad Total	Laboratorio	Titulométrico	TP0211 (IDEAM, 2005)
Dureza total	Laboratorio	Titulométrico	TP0341 (IDEAM, 2005)
DBO <sub>5</sub>	Laboratorio	Winkler	TP0087 (IDEAM, 2007)
Sólidos Suspendidos Totales	Laboratorio	Gravimétrico	TP0088 (IDEAM, 2007)
Coliformes Totales	Laboratorio	Filtración por membrana/NMP	SM 9223B / SM 9222 B
DQO	Laboratorio	Reflujo cerrado y volumetría	TP0086 (IDEAM, 2007)
Mercurio	Laboratorio	Absorción atómica	Generación de Hidruros

**Tabla 4.** Índices de Calidad y Contaminación del agua.

Índice	Ecuación	Definición
ICA-IDEAM (IDEAM, 2011)	$ICA_{njt} = \left( \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \right)$ (Ec.1)	ICA <sub>njt</sub> Es el Índice de calidad del agua j en un tiempo t W <sub>i</sub> Es el peso relativo asignado a la variable de calidad i I <sub>ikjt</sub> Es el valor calculado de la variable i, en la estación j, en el tiempo t n Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo
ICOMO (Mosquera, 2016).	$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO_5} + I_{coliformes} + I_{oxigeno \%})$ (Ec.2)	$I_{DBO_5} = -0,05 + 0,70 \log (DBO_5)$ (Ec.3) Si DBO <sub>5</sub> > 30 mg/l, entonces I <sub>DBO<sub>5</sub></sub> = 1 Si DBO <sub>5</sub> < 2 mg/l, entonces I <sub>DBO<sub>5</sub></sub> = 0 $I_{coliformes} = -1,44 + 0,56 \log (\text{Colif Total})$ (Ec.4) Si Coliformes Totales > 20000 NMP/100 mL, entonces I <sub>coliformes</sub> = 1 Si Coliforms Totales < 500 NMP/100 mL, entonces IColif Total = 0 $I_{oxigeno \%} = 1 - 0,01 \text{ Oxígeno } (\%)$ (Ec.5) Si Oxígeno (%) mayor al 100%, I Oxígeno% = 0
ICOMI (Mosquera, 2016).	$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{conductividad} + I_{dureza} + I_{alcalinidad})$ (Ec.6)	IConductividad = log10 IConductividad = 3.26 + 1.34 log10 Conductividad (μS/cm) (Ec.7) IConductividad = 10Log.Iconductividad (Ec.8) Si conductividad > 270 μS/cm, entonces I Conductividad = 1 IDureza = log10 IDureza = -9.09 + 4.40 log10 Dureza (mg /L) (Ec.9)

		<p>IDureza = 10Log.IDureza (Ec.10)</p> <p>Si dureza &gt; 110 mg/L, entonces I Dureza = 1</p> <p>Si dureza &lt; 30 mg/L, entonces I Dureza = 0</p> <p>IAlcalinidad = -0.25 + 0.005 Alcalinidad (mg/L) (Ec.11)</p> <p>Si la alcalinidad &gt; 250 mg/L, entonces I Alcalinidad = 1</p> <p>Si la alcalinidad &lt; 50 mg/L, entonces I Alcalinidad = 0</p>
ICOSUS (Mosquera, 2016).	$ICOSUS = -0.02 + 0.0003 \text{solidos suspendidos} \left(\frac{mg}{L}\right)$ <p>(Ec.12)</p>	<p>Si sólidos suspendidos son mayores a 340 mg/L, entonces ICOSUS = 1</p> <p>Si sólidos suspendidos son menores a 10 mg/L, entonces ICOSUS = 0</p>
ICOpH (Mosquera, 2016).	$ICOPH = \frac{e^{-21.08+3.45pH}}{1+e^{-21.08+3.45pH}}$ <p>(Ec.13)</p>	
ICOMINERA (Mosquera, 2016).	$ICOMINERA = \frac{1}{3}(I_{Turbiedad} + I_{SST} + I_{Mercurio})$ <p>(Ec.14)</p>	<p>ITurbiedad=0.174*e0.0163*x (Ec.15)</p> <p>X: valor asociado a la turbiedad en NTU.</p> <p>Si la turbiedad es &gt; 100 NTU, entonces ITurbiedad es 1</p> <p>Si la turbiedad es &lt; 0 NTU, entonces ITurbiedad es 0.17</p> <p>ISólidos suspendidos totales = -0.02+0.003*X (sólidos suspendidos totales (mg/L)) (Ec.16)</p> <p>Si sólidos suspendidos son mayores a 340 mg/L, entonces el subíndice es 1</p> <p>Si sólidos suspendidos son menores a 10 mg/L, entonces el subíndice es 0</p> <p>IMercurio=0.003648x2+0.0589*x+0.0443 (Ec.17)</p> <p>X: concentración del mercurio en µg/L</p>

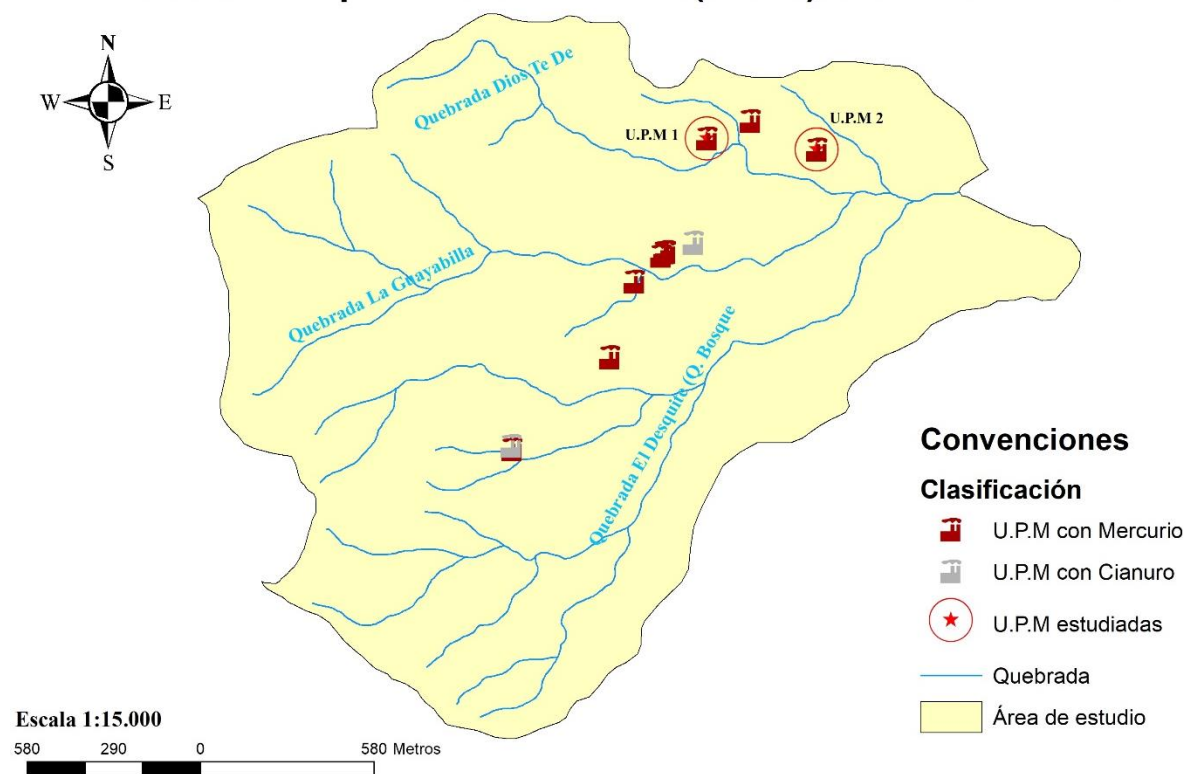
**Tabla 5.** Clasificación de índices de calidad y contaminación

Índice	Peso de cada parámetro			Interpretación		
	Variable	U. medida	Ponderación	Categoría	Calificación	Señal de alerta
ICA-IDEAM (IDEAM, 2011)	OD	mg/L	0.17	0.00-0.25	Muy mala	
	SST	mg/L	0.17	0.26-0.50	Mala	
	DQO	mg/L	0.17	0.51-0.70	Regular	
	C.E	µS/cm	0.17	0.71 -0.90	Aceptable	
	pH	pH	0.15	0.91-1.00	Buena	
ICOs (Ramírez et al., 1999)	-			Clasificación	Grado de contaminación	Escala de color
				0 – 0.2	Ninguna	
				>0.2 – 0.4	Baja	
				>0.4 - 0.6	Media	
				>0.6 – 0.8	Alta	
				>0.8 - 1	Muy Alta	

#### 6.4 Efecto de los vertimientos de aguas residuales de las unidades de producción minera (UPM)

El proceso llevado a cabo para la identificación del efecto que tienen estas UPM sobre el agua de las quebradas se realizó únicamente en la quebrada Dios te Dé. En el área estudiada de la vereda Maravélez se realizó la identificación y georreferenciación de las UPM encontradas (figura 3), de estas se tomaron las de mayor actividad productiva (Tabla 6).

#### Unidades de producción minera (U.P.M) vereda Maravélez



**Figura 3.** Mapa de ubicación de Unidades de Producción minera (UPM), Vereda Maravélez. Fuente: Elaboración propia



**Tabla 6.** Ubicación de unidades productivas mineras (UPM) estudiadas.

Quebrada Dios te Dé		
Punto de muestreo	Coordenada	Altitud (m.s.n.m)
UPM 1	76°43'39,971"W	
*Sin tanque de sedimentación	2°54'54,205"N	1492.86
UPM 2	76°43'27,682"W	
*Con tanque de sedimentación	2°54'53,359"N	1349.82

Durante el reconocimiento de las UPM, se realizó una caracterización del proceso de extracción y beneficio de oro, posteriormente se programó el muestreo en un día de trabajo normal para determinar el mercurio presente en los vertimientos líquidos y los SST. Con el propósito de comprender el efecto que tienen estas aguas residuales vertidas a la quebrada se analizó un sistema con vertimiento directo y otro con tanques de sedimentación como tratamiento; en cada uno de estos, adicional a la toma de muestras, se registraron los caudales de entrada y salida del sistema por medio del método volumétrico (IDEAM, 2002).

Mediante los parámetros estudiados se hizo el cálculo de la huella hídrica gris en cada una de las UPM (Ec. 18), a fin de observar la influencia de los vertimientos en la quebrada, puesto que aporta trazas de mercurio residual y sólidos residuales del proceso de trituración y lavado del material; el cálculo de la huella hídrica se realizó mediante el siguiente procedimiento propuesto por la UPME en el 2016 (UPME, 2016).

$$HHG_{mina} - indicador = \frac{Q_{salida} * C_{salida \text{ parámetro}} - Q_{entrada} * C_{entrada \text{ parámetro}}}{C_{\text{Límite permisible parámetro}} - C_{nat \text{ parámetro}}} \text{ Producción mina} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde;

HHG<sub>mina-indicador</sub> = Huella hídrica gris de una mina para un contaminante en función de su producción, L/Kg.

Q<sub>salida</sub> = Caudal de salida o de vertimiento de la mina L/ año

C<sub>salida parámetro</sub> = Concentración de un parámetro a la salida de la mina, mg/L

Q<sub>entrada</sub> = Caudal de entrada a la mina, L/año

C<sub>entrada parámetro</sub> = Concentración de un parámetro a la entrada de la mina, mg/ L

C<sub>Límite permisible parámetro</sub> = Concentración máxima permisible del contaminante para mantener en buenas condiciones la calidad del afluente receptor del vertimiento, mg/L

C<sub>nat parámetro</sub> = Concentración natural contaminante (sin intervención antrópica) mg/L

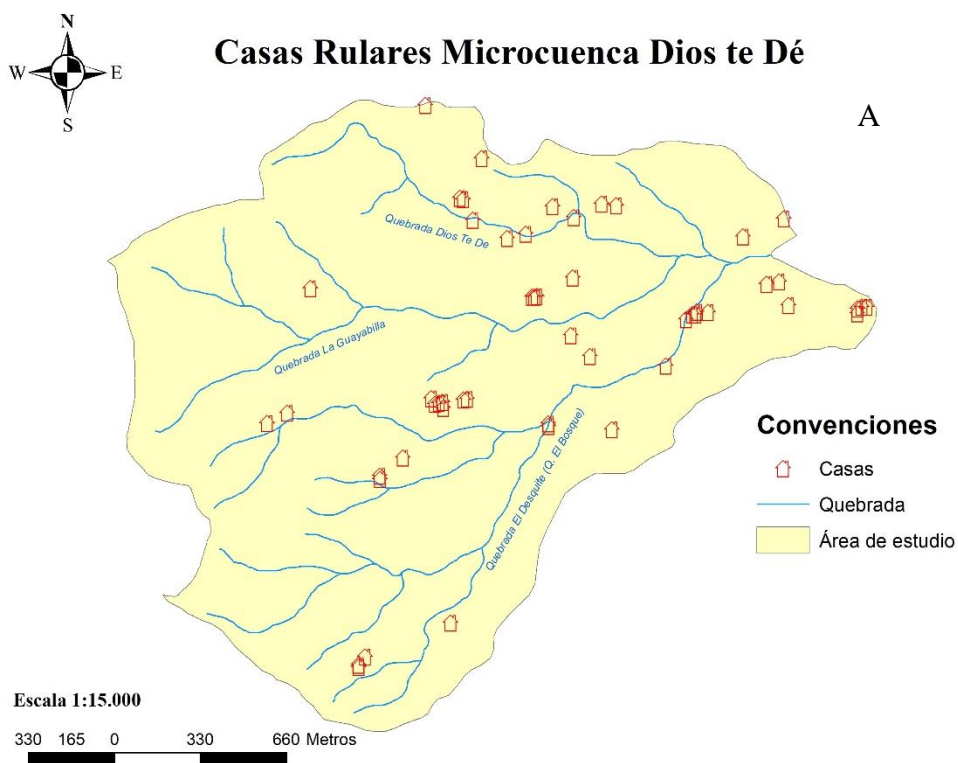
Producción mina= Hace referencia a la producción de la mina, kilogramos o toneladas

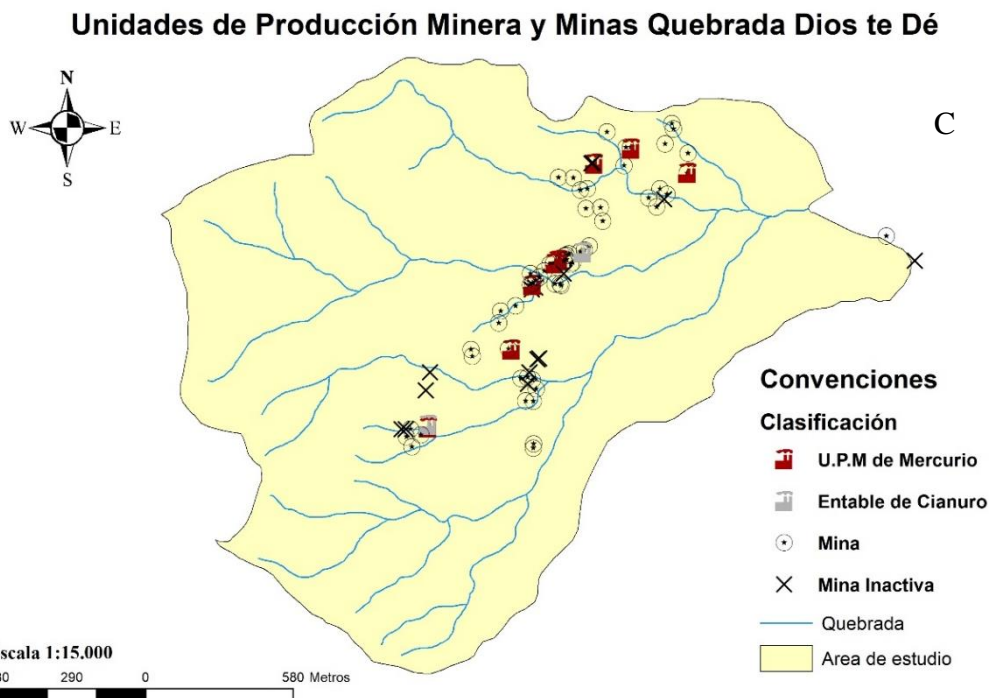
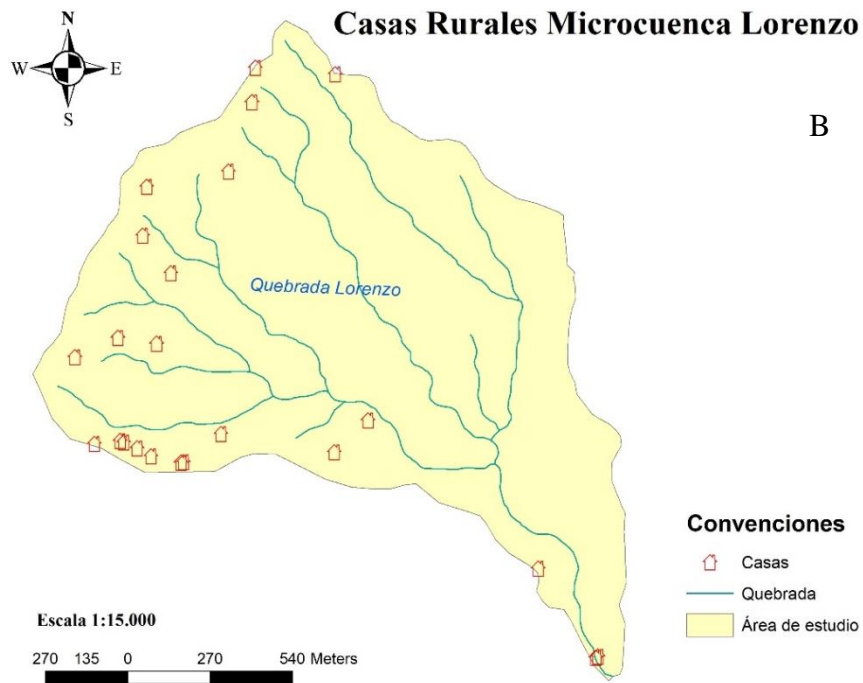
## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente apartado contiene los resultados y la discusión de la información obtenida en el trabajo realizado. Inicialmente se expondrán los principales focos de contaminación identificados y sus fuentes considerando la encuesta a la población, posteriormente se mostrarán los resultados sobre los parámetros físico químicos y su evaluación usando los índices de calidad y contaminación en las quebradas de interés, para luego explicar el impacto de las UPM en el recurso hídrico a través de la huella hídrica gris que facilita la comprensión del efecto que tienen los vertimientos en la quebrada Dios Te Dé.

### 7.1 Focos de contaminación identificados

Los principales focos de contaminación encontrados en la zona de influencia de las quebradas Dios te Dé y Lorenzo se pueden observar en la figura 4, cabe resaltar que entre ellos se encuentran los cultivos de pancoger con fragmentos muy pequeños que no se logran observar en los mapas debido a su escala.





**Figura 4.** Fuentes de contaminación Quebradas Dios te Dé y Lorenzo. **A.** Casas rurales Microcuenca Dios te Dé. **B.** Casas rurales Microcuenca Lorenzo. **C.** U.P.M y minas. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 se presentan las respuestas obtenidas de 30 personas respecto a los recursos y la calidad del agua en las quebradas Dios te Dé y Lorenzo.

**Tabla 7.** Respuesta a encuestas del área de estudio Quebrada Dios te Dé.

<b>Recursos hídricos y la percepción de la calidad en el agua</b>		
<b>Pregunta</b>	<b>Respuestas</b>	<b>(%)</b>
¿Cuáles son las principales actividades económicas de la vereda?	Agricultura	20
	Labores de minería	80
¿Cuenta con servicio de agua en su vivienda?	Si	100
	No	-
¿Cómo es el suministro de agua en esta comunidad?	Acueducto veredal	30
	Quebrada (toma directa)	70
	Riego de cultivos	17
El agua que llega del acueducto la usa en otras labores como:	Labores de minería	33
	Domestico	50
El agua que llega a su vivienda tiene algún tipo de tratamiento para potabilizarla	Si	-
	No	100
¿El agua llega a su vivienda todos los días del año?	Si	100
	No	-
¿Cómo considera que es la calidad del agua en su comunidad?	Muy Buena	40
	Buena	20
	Regular	20
	Muy mala	20
Conoce si se ha presentado enfermedades en miembros de su comunidad o familia por consumir el agua que llega a su vivienda.	Si	71
	No	29
¿Cuándo le llega agua turbia a su hogar la hierve y luego la consume?	Si	20
	No	80
Utiliza el agua que sale de las labores de minería para:	No la usa	100
En su vereda hay servicio de alcantarillado	Si	-
	No	100
Los pobladores de su vereda que no tienen servicio de alcantarillado utilizan:	Letrina	43
	Tanque séptico	57
¿Su comunidad cuenta con servicios de recolección de residuos?	Si	-
	No	100
¿La vereda cuenta con un relleno sanitario para disposición de residuos sólidos?	Si	-
	No	100
¿Dónde depositan o que hacen con los residuos sólidos de su vivienda?	Entierra	50

	Los depositan en el bosque	25
	Los bota a lotes	12
	Los queman	13
	Agricultura	14
¿Cuáles cree usted que son las posibles fuentes de contaminación ambiental asociadas a las fuentes hídricas (quebradas) de su vereda?	Aguas residuales mineras	50
	Turismo	7
	Agua residual doméstica	29

De acuerdo a lo observado en la sección a y b de la figura 4 se puede ver que no hay un tejido urbano continuo; es decir hay una distribución desordenada de las viviendas rurales dentro del área estudiada; en particular por costumbre y supervivencia los habitantes de esta zona tienen pequeños cultivos mezclados con la vegetación de la zona que pueden clasificarse como de pancoger (FNCC, 2008); estas dos actividades, agrícolas y domésticas, generan aguas residuales que son fuentes de contaminación difusas de origen antrópico (Torres, Cruz y Patiño, 2009).

Las descargas provenientes de las minas, sobre el área de influencia de la quebrada Dios te Dé, es un factor importante de aporte de sedimentos y metales propios de material rocoso extraído, estas usualmente se depositan a las afueras de la mina y se transportan hasta la red de drenaje por medio de la escorrentía superficial, lo que se puede observar en la figura 5.



**Figura 5.** Aporte de sedimentos de las minas a la quebrada

Fuente: Elaboración propia.

Otro factor son los vertimientos puntuales de las U.P.M en la quebrada Dios te Dé; que aportan sedimentos que contienen partículas metálicas propias del material procesado, metales agregados como el mercurio y sustancia ácidas (ácido cítrico y ácido sulfúrico)

que son usadas en el proceso de extracción del oro; este aporte es directo ya que los habitantes encuestados reconocen no aplicar ningún tratamiento o aprovechamiento de las aguas residuales.

La minería por su parte es la actividad dominante para la quebrada Dios te Dé y el 80% de la población encuestada corrobora esta información, la cual es ilustrada en la figura 4C. También se logró identificar otras fuentes de contaminación al indagar a la comunidad, estas son: el turismo y la acumulación de residuos sólidos. Estos últimos, se disponen en terrenos y en su proceso de descomposición generan lixiviados cuyo destino es la red de drenaje de las quebradas.

En general la percepción de la comunidad en cuanto a la calidad del agua es muy buena y buena para el 60 % de las personas encuestadas; sin embargo algunas personas perciben deterioro en la calidad, principalmente por la afectación en la salud; mayormente problemas ocasionados por el agua residual proveniente del sector minero que incrementa la turbiedad del agua y en consecuencia favorece los problemas gastrointestinales (Tabla 7).

La situación expuesta afecta no solo el recurso hídrico sino el ecosistema en general, esto se evidencia en aspectos claves como la coexistencia de la vegetación natural con zonas de quema, tierras desnudas y degradadas, fragmentación del bosque y deterioro de las coberturas (Anexo 2) a causa de actividades mineras, tal como lo confirman Ramírez y Ledezma, en el 2007 y Güiza, 2011.

### **7.3 Evaluación de la calidad del agua**

Los valores obtenidos mediante el análisis físico químico del agua de las quebradas Lorenzo y Dios te Dé fueron utilizados para la determinación de los índices de contaminación y calidad; en las tablas 8 y 9 se presentan los valores promedio de los parámetros; las mediciones de cada parámetro se realizaron por triplicado y la estadística aplicada se presentan en la tabla 13 y 14.

**Tabla 8.** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Quebrada Dios te Dé.

RESULTADOS DIOS TE DÉ					
PARAMÉTRICO	PUNTO			Tributario	Tributario
		1	2	1	2
OD (mgO <sub>2</sub> /L)		7.7467	7.1667	7.8333	7.6100
%O <sub>2</sub>		101.1200	101.5000	101.1500	101.0000
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)		4.9852	4.8630	2.3296	2.1704
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)		16.4384	32.8768	16.4384	32.8768
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		5.9185	16.2054	9.7233	11.5552
Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		15.1328	166.8484	32.5936	39.5780
SST (mgSST/L)		8.3333	218.3333	12.6667	36.0000
Temperatura (°C)		19.0000	20.8000	22.1000	22.5000
pH		7.8400	8.3100	7.5600	8.5933
Conductividad (µS/cm)		68.3333	398.6667	105.0000	124.9667
Turbiedad (NTU)		7.1367	43.2933	3.3267	45.5500
Coliformes Totales (UFC/100mL)		-	-	-	-
Coliformes Fecales (UFC/100mL)		-	-	-	-
Caudal (m <sup>3</sup> /s)		0.0322	0.0701	0.1704	0.1388
Mercurio (µg/L)		-	-	-	-

**Tabla 9.** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Quebrada Lorenzo

RESULTADOS LORENZO		
PARAMÉTRICO	PUNTO	
		1
OD (mgO <sub>2</sub> /L)		7.6567
%O <sub>2</sub>		101.3000
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)		<2.0000
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)		32.8768
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		9.5260
Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		20.9530
SST (mgSST/L)		4.1667
Temperatura (°C)		22.4000
pH		8.0533
Conductividad (µS/cm)		83.0333
Turbiedad (NTU)		14.4900
Coliformes Totales (UFC/100mL)		-
Coliformes Fecales (UFC/100mL)		-



Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.1518	0.1403
Mercurio (µg/L)	-	0.1153

Los parámetros descritos anteriormente se comportaron en el periodo de estudio de la siguiente forma:

Los valores de oxígeno disuelto (OD) obtenidos en ambas quebradas oscilan entre 7.1 y 7.8 mgO<sub>2</sub>/L y valores de saturación superiores al 100% (tabla 8 y 9); Según Gualdrón, (2016) a través de este parámetro se determina la contaminación del agua y su soporte para el crecimiento y reproducción animal y vegetal, dicho parámetro se incrementa a medida que hay mayor intensidad lumínica y turbulencia. Este último caso se presenta en el área de estudio, ambas quebradas tienen altas pendientes (Anexo 3) que generan constantes caídas de agua, lo que provoca turbulencia y en consecuencia aumento del oxígeno disuelto en el agua. Las dos quebradas superan los 4 mgO<sub>2</sub>/L de OD, que de acuerdo a la resolución 0330 del 2017, son aguas aceptables y aptas para la preservación de la flora y fauna.

La DBO<sub>5</sub> es un indicador de la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición en condiciones aeróbicas (Martínez et al., 2013). En ambas quebradas su valor fue menor a 5 mgO<sub>2</sub>/L lo que indica que puede ser usada en piscicultura, recreación y para consumo bajo un tratamiento convencional (UPC, 2007) sin embargo, su uso está limitado por los demás factores, puesto al contener mercurio se pone en riesgo la salud humana debido a los procesos de bioacumulación y biomagnificación en la cadena trófica. Los valores bajos se deben a que la quebrada no contiene altos contenidos de materia orgánica biodegradable coincidiendo con el estudio realizado por Gualdrón (2016) en el estudio de fuentes de agua superficial en Colombia.

Considerando la DQO, los valores obtenidos de este parámetro oscilan entre 16 mgO<sub>2</sub>/L y 49 mgO<sub>2</sub>/L. Dichos valores coinciden con los reportados por Pérez, *et al.*, (2011) donde se asocian los valores de este parámetro a la contaminación difusa ocasionada por la inserción de material orgánico de difícil degradación biológica

proveniente de actividades agrícolas. En este caso el sector agrícola no incide significativamente puesto que solamente hay presencia de cultivos de pancoger. Lo que indica que los valores de DQO analizados posiblemente provienen de los ácidos fúlvicos y húmicos en el suelo, ya que tienen un carácter poco biodegradable por ser grandes macromoléculas orgánicas poco aptas para el metabolismo de los microorganismos (Espinosa-Loréns *et al.*, 2012).

Estos ácidos aumentan el valor de la DQO pues sólo se oxidan en presencia de dicromato y sus concentraciones son propias de las características físico-geográficas, en condiciones naturales, los ácidos húmicos y fúlvicos llegan a constituir hasta 80% de la DQO (Waite, 1984; Pérez y Rodríguez, 2008); Otro factor influyente sobre este resultado también puede estar relacionado con la adición de compuestos aromáticos, fertilizantes y plaguicidas provenientes de las aguas servidas y agropecuarias de la zona, estos compuestos debido a su gran complejidad química son excluidos de la posibilidad de ser biodegradados (Ardila, 2010). Por otra parte en las zonas de extracción se adicionan compuestos inorgánicos como sulfuros, nitritos, hierro ferroso y tiosulfatos los cuales se oxidan en presencia de dicromato, lo que adiciona DQO inorgánica en los resultados (Romero, 2004)

Por ello el comportamiento en los puntos de muestreo 1 y tributario 1, donde no hay presencia de UPM al momento del estudio, de acuerdo a esto se tienen menor DQO; a diferencia de los puntos siguientes (2, 3 y Tributario 2) donde hay presencia de UPM y mayor cantidad de minas, que generan arrastre de suelo por el material residual producto del proceso extractivo de oro y por ende adición de los ácidos húmicos y fúlvicos propios del suelo similar a lo presentado en el estudio de Mosquera (2016); además de la adición de compuestos inorgánicos mencionados anteriormente.

Para el caso de la quebrada Lorenzo, los valores de DQO presentan un incremento debido al arrastre de sedimentos por escorrentía y las características propias del terreno, ya que las características físicas del lugar la hacen propensos a generar caídas de agua que van arrastrando suelo contribuyendo así al contenido de ácidos fúlvicos y húmicos;

así como la inserción de compuestos de gran complejidad química difícil de degradarse biológicamente provenientes de las aguas servidas y agrícolas. En ambas quebradas la relación  $DBO_5/DQO$  es inferior a 0.25 lo que indica que hay material poco biodegradable a excepción del punto 1 de la quebrada Dios te Dé que se encuentra entre 0.2 – 0.4 por lo cual es biodegradable (Martínez, 2010).

En los acuíferos naturales la alcalinidad es causada por las sales de bicarbonatos y carbonatos disueltos, que se forma por la acción del  $CO_2$  sobre los materiales básicos y determina la capacidad para neutralizar ácidos (Cheremisinoff, 2002), los valores obtenidos para este parámetros en la quebrada Dios te Dé están entre 5.9185 y 16.2054  $mgCaCO_3/L$ , mientras que para Lorenzo los valores son 9,52 y 9,58  $mgCaCO_3/L$ . Estos valores se deben a la presencia de metales y carbonatos en el terreno (CRC, 2006). Los valores aquí reportados coinciden con las observaciones realizadas por Mamian y Zamora (2016), concluyendo que el recurso hídrico estudiado presenta una buena capacidad buffer que evita variaciones drásticas en el pH del agua.

La dureza representa la cantidad equivalente de carbonato de calcio. Los iones que ocasionan dureza son principalmente calcio y magnesio y está relacionada con el pH y la alcalinidad (Mejía, 2010; Mosquera, 2016). Los valores reportados en la quebrada Lorenzo corresponden a 20.9530 y 23.2812  $mgCaCO_3/L$ , y se pueden clasificar como aguas blandas (0 - 60  $mg/L$ ); esto debido a que no hay intervención minera y por ende menos aporte de cationes a la quebrada. Contrario a este se puede observar que en la quebrada Dios te Dé se presenta un incremento de dureza en los puntos donde empiezan a ingresar descargas de las UPM (Punto 2) presentando aguas duras (121 - 180  $mgCaCO_3/L$ ) de acuerdo a la clasificación propuesta en la OMS (2004). Esto se le puede atribuir al lavado de rocas que se intensifica por el material residual de las minas expuesto al agua de lluvia y al flujo de agua de la quebrada como tal, ocasionando adición a la corriente de agua de carbonatos, cloruros y fosfatos que inciden en el valor alto de este parámetro (CORTOLIMA, 2005); en los siguientes puntos este valor disminuyó; esto se debe a la pérdida de  $CO_2$  disuelto por la aireación y turbulencia en la quebrada que ocasiona el incremento de la interfase aire – agua que permite la

alcalinización del agua y por ende la precipitación de las sustancias causantes de la dureza del agua (Bibiano *et al.*, 2015).

Los ríos con alta concentración de sólidos pueden ocasionar reacciones desfavorables para el consumidor ya que afectan la cantidad tanto como la calidad del agua (Barrenechea, 2010), para el presente estudio los valores de SST en la quebrada Dios te Dé presentaron niveles entre 8.3333 mgSST/L - 218.3333, con un incremento considerable en el punto de muestreo 2 (218.3333 mgSST/L); esto es debido a la gran cantidad de material mineral producto del lavado y procesamiento de las UPM (Mosquera, 2016). En el caso de la quebrada Lorenzo el rango de valores fue más estrecho, 4.1667 a 7.3333 mgSST/L, estos resultados indican poca contaminación por material suspendido e indica que los principales aportes de sólidos son de fuentes naturales.

El incremento de sólidos en el caso de la quebrada Dios te Dé debido a la actividad minera en el punto 2, ocasiona una problemática en la que puede disminuir el paso de luz a través del agua, impidiendo o reduciendo la actividad fotosintética de organismos acuáticos (Pérez *et al.*, 2016). Los puntos aguas abajo presentan un valor menor puesto que no hay vertimientos directos por parte de las U.P.M y el cuerpo de agua logra diluir la concentración de los sólidos vertidos.

Los valores de pH inferiores a 7 se dan por la incorporación de sales ácidas o bajo condiciones de oxidación de materia orgánica con liberación de CO<sub>2</sub> y si es superior a 7, denota una condición básica, que se produce, por incorporación de sales básicas o, a través de los procesos de fotosíntesis que remueven el CO<sub>2</sub> (Ramírez & Viña, 1998; Sierra, 2015). Para las quebradas Dios te Dé y Lorenzo los valores para este parámetro oscilaron entre 7,5 y 8,5 indicando aguas ligeramente alcalinas.

La estabilidad en cuanto al pH en el sistema se debe principalmente a la buena capacidad buffer dada por la alcalinidad y un buen nivel de recuperación del sistema (Mamian y Zamora, 2016). Dichos valores se encuentran dentro de los límites

establecidos para usos como el agrícola y pecuario, consumo humano con desinfección, uso recreativo y preservación de fauna y flora, además se encuentran dentro de los valores normales para un cuerpo de agua superficial y no afectan los ecosistemas acuáticos; el rango mencionado de pH es establecido en el decreto 1076 (2015) el cual es de 4.5 – 9.0 (Plazas, 2018).

La temperatura es una de las variables más significativas en los cuerpos de agua, sirve como indicativo de estabilidad ecológica del sistema. Las variaciones de este parámetro generan un cambio en el ambiente de desarrollo de la fauna y flora presentes en los cuerpos de agua; elevando el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua (Gualdrón, 2016), para el caso de las quebradas Dios te Dé y Lorenzo, los valores para este parámetro están desde 19 a 23,6 °C y se encuentra dentro del rango óptimo (<35°C) establecido para la biota acuática, además se clasifican como cálidos propios de ecosistema tropicales en Colombia acorde a Gualdrón (2016),

La turbiedad es el grado de opacidad ocasionada por la materia particulada en suspensión, ésta limita el paso de la luz a través del agua (Sierra, 2015). Los valores encontrados para este parámetro en la quebrada Dios te Dé tiene un rango bastante amplio que va desde 7.1 a 45.5 NTU, mientras que los valores reportados en la quebrada Lorenzo presentan 14.4 y 21.2 NTU, dichos valores superan el valor límite permitido para aguas de consumo humano, (2 NTU) no obstante una de los principales aportantes de turbiedad son los vertimientos realizados tanto en las minas como en las UPM, ya que en la extracción y tratamiento del material, se generan aguas residuales con altas cargas de sólidos. Es de resaltar que este parámetro interfiere con la transmisión de la luz la cual tiene gran incidencia en los procesos biológicos del cuerpo de agua, que desde el punto de vista fotosintético, es importante para la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos (Sierra, 2015).

La conductividad representa la cantidad total de iones presentes en el agua, y por ende, se relaciona con la salinidad. Ésta indica la capacidad del agua para transferir una corriente eléctrica, que se incrementa principalmente con el contenido de iones (sólidos

disueltos) y la temperatura (Roldán, 2003). Los niveles presentes en las quebradas estudiadas son: Para la quebrada Dios te Dé oscila entre 68.3333 y 398.6667  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; mientras que para la quebrada Lorenzo, los valores reportados son 83.0333 y 83.8333  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En los trópicos los valores de la conductividad están estrechamente relacionados con la naturaleza geoquímica del terreno y su concentración varía principalmente con las épocas de lluvias y de sequía y con su estado trófico (Sierra, 2015). Adicionalmente, se evidencia un incremento en el valor de este parámetro en la quebrada Dios te Dé, ocasionado por el vertimiento de residuos sólidos y líquidos provenientes de la actividad minera, esto se puede corroborar observando un incremento de 6 veces entre el punto 1 y el 2. De acuerdo con el estudio de mineralización realizado por la CRC, en el 2006, el material rocoso cuenta con altos contenidos de iones como Ag, As, Au, Ca, Cu, Mo, Pb, Zn entre otros; estos se integran a las corrientes de agua mediante diversos mecanismos de transporte.

Considerando que las coliformes totales son un indicador de contaminación con materia orgánica de origen fecal, tanto animal como humana (Gualdrón, 2016). Este parámetro se analizó únicamente en las desembocaduras de las quebradas hacia el embalse La Salvajina, esto a fin complementar el índice de contaminación por materia orgánica. Para el punto 3 de muestreo de la quebrada Dios te Dé se obtuvo un valor de 18,000 UFC/100 mL y para Lorenzo 37,500 UFC/100 mL. Además, se determinó la presencia de coliformes fecales, cuyos valores oscilaron entre los 300 y 600 UFC/100mL para la quebrada Dios te Dé y Lorenzo respectivamente.

Estos valores están arriba de lo sugerido para aguas con potencial para la biota acuática (450 UFC). De igual forma, la calidad es muy deficiente para tomarse como fuente de consumo (Resolución 0330, 2017) siguiendo lo referente a coliformes totales; esto debido a una falta de tratamiento previo para las aguas residuales domésticas que llegan a la fuente de agua por medio de escorrentía, ya que los sistemas actuales de tratamiento (tanque séptico) son poco efectivos. Acorde a (Chalarca *et al.*, 2007) los valores reportados pueden generar problemas de salubridad y enfermedades de origen hídrico si se consume esta agua sin tratamiento previo.

El mercurio es vertido al ambiente en su forma metálica o inorgánica, puede ser transformado por diversos tipos de bacterias en metilmercurio, que se considera la forma química más tóxica del mercurio, este genera efectos nocivos en el sistema inmunológico, renal y cardiovascular; y al ser introducidos en el ambiente generan bioacumulación y biomagnificación (Barrenechea, 2010), en el caso del presente estudio se obtuvo valores de 0.0088 y 0.1153  $\mu\text{g/L}$ , para las quebradas Dios te Dé y Lorenzo respectivamente. Teniendo en cuenta que la legislación colombiana establece que si la concentración de Mercurio es menor a 2.0  $\mu\text{g/L}$  (Decreto 1076, 2015), pueden ser destinadas para consumo humano (Díaz, 2015), los valores aquí reportados son menores a este, pero confirman la presencia de este metal en el ecosistema.

A pesar de no haber presencia de actividad minera sobre la quebrada Lorenzo se halló una concentración mayor que en la quebrada Dios te Dé esto puede ser debido a que antes de la desembocadura de esta quebrada hacia la Salvajina posee un represamiento artificial usado con fines turísticos, el cual es de uso público; turistas y mineros hacen uso de este “balneario” y pueden dejar trazas de contaminante, este puede acumularse por la baja velocidad de la corriente y el propio represamiento lo que generó que en ese punto se hallara la concentración reportada.

La razón de no encontrar altas concentraciones de este metal en la columna de agua analizada se debe a la fracción de mercurio soluble (5.5 %) es menor que la fracción particulada, (Drude & Malm, 2008). De acuerdo con García (2013) las concentraciones en el medio agua suelen ser más bajas que las encontradas en los sedimentos, o en las especies de fauna y flora presentes en los cuerpos de agua, por esto en ocasiones un nivel bajo de contaminación en la columna de agua no necesariamente indica contaminación baja en el ambiente. También se debe a que los metales pesados precipitan rápidamente al ingresar a los cuerpos de agua, y se unen covalentemente a materia orgánica de sedimentos, en detrimento de su posterior desorción, tal como lo exponen Simpson y Batley (2007) y Simpson y Spadaro (2016).







La CRC en el 2006 reportó las posibles consecuencias que conlleva el sistema extractivo a base de mercurio para el ecosistema y el ser humano, dentro de las más comunes podemos encontrar: La acumulación de mercurio en la biota y los recursos hidrobiológicos de la región, afecciones a la salud pública por acumulación de mercurio en las comunidades asentadas. Ya que sobre el río Cauca estudios como el realizado por Correa *et al.*, (2009) y Sánchez (2014) han hallado la presencia de este y otros metales. Este último reportó en el 2013 una concentración de 6,62 ppb Hg, para el río Cauca.

Los parámetros de calidad de aguas, entre ellos alcalinidad, sólidos y turbiedad, indican que hay afectación en las quebradas y dejan en evidencia otros problemas como el deficiente tratamiento de las aguas residuales domésticas y algo preocupante como la contaminación por metales pesados al medio ambiente en este caso el mercurio.

### Índice de calidad del agua ICA-IDEAM

En la tabla 10 se observan los resultados del índice de calidad del agua ICA-IDEAM correspondiente a las quebradas estudiadas, adicionalmente se representa la calidad de estas en la figura 6. El cálculo tipo de este ICA se presenta en el anexo 4.

**Tabla 10.** Clasificación del Índice de calidad del agua

Quebrada Dios te Dé y afluentes tributarios					
Ítem	Punto 1	Punto 2	Tributario 1	Tributario 2	Punto 3
Valor ICA	0.9472	0.7343	0.9199	0.8270	0.7765
Calidad	Buena	Aceptable	Buena	Aceptable	Aceptable
Color					
Quebrada Lorenzo					
Ítem	Punto 1	Punto 2			
Valor ICA	0.7840	0.8081			
Calidad	Aceptable	Aceptable			
Color					



Como se puede corroborar en la tabla 10 y figura 6, los valores del índice de calidad que oscilan entre 0.7 -0.9 corresponden a un estado de calidad de agua aceptable (color verde), además los valores entre 0.91 – 1.0 demuestran un recurso con buena calidad (color azul). Los parámetros medidos en la quebrada Dios te Dé muestran un índice ICA-IDEAM bueno para el punto 1, al igual que el afluente tributario en el punto 3. Los otros puntos en Dios Te Dé y la quebrada Lorenzo presentan calidad de agua aceptable.

Como menciona Castro (2014) (Castro, 2014), estos resultados dependen de la hidrología de los cauces, de las actividades económicas particulares de la zona y de la capacidad operativa e instrumental. En este sentido, en la quebrada Lorenzo la calidad del agua se vió afectada por la introducción de contaminantes de origen natural, doméstico y agrícola transportados por medio de la escorrentía.

Lo ocurrido en la quebrada Dios te Dé es un claro ejemplo de que a pesar de que existan diferentes fuentes de contaminación, los cuerpos de agua pueden tener la misma clasificación. La diferencia entre ambas quebradas radica en las actividades de extracción minera presente en Maravélez donde se ubica la Quebrada Dios te Dé. En este caso, la calidad se vio alterada por los sólidos suspendidos totales y conductividad, en los puntos 2, tributario 1 y 3. El punto 2 es el área más cercana a las UPM que realizaban vertimientos directos sobre la quebrada en la época de muestreo (Octubre y Noviembre), estos vertimientos aportan sólidos, iones metálicos del material inerte, material orgánico del suelo y contaminantes resultantes del proceso de extracción del oro. Esto altera la calidad aguas abajo, tal como se observa en el punto 5 donde se da la intersección de las quebradas Dios te Dé, Guayabilla y el Desquite.

La calidad buena hallada en el punto 1 (Dios Te Dé), se debe a que en las zonas circundantes a este punto aún no se realizan actividades mineras, ni asentamientos de comunidades rurales. Para el caso del tributario 1, la calidad obtenida es buena. Aunque sobre esta también se realizan labores de extracción minera, por factores externos no se estaba laborando continuamente sobre este sector; lo cual contribuyó a una reducción

del volumen de vertimientos sobre la quebrada y por tanto los valores obtenidos indican una buena calidad del agua en el momento de la realización del muestreo.

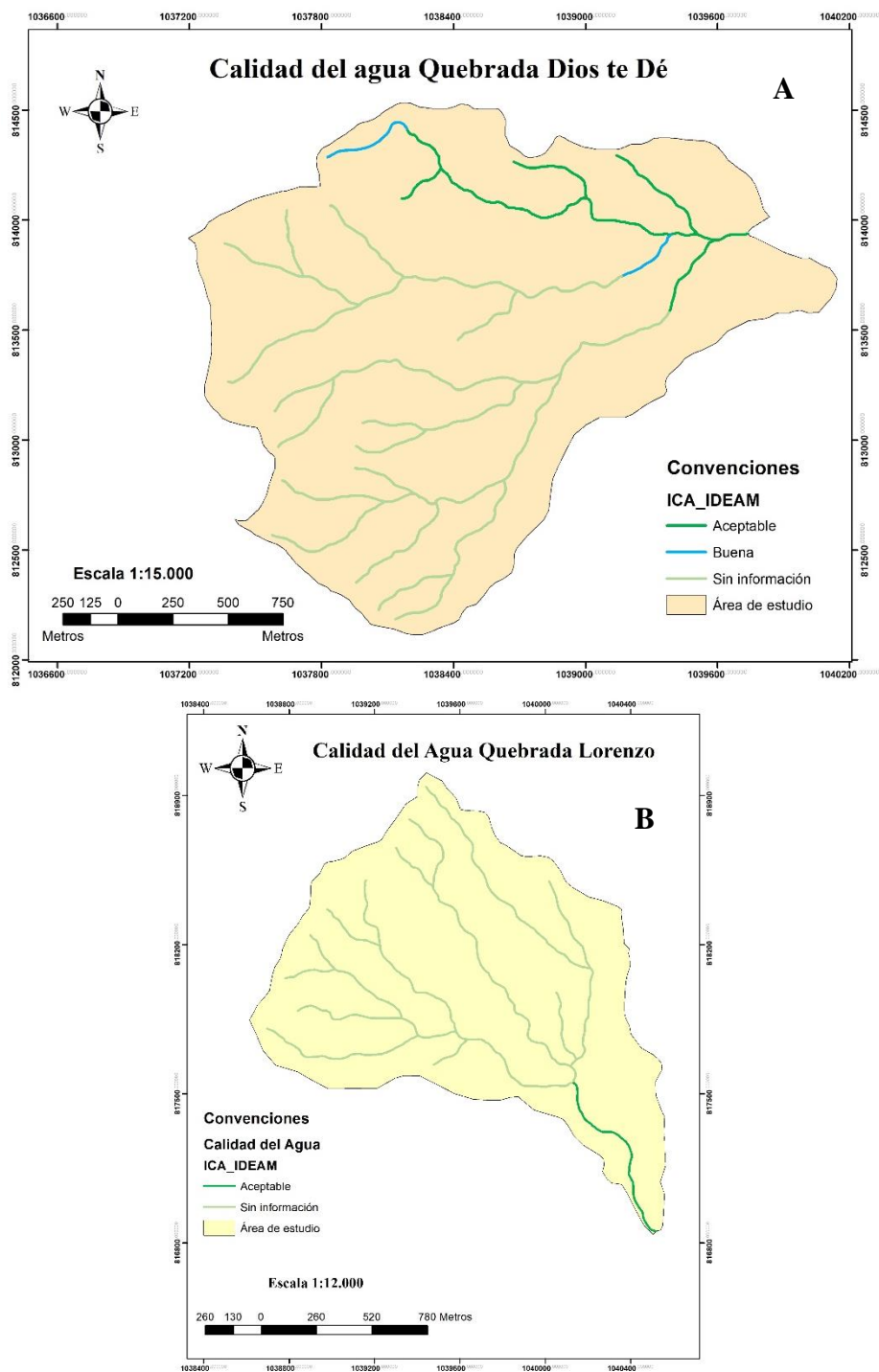


Figura 6. Calidad del agua de las quebradas Dios Te Dé y Lorenzo.

Fuente: Elaboración propia

Acorde a lo mencionado por Chavarro & Gélves (2016), los índices de calidad presentan algunos inconvenientes, entre ellos se encuentran la pérdida de información por integrar en un parámetro muchas variables, por tal razón la información es complementada con los índices de contaminación aplicados en las quebradas Dios te Dé y Lorenzo; los resultados de estos se presentan en la tabla 11; el cálculo tipo de los ICOS se presenta en el anexo 5.

La quebrada Lorenzo sufre un grado de contaminación media y la quebrada Dios te Dé presenta contaminación baja, por materia orgánica (ICOMO), la evaluación de este índice abarca parámetros como Coliformes totales, DBO y porcentaje de oxígeno, en este caso se comprueba que el principal actor que incide en el deterioro de la calidad de agua, son las aguas filtradas y transportadas por escorrentías provenientes de las actividades domésticas, agrícolas y en general de la zona, que introduce masa microbiana al agua e indica contaminación por desechos en descomposición y aguas residuales domésticas (Ramos, *et al.* 2008). La principal diferencia se debe a que el agua de la quebrada Lorenzo al tener mayor cercanía a la cabecera Municipal, es usada como fuente de recreación por parte de los pobladores y turistas en la zona; ocasionando que la contaminación por coliformes total fuera el doble de la quebrada Dios te Dé y por ello el grado de contaminación en la desembocadura de Lorenzo hacía la Salvajina.

Otro factor que pudo influir en esta diferencia fueron los caudales, ya que el caudal de la quebrada Lorenzo fue menor ( $0.1403\text{m}^3/\text{s}$ ) que el caudal de Dios te Dé ( $0.2093\text{m}^3/\text{s}$ ), en el punto bajo de las desembocadura, lo que pudo generar que hubiese mayor dilución en la quebrada Dios te Dé, ya que con un mayor caudal los microorganismos no se depositan ni se acumulan en los sedimentos donde pueden ser fácilmente removidos y generar bajas microbianas en la columna de agua, como lo expone Chigbu *et al.*, (2005).

**Tabla 11.** Índices de contaminación.

<b>Quebrada Dios te Dé</b>					
Índice	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
ICOMI	0.0526	0.6667	0.0936	0.1182	0.1752
Clasificación					
Contaminación	Ninguna	Alta	Ninguna	Ninguna	Baja
ICOSUS	0	0.6350	0.018	0.088	0.144
Clasificación					
Contaminación	Ninguna	Alta	Ninguna	Ninguna	Baja
ICOpH	0.0174	0.0824	0.0067	0.1926	0.0152
Clasificación					
Contaminación	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
ICOMO	-	-	-	-	0.3143
Clasificación					
Contaminación	Sin información	Sin información	Sin información	Sin información	Baja
ICOMINERA					0.1748
Clasificación					
Contaminación	Sin información	Sin información	Sin información	Sin información	Ninguna
<b>Quebrada Lorenzo</b>					
Índice	Punto 1	Punto 2			
ICOMI	0.0683	0.0692			
Color					
Contaminación	Ninguna	Ninguna			
ICOSUS	0.0000	0.0000			
Color					
Contaminación	Ninguna	Ninguna			
ICOpH	0.0357	0.0121			
Color					
Contaminación	Ninguna	Ninguna			
ICOMO	-	0.4776			
Color					
Contaminación	Sin información	Media			
ICOMINERA	-	0.1000			
Color					
Contaminación	Ninguna	Ninguna			

En cuanto al ICOMI, ICOSUS, ICOpH, ICOMO e ICOMINERA (Tabla 11), no se encuentra contaminación para la quebrada Lorenzo, puesto que los valores reportados (Tabla 9 y 10) y aplicados para el cálculo de los ICOS no existen grados de contaminación al momento del muestreo de acuerdo a los establecido por Ramírez *et al.*, 1997.

La quebrada Dios te Dé presenta contaminación alta en el punto 2 (ICOMI e ICOSUS), la principal razón es la actividad minera, ya que como se puede observar en la tabla 8, los valores para alcalinidad, dureza y conductividad evaluados mediante el ICOMI presentan una contaminación alta (Ramírez, 1997), esto indica que existe contaminación por mineralización; en este mismo punto el ICOSUS, que evalúa la cantidad de sólidos suspendidos totales, indica que estos superaron los 90 mgSST/L, teniendo una contaminación alta, de acuerdo a Ramírez (1997).

La contaminación alta hallada ocurre debido a la extracción de oro, mediante un proceso artesanal el cual no tiene control alguno sobre la calidad y cantidad de aguas residuales vertidas a la quebrada, en general estos vertimientos aportan altas cantidades de sólidos que llevan partículas de metales que contribuyen con iones que alteran la conductividad, dureza y en este caso en menor medida la alcalinidad. El ICOMI e ICOSUS están ligados a la capacidad del cuerpo de agua de disolver tanto cationes como aniones, por ende se altera esta capacidad debido a la contaminación a la que se expone Cañas (2013); esto indica que el caudal de la quebrada Dios te Dé no está siendo capaz de diluir la carga contaminante proveniente de las aguas residuales de las U.P.M.

En cuanto a los puntos 1, tributario 1 y 2 la contaminación hallada al aplicar los índices de contaminación se clasifica como ninguna, la razón por la cual no se encuentra contaminación en estos puntos se debe a que la actividad minera en el área se realiza de forma intermitente, por ende al momento de realizar la campaña de muestreo hubo poca actividad; sin embargo también puede que se deba a la autodepuración propia de la cuenca. En este proceso los compuestos orgánicos son diluidos y transformados progresivamente por la descomposición bioquímica, aumentando su estabilidad. Cada

etapa de la autodepuración se caracteriza por su distinta composición física y química (Ocampo, 2013; Branco 1984); aunque una vez que se unen las quebradas Dios te Dé, Guayabilla y el Desquite (punto 5) hay una mayor dilución de contaminantes puesto que hay un incremento del caudal de la quebrada.

De igual forma se aplicó el ICOMINERO para conocer el grado de contaminación por las actividades mineras, en este caso el principal indicador es el mercurio aunque se ve influenciado por la turbiedad y los sólidos suspendidos (Restrepo, 2015), en ambas quebradas no se encontró contaminación pero hay que tener en cuenta que la fracción soluble de este metal es del 5.5% (Drude & Malm, 2008) y puede encontrarse en su mayoría depositado en los sedimentos y en los organismos acuáticos. Otro aspecto que posiblemente influye, es la asimilación de los contaminantes por parte de la quebrada, ya que al ser el punto antes de la desembocadura a la represa Salvajina los contaminantes han viajado un trayecto donde se lleva a cabo un proceso de autodepuración donde los contaminantes se transforman y diluyen, así el impacto del vertimiento es menor en el punto 3.

Esta información es complementaria para ver el grado de contaminación que lleva el agua vertida a la represa salvajina; para conocer el impacto de las actividades mineras se complementó con el cálculo de la huella hídrica gris donde se encontró el volumen de agua necesario para asimilar el mercurio y los sólidos suspendidos totales vertidos en las unidades de producción minera del punto 2, de las quebrada Dios te Dé.

En general ambas quebradas se encontraron con alteraciones en la calidad del agua, esto sirve para dar un diagnóstico inicial y permite gestionar estrategias que contribuyan en la gestión hídrica que asegure una buena calidad en las quebradas estudiadas; también se halló bajas concentraciones de contaminantes como el mercurio que generan problemas en la salud de los pobladores y ponen en riesgo las comunidades aguas abajo, debido a su proceso de bioacumulación y biomagnificación.

#### **7.4 Efecto de los vertimientos de aguas residuales de las unidades de producción minera (UPM)**

Para conocer el efecto que tienen estos sobre la quebrada Dios te Dé se caracterizó el proceso de extracción de oro para a fin de identificar la fuentes de contaminación, el proceso se explica en la figura 7.

Cabe resaltar que el proceso descrito en la figura 7 fue relatado y documentado con el personal a cargo de los establecimientos. En este proceso se trae el material seleccionado por parte del minero donde por experiencia toman los fragmentos de roca y son llevados a las UPM; esto lo realizan por medio de transporte animal o mecánico, una vez listo el material se procede a triturar en la Machadora, la cual se encarga de reducir el diámetro de los fragmentos de roca (0.1 a 3 cm). El material fragmentado se deposita en barriles cuya función es seguir disminuyendo el diámetro de la roca, para ello se adiciona en los barriles bolas de hierro de diferente diámetro y se les agrega agua; una vez realizado esto se pone a girar el barril de tres a cuatro horas.

Luego de esto se realiza un segundo lavado donde se agrega miel de purga y limón (limpiador y desengrasante); de igual forma se le agrega mercurio (1 Oz) con el fin de producir una amalgama que contenga el oro, este proceso tarda alrededor de 1 a 2 horas. Una vez terminado el proceso de molienda se retira el producto en recipientes plásticos de 25 litros, luego se lleva a la marrana el cual sirve como instrumento para precipitar el oro, este funciona con flujo continuo donde ingresa agua a altas presiones que genera la mezcla del mercurio residual y el lodo para precipitar los metales presentes en el lodo. Por último se quema la amalgama recuperada para obtener el oro.

En el área se encontró que se realiza el proceso en dos modelos de plantas básicos, donde la única diferencia es el tratamiento previo del agua residual, puesto que uno vierte directamente al suelo o a la quebrada (figura 8A) y en el otro se utilizan tanques de sedimentación (figura 8B) previo a realizar el vertimiento.

## Proceso de extracción del oro en las UPM

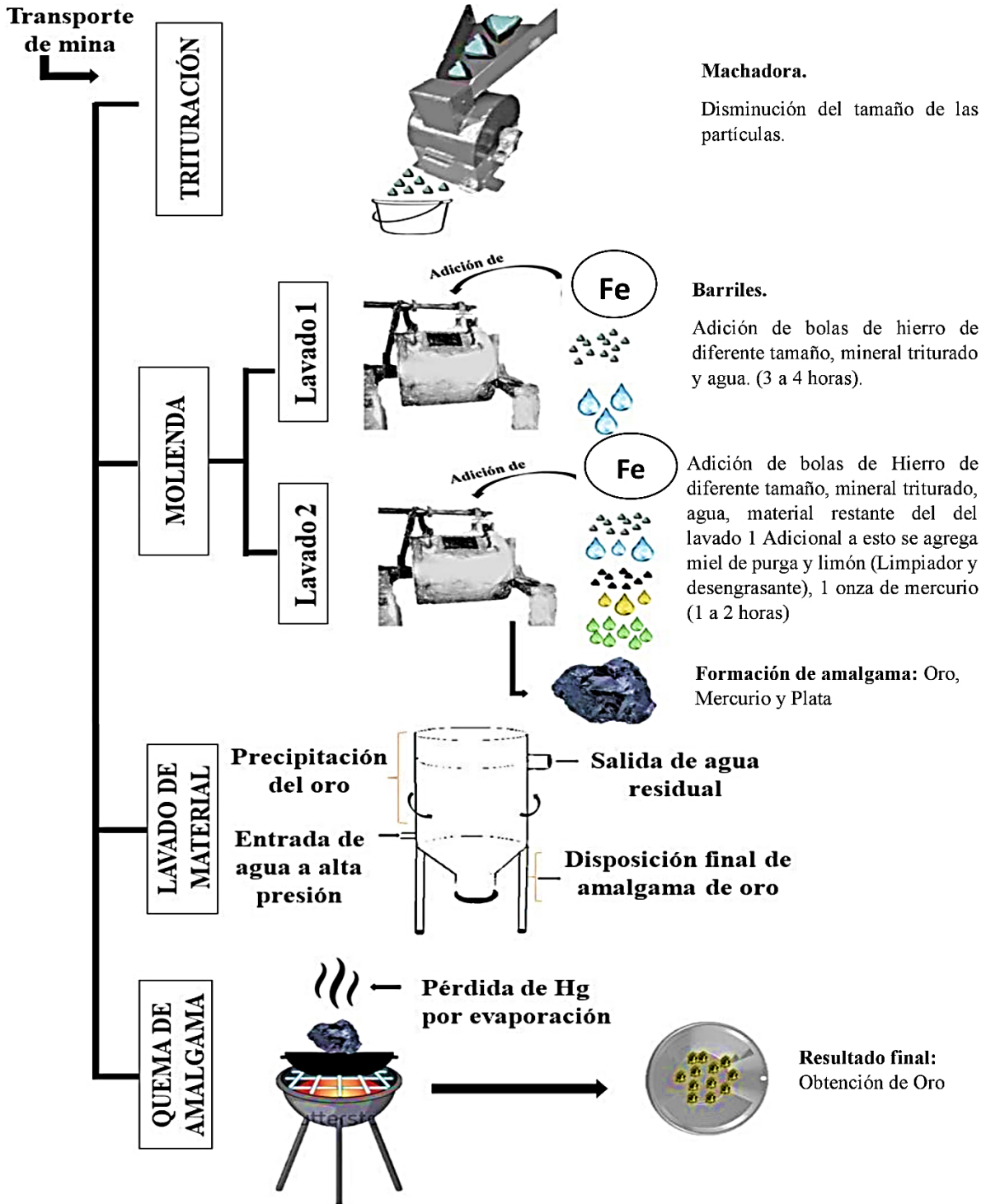


Figura 7. Proceso de extracción de Oro.  
Fuente: Elaboración propia





**Figura 8.** Vertimiento de los dos tipos de UPM

A: Vertimientos sin tanque de sedimentación y B: Vertimientos con tanque de sedimentación. Fuente: Elaboración propia

El proceso de captación del oro usado al momento de realizar esta investigación es el de la amalgamación, este consiste en recuperación del metal de los minerales extraídos de la zona mediante contacto entre el mercurio “el cual es el principal insumo” en el proceso y el oro del mineral, esto forma una aleación física denominada amalgama (CRC, 2006); al realizar esto se evidencian diferentes formas de contaminación a causa de este metal, las cuales son:

- Derrames involuntarios en el suelo y en las corrientes de agua.
- Por arrastre del flujo de agua de pepitas de amalgama, mercurio y minerales combinados con este.
- Por evaporación del mercurio durante la quema de la amalgama y por evaporación natural cuando el mercurio se halla en contacto con la atmósfera. (CRC, 2006)

Cabe resaltar que este proceso es de tipo artesanal y las personas que lo realizan en su mayoría no cuenta con los elementos de protección personal, por ello se contaminan directamente mediante la manipulación de este insumo e inhalación de gases emitidos por la evaporación del mercurio. Otra fuente de contaminación es causada por la

composición de las aguas residuales del proceso, ya que esta contiene altas cantidades de sólidos que introducen al ambiente diferentes metales como plomo, cobre, zinc, berilio, arsénico, selenio, titanio, bismuto, estroncio, cadmio entre otros (CRC, 2006).

Estos metales y metaloides tienen una elevada toxicidad que genera impactos en la salud por exposición prolongada o por bio-acumulación de metales pesados. Dependiendo del tipo de metal o metaloide, se producen afecciones que van desde daños en órganos vitales hasta desarrollos cancerígenos (Combariza, 2009; Nava-Ruíz & Méndez Armenta 2011; Reyes *et al.*, 2016). Estas acciones de tipo antrópico y procesos naturales afectan la seguridad alimentaria y la salud pública (efsa, 2015; Huang *et. al.*, 2014; Reyes *et al.*, 2016).

Conociendo este proceso de obtención de oro, se hizo el cálculo de la huella hídrica gris propuesta por UPME en el 2016, (UPME, 2016) en dos UPM ubicadas sobre la quebrada Dios te Dé, tomando como contaminantes potenciales los sólidos suspendidos totales y el mercurio. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12; el cálculo tipo se encuentra en el anexo 6.

En la tabla 12 se presentan los caudales de entrada y salida de los UPM, adicional a esto se determinó mercurio y SST. El Tenor fue tomado del estudio realizado por la CRC (2006), este se usó para obtener una producción aproximada de oro acorde al volumen de material procesado en las UPM. Con estos valores se aplicó la ecuación 18, con el fin de conocer la HHG de las UPM evaluadas.

**Tabla 12.** Huella Hídrica Gris.

<b>UPM 1</b>							
<b>Datos entrada huella hídrica para Mercurio</b>							
Caudal entrada (m <sup>3</sup> /día)	Caudal salida (m <sup>3</sup> /día)	Conc. Salida (mg/L)	Conc. Entrada (mg/L)	Material procesado (Ton)	Tenor (KgOro/Ton)	Producción Oro (Kg)	HHG m <sup>3</sup> /KgOro*día
5.9591	6.1634	0.0023	0.00005	1.1200	0.0354	0.039648	176.95240
<b>Datos entrada huella hídrica para Sólidos Suspendedos Totales</b>							
Caudal entrada (m <sup>3</sup> /día)	Caudal salida (m <sup>3</sup> /día)	Conc. Salida (mg/L)	Conc. Entrada (mg/L)	Material procesado (Ton)	Tenor (KgOro/Ton)	Producción Oro (Kg)	HHG m <sup>3</sup> /KgOro*día
5.9591	6.1634	40648.6667	26	1.1200	0.0354	0.039648	165545.7090
<b>UPM 2</b>							
<b>Datos entrada huella hídrica para Mercurio</b>							
Caudal entrada (m <sup>3</sup> /día)	Caudal salida (m <sup>3</sup> /día)	Conc. Salida (mg/L)	Conc. Entrada (mg/L)	Material procesado (Ton)	Tenor (KgOro/Ton)	Producción Oro (Kg)	HHG m <sup>3</sup> /KgOro*día
5.347	5.4963	0.00052	0.00005	0.7000	0.0354	0.02478	53.32044
<b>Datos entrada huella hídrica para Sólidos Suspendedos Totales</b>							
Caudal entrada (m <sup>3</sup> /día)	Caudal salida (m <sup>3</sup> /día)	Conc. Salida (mg/L)	Conc. Entrada (mg/L)	Material procesado (Ton)	Tenor (KgOro/Ton)	Producción Oro (Kg)	HHG m <sup>3</sup> /KgOro*día
5.347	5.4963	160.6667	18.6667	0.7000	0.0354	0.02478	828.6000

Para el cálculo de la huella hídrica presente en la tabla 12, se tomó en cuenta que estas actividades se realizan de forma intermitente y se aseguró de que al momento del muestreo las actividades de extracción minera se estuvieran llevando a cabo de manera normal y representativa.

La huella hídrica gris para el mercurio fue de 176.9524 de HHG m<sup>3</sup>/KgOro\*día, en la UPM 1, mientras que en la UPM número 2 el valor fue de 53.32044 HHG m<sup>3</sup>/KgOro\*día. Esto indica que se requieren 230.2728 m<sup>3</sup> de agua para asimilar la carga contaminante de las dos plantas de beneficio en la quebrada Dios te Dé teniendo en cuenta el límite permisible establecido por la resolución 631 del 2015 para el mercurio y los sólidos suspendidos totales; este es un gran volumen de agua requerido para asimilar un solo contaminante.

El caso es aún peor si se toma en cuenta como contaminante principal los sólidos suspendidos totales, ya que se requeriría 166,374.309 m<sup>3</sup> de agua para asimilar la carga de los sólidos vertidos únicamente por dos UPM, es decir se requieren aproximadamente 723 veces más volumen de agua para asimilar esta carga en comparación al caso del mercurio. Esto es bastante preocupante ya que en los vertimientos de los sólidos se encuentran además del mercurio otros metales ya mencionados (plomo, cobre, zinc, berilio, arsénico, selenio, titanio, bismuto, estroncio, cadmio), que no se están teniendo en cuenta para la valoración de la calidad de las aguas pero que generan afecciones al recurso hídrico y al ecosistema en general.

Si se compara lo obtenido entre la UPM 1 y 2, se observa que la huella de la UPM 1 es 200 veces superior a la de la UPM 2, esto se debe a que la UPM 2 tiene un tratamiento preliminar al vertimiento de las aguas residuales como se explicó anteriormente (Figura 8B), lo que reduce notablemente la carga de sólidos vertida. Esto quiere decir que si se trabaja con el mismo volumen de material procesado en ambas UPM, el tratamiento preliminar disminuiría la afectación al recurso hídrico.

Se tiene como referencia la huella hídrica gris calculada en una de las UPM de la misma vereda donde se realizó el presente estudio, el contaminante potencial analizado fue el mercurio, este fue reportado por Álvarez (2018), donde una UPM de la vereda Maravélez obtuvo una huella hídrica gris de 27,442.8 m<sup>3</sup>/día de mercurio, mayor a la hallada en Dios te Dé, puesto que se usan valores teóricos y el volumen de material procesado es mayor al registrado en las visitas técnicas realizadas a las UPM.

Por otra parte Vargas y Velasco (2019) en las veredas de Miravalles y Tamboral, cercanas al área de estudio, presentaron resultados similares a los reportados aquí, debido a que la huella hídrica gris generada por los sólidos es mayor a la generada por el mercurio; cabe resaltar además que las plantas de producción minera trabajan con sistemas diferentes; concluyendo así que el contaminante de mayor impacto son los sólidos, aun así el mercurio también fue estudiado en la matriz agua. Por ende para comprender mejor el impacto de este metal en el agua es necesario estudiar a futuro la

presencia de mercurio en los lodos residuales. Sin embargo en ambos casos los indicadores permitieron conocer las cantidades agua requerida para asimilar los contaminantes estudiados, lo cual sirve de referencia para iniciar proyectos de mejora en los procesos de la zona, puesto que la actividad minera sigue siendo la principal fuente de ingresos en la zona afectada.

## **7.5 Resultados estadísticos**

Se realizó un análisis por triplicado de cada una de las muestras recolectadas, tal como se observa en las tablas mencionadas (13 y 14), el coeficiente de variación fue menor al 8%. Lo que indica homogeneidad entre los valores y en el caso del intervalo de confianza al 95% y se presentan los máximos y mínimos entre los que se encuentra el valor real de los parámetros analizados.

Adicionalmente se realizó un análisis de varianza mediante la prueba estadística de ANOVA (Tabla. 15 y 16) con la que se observaron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros evaluados. Los parámetros OD, Alcalinidad y conductividad no presentaron diferencias significativas en la quebrada Lorenzo. Para conocer entre qué puntos hubo o no diferencia significativa se complementó esta información con el análisis estadístico Tukey, el cual permitió observar que entre la mayoría de los puntos analizados por cada parámetro existe diferencia significativas, a excepción de algunos puntos por parámetro, dentro de los cuales se encuentran: Para el parámetro OD el Punto 1 y tributario 1, de la quebrada Dios te Dé y el Punto 1 y punto 2 de la quebrada Lorenzo, no presentaron diferencia significativa; esto pudo deberse a que las quebradas de estudio presentaban altas pendientes lo cual generaba que hubiese ingreso de oxígeno a estas. Para el parámetro de DBO, el Punto 1 y punto 2 y Tributario 1 con Tributario 2, no presentaron diferencia significativa en la quebrada Dios te Dé. Por ultimo para el parámetro DQO, los puntos Punto 1 y Tributario 1; Punto 2 y Tributario 2; Punto 2 y Punto 3; Tributario 2 y Punto 3. Tampoco presentaron diferencia significativa.

Estos resultados se debieron a las condiciones de la investigación puesto que es una fase exploratoria inicial que sirve como base para futuras investigaciones; además las

condiciones diferentes entre puntos como vertimientos generan valores no homogéneos entre los parámetros incidiendo en las varianzas entre cada punto.

**Tabla 13.** Resultados estadísticos de parámetros analizados en laboratorio, Quebrada Dios te Dé

Parámetro	Punto de muestreo	$\bar{x}$	$\sigma$	C.V (%)	Intervalo de Confianza al 95%	
					Valor Máximo	Valor Mínimo
DBO	1	4.9852	$\pm 0.1344$	2.6962	5.2486	4.7217
	2	4.8630	$\pm 0.0849$	1.7451	5.0293	4.6966
	Tributario 1	2.3296	$\pm 0.0788$	3.3838	2.4841	2.1751
	Tributario 2	2.1704	$\pm 0.1588$	7.3180	2.4817	1.8591
	3	0.3148	$\pm 0.0170$	5.3913	0.3481	0.2815
DQO	1	16.4384	$\pm 0.0000$	0.0000	16.4384	16.4384
	2	32.8768	$\pm 0.0000$	0.0000	32.8768	32.8768
	Tributario 1	16.4384	$\pm 0.0000$	0.0000	16.4384	16.4384
	Tributario 2	32.8768	$\pm 0.0000$	0.0000	32.8768	32.8768
	3	32.8768	$\pm 0.0000$	0.0000	32.8768	32.8768
ALCALINIDAD	1	5.9185	$\pm 0.0000$	0.0000	5.9185	5.9185
	2	16.2054	$\pm 0.2441$	1.5061	16.6838	15.7270
	Tributario 1	9.7233	$\pm 0.0000$	0.0000	9.7233	9.7233
	Tributario 2	11.5552	$\pm 0.2441$	2.1123	12.0336	11.0768
	3	12.2598	$\pm 0.0000$	0.0000	12.2598	12.2598
DUREZA	1	15.1328	$\pm 0.0693$	0.4578	15.2686	14.9970
	2	166.8484	$\pm 0.0070$	0.0042	166.8621	166.8346
	Tributario 1	32.5936	$\pm 0.0912$	0.2797	32.7723	32.4150
	Tributario 2	39.5780	$\pm 0.0278$	0.0702	39.6324	39.5235
	3	59.7550	$\pm 0.0279$	0.0468	59.8098	59.7002
SST	1	8.3333	$\pm 0.0693$	0.8314	8.4691	8.1975
	2	218.3333	$\pm 0.0070$	0.0032	218.3470	218.3196
	Tributario 1	12.6667	$\pm 0.0912$	0.7197	12.8453	12.4880
	Tributario 2	36.0000	$\pm 0.0278$	0.0772	36.0544	35.9456
	3	54.6667	$\pm 0.0279$	0.0511	54.7214	54.6119

**Tabla 14.** Resultados estadísticos de parámetros analizados en laboratorio, Quebrada Lorenzo

Parámetro	Punto de muestreo	$\bar{x}$	$\sigma$	C.V (%)	Intervalo de Confianza al 95%	
					Valor Máximo	Valor Mínimo
DBO	1	1.1889	0.0911	7.6652	1.3675	1.0103
	2	4.8963	0.0231	0.4724	4.9416	4.8510
DQO	1	32.8768	0.0000	0.0000	32.8768	32.8768
	2	49.3152	0.0000	0.0000	49.3152	49.3152
ALCALINIDAD	1	9.5260	0.0976	1.0249	9.7173	9.3346
	2	9.5823	0.1292	1.3478	9.8355	9.3292
DUREZA	1	20.9530	0.0000	0.0000	20.9530	20.9530
	2	23.2812	0.0000	0.0000	23.2812	23.2812
SST	1	4.1667	0.2887	6.9282	4.7325	3.6009
	2	7.3333	0.5774	7.8730	8.4649	6.2017

**Tabla 15.** Resultados del análisis de varianza Quebrada Dios te Dé.

QUEBRADA DIOS TE DÉ			
Análisis de varianza (ANOVA)			
Parámetro	Intervalo de confianza	P	Criterio
OD	95%	8.29E-01	Existe diferencia significativa
DBO	95%	6.29E-04	Existe diferencia significativa
DQO	95%	2.34E-143	Existe diferencia significativa
Alcalinidad	95%	3.31E-14	Existe diferencia significativa
Dureza	95%	7.43E-19	Existe diferencia significativa
SST	95%	6.44E-19	Existe diferencia significativa
pH	95%	3.67E-12	Existe diferencia significativa
Temperatura	95%	7.64E-149	Existe diferencia significativa
Conductividad	95%	8.42E-26	Existe diferencia significativa
Turbiedad	95%	3.57E-15	Existe diferencia significativa
Caudal	95%	2.68E-03	Existe diferencia significativa

**Tabla 16.** Resultados del análisis de varianza Quebrada Lorenzo (ANOVA).

QUEBRADA LORENZO			
Análisis de varianza (ANOVA)			
Parámetro	Intervalo de confianza	P	Criterio
OD	95%	0.338592441	No existe diferencia significativa
DBO	95%	2.82E-15	Existe diferencia significativa
DQO	95%	9.13E-22	Existe diferencia significativa
Alcalinidad	95%	0.579015429	No existe diferencia significativa
Dureza	95%	4.61E-18	Existe diferencia significativa
SST	95%	0.00105197	Existe diferencia significativa
pH	95%	0.023939586	Existe diferencia significativa
Temperatura	95%	4.61E-58	Existe diferencia significativa
Conductividad	95%	0.106832016	No existe diferencia significativa
Turbiedad	95%	8.33836E-06	Existe diferencia significativa
Caudal	95%	1.72E-12	Existe diferencia significativa



**Tabla 17.** Resultados del análisis de varianza Quebrada Lorenzo (Tukey).

Prueba estadística Tukey			
Nivel de significancia ( $\alpha$ ): 0.05			
Parámetro	Criterio	Puntos	Quebrada
Alcalinidad	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
Dureza	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
SST	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
pH	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
Temperatura	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
Conductividad	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
Turbiedad	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
Caudal	Hay diferencia significativa	Todos	Dios te Dé y Lorenzo
OD	No hay diferencia significativa	Punto 1 y Tributario 1	Dios te Dé
		Punto 1 y Punto 2	Lorenzo
DBO	No hay diferencia significativa	Punto 1 y Punto 2;	Dios te Dé
		Tributario 1 y Tributario 2	
DQO	No hay diferencia significativa	Punto 1 y Tributario 1;	Dios te Dé
		Punto 2 y Tributario 2;	
		Punto 2 y Punto 3;	
		Tributario 2 y Punto 3.	

## 8. CONCLUSIONES

En las áreas de estudio correspondientes a la quebrada Lorenzo y Dios te Dé, se lograron identificar fuentes de contaminación difusa, tales como, escorrentía en pequeños cultivos de pancoger y aguas residuales domésticas. Adicionalmente en la cuenca de la quebrada Dios te Dé, se hallaron puntos de contaminación difusa que corresponden a la minería la cual predomina en esta cuenca; lo que a través del tiempo ha generado focos de contaminación puntuales, principalmente por la actividad extractiva aurífera en las Unidades de Producción Minera (UPM).

Se encontró que hay disposición de residuos sólidos en terrenos baldíos, puesto que no se cuenta con un sistema de recolección de estos, en los terrenos dispuestos se exponen en algunas ocasiones a incineración por parte de la comunidad.

Por medio de los índices de calidad y contaminación se logró identificar que el principal aportante a la contaminación de la quebrada Lorenzo proviene de las aguas residuales domésticas, adicionalmente se identificó la presencia de mercurio, aunque en el área de influencia de la quebrada no existe presencia de minería aurífera. En el caso de la quebrada Dios te Dé, la principal afección se debe a la contribución de aguas residuales por las labores mineras que introducen altas cargas de sólidos, metales; además las aguas residuales domésticas también inciden en la calidad.

La quebrada Dios te Dé presentó un índice de calidad de agua entre aceptable y bueno, además una contaminación alta (punto 2) de acuerdo al ICOSUS y el ICOMI. La quebrada Lorenzo, por su parte, presentó un índice de calidad aceptable y contaminación media de acuerdo al ICOMO.

Mediante el cálculo de la huella hídrica gris se determinó un volumen de 230 m<sup>3</sup> de agua para asimilar la carga de mercurio vertida en las dos UPM estudiadas y 166.374 m<sup>3</sup> de agua para sólidos; también se evidenció la introducción de diferentes metales a causa de los vertimientos en las fuentes hídricas en la quebrada Dios te Dé. Esto

permitió identificar los fuertes impacto ambientales causados por el proceso minero en el recurso hídrico.

## **9. RECOMENDACIONES**

Generar planes de monitoreo al recurso hídrico que permita afianzar las bases ya adquiridas, acerca de la calidad del agua y el comportamiento de esta en el tiempo.

Incentivar a la educación ambiental y manejo de los recursos naturales a las comunidades aledañas a la zona de influencia de las labores mineras, para generar conciencia, apropiación y cuidado de los recursos naturales de la zona.

Contribuir con propuestas que generen cambios de tecnología en la extracción de oro que sean amigables con el medio ambiente.

Es importante a futuro incluir estudios con indicadores biológicos y analizar el contenido de Mercurio presente en los lodos de las quebradas para comprender de mejor manera la dinámica de este contaminante en el proceso de la minería.

## REFERENCIAS

- Albert, S., Kvennefors, C., Jobs, K., Kera, J., & Grinham, A. (2017). Environmental change in a modified catchment downstream of a gold mine, Solomon Islands. *Environmental Pollution*, 231(Part 1), 942-953. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.113>
- Alcaldía Municipal Suárez-Cauca. (2016). Plan de Desarrollo Municipal Suárez, Cauca (pp. 68, 76). Suárez, Cauca.
- Alcaldía Municipal Suárez-Cauca. (2017). Geografía de Suárez. [Suarez-cauca.gov.co](http://suarez-cauca.gov.co). Recuperado: 4 Septiembre del 2017, de [http://suarez-cauca.gov.co/informacion\\_general.shtml#geografia](http://suarez-cauca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia)
- Altenburger, R., Ait-Aissa, S., Antczak, P., Backhaus, T., Barceló, D., & Seiler, T. et al. (2015). Future water quality monitoring — Adapting tools to deal with mixtures of pollutants in water resource management. *Science Of The Total Environment*, 512-513, 540-551. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.057
- Alvarez Pugliese, C, E. (2018). Aproximación A La Estimación De La Huella Hídrica Minera En El Municipio De Suarez (Cauca). Universidad Del Valle. Santiago De Cali
- Arango, M., Álvarez, L., Arango, G., Torres, O., & Monsalve, A. (2008). Calidad Del Agua De Las Quebradas La Cristalina Y La Risaralda, San Luis, Antioquia. *Revista Eia*, (9), 121-141. Recuperado: 19 de Noviembre del 2017, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372008000100010&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372008000100010&lng=en&tlng=es).
- Barasa, B., Kakembo, V., & Karl, T. (2016). Characterization of artisanal gold mining activities in the tropics and their impact on sediment loading and stream flow

- in the Okame River catchment, Eastern Uganda. *Environmental Earth Sciences*, 75(14). <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-016-5876-y>
- Barrenechea, A. (2010). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Manual I: teoría. Lima: Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la salud (OMS)
- Bibiano, Luvina, & Gárfias, J., & Llanos, Hilario (2015). Hidrogeoquímica y procesos naturales de ablandamiento del agua subterránea en sistemas kársticos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI (3). ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3535/353541047005>
- Branco, S.M. 1984. Limnología Sanitaria, Estudio de la Polución de aguas continentales. Ser. Biol. Monogr.28, OEA. 120p.
- Breña, A. & Breña, J. (2009). Problemática del recurso agua en grandes ciudades: zona metropolitana del valle de México. UAM-I, Depto. de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.
- Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., Tozer, R.G., 1970. A water quality index – do we dare? *Water Sew. Works* 117, 339–343.
- Bustamante, N, Danoucaras, N, McIntyre, N, Díaz-Martínez, J, & Restrepo-Baena, O. (2016). Review of improving the water management for the informal gold mining in Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (79), 163-172. <https://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.n79a16>
- Camacho, L., & Díaz Granados, M. (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y de la calidad del agua en ríos - caso río Bogotá. Seminario Internacional La Hidroinformática En La Gestión Integrada De Los Recursos Hídricos, 78.

- Cañas Arias J. (2013). Determinación y evaluación de índices de contaminación (ICOS) en cuerpos de agua. (Licenciatura). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/10901/1/articulo%20final.pdf>
- Casallas, M., & Martínez, J. (2016). Panorama de la minería del oro en Colombia. *Ploutos*, 5(1), 20-26. Recuperado de <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/plou/article/view/1386>
- Castro Huertas, M. (2015). Aplicación del qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia (Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Castro, M; Almeida, J; Ferrer, J & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: Evolución y tendencias a nivel global. Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá Colombia.
- Chán S, M. y Peña, W. (2014). Evaluación de la calidad del agua superficial con potencial para consumo humano en la cuenca alta del Sis Icán, Guatemala. Cuadernos de Investigación UNED, [En línea] (vol.7 n.1), p.1. Disponible en: [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-42662015000100019&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-42662015000100019&script=sci_arttext&tlng=en) [Visitado 6 Sep. 2018].
- Chavarro, A. G. & Gélvez-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. *Mutis* 6(2), 19-31.
- Cheremisinoff, N. P. (2002). Handbook of water and wastewater treatment and technologies. Boston: Ed. Pollution Engineering. Oxford Auckland Johannesburg Melbourne New Delhi.
- Chigbu P, Gordon S y Strange T (2005). Fecal coliform bacteria disappearance rates in a north-central - Gulf of Mexico estuary. *Estuar Coast Shelf Sci.* 65:309-318.

- Cobbina, S., Myilla, M., & Michael, K. (2013). Small Scale Gold Mining And Heavy Metal Pollution: Assessment of Drinking Water Sources In Datuku In The Talensi-Nabdam District. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 2(1), 96-99.
- Combariza, B.D.A. 2009. Contaminación por Metales Pesados en el embalse del Muña y su relación con los niveles en sangre de Plomo, Mercurio y Cadmio y alteración de salud en los habitantes del municipio de Sibaté (Cundinamarca) pp.1– 115. Trabajo de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- Cordy P, Veiga M, Salih I, Al-Saadi S, Console S, Garcia O, et al. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of the Total Environment*. 2011; 410-411:154-160. 3.
- Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). (2011). Estudio De Actualización Del Modelo De Calidad Del Agua Del Río Palo 2011 Tramo Puente De Guachené – Bocas Del Palo (pp. 1 -54). Popayán.
- Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC (2006). Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del Cauca: Distrito Minero de Suárez. Recuperado: 28 Agosto del 2017, de <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA%20SUAREZ/MINERALIZACION%20Suarez.pdf>
- Correa, W., Soto, A., & Larmat, F. (2009). Cuantificación de mercurio por espectrometría de absorción atómica en aguas del río Cauca en la zona urbana de Cali. Tesis de Grado, Universidad del Valle, Facultad de Ciencias. Departamento de Química, Cali.



CORTOLIMA. (2019). Gestión integral del recurso hídrico. Revisado: 1 November 2019, from <https://www.cortolima.gov.co/cuenca-gual/gesti-n-integral-recurso-h-drico>

Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por medio del cual se expide el Decreto Único. República de Colombia.

Defensoría del Pueblo. (2015). La minería sin control Un enfoque desde la vulneración de los Derechos Humanos (p. 41). Bogotá, D. C. Colombia.

Devia, R. (2015) Decreto No 275-3-1 Del 01 De Febrero De 2013.

Díaz Arriaga, F. (2015). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista De Salud Pública*, 16(6), 947-957. <http://dx.doi.org/10.15446/rsap.v16n6.45406>

Díaz-Martínez, J., Danoucaras, N., McIntyre, N., Bustamante, N., & Restrepo-Baena, O. (2016). Review of improving the water management for the informal gold mining in Colombia. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (79). <http://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.n79a16>

Diego, A. Chalarca Rodríguez, R. Mejía, R, Aguirre R, (2007). Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Revista Facultad de Ingeniería N.o 40*. pp. 41-58

Drude, L & Malm, O, L. (2008). “Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: uma análise das áreas críticas.” *Estud. av.* Pp. 173-190.

Elosegi, A. & S. Sabater. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Primera edición. Edición en español Fundación BBVA. 424p.

Espinosa-Loréns, Ma. del C., & Fernández, A., & López, M., & Ramos, Y., & Correa, O., & Álvarez, C. (2012). Determinación de sustancias húmicas en lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Revista Cubana de Química*, XXIV (2). ISSN: 0258-5995. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=4435/443543726009>

European Food Safety Authority (efsa). 2015. Recuperado de: <http://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/metals>.

Gamboa García, D. (2015). Valoración de impactos ecológicos por minería de oro en río Guabas, Valle del Cauca, Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 6(2), 243. <http://dx.doi.org/10.22490/21456453.1420>

García, G, A. (2013). Evaluación de la contaminación por vertimiento de mercurio en la zona minera, Pacarní - San Luis departamento del Huila. Corporación Universitaria del Huila CORHUILA.

Garzón Gutiérrez, J., & Rodríguez Miranda, J. (2015). Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte. *Universidad Y Salud*, 17(1), 132-144.

Gómez Hernández, S., & Rojas Cano, S. (2014). Afectación ambiental de la calidad del Agua de la Quebrada Cascabel generada por la explotación minera artesanal del municipio de Marmato Departamento de Caldas (Maestría). Universidad de Manizales.

González Valencia, Juan Esteban, L. J. Montoya, A. Botero, D. Arévalo, y V. Valencia. 2012. «Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia)». *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* 12(7):27-44.

- Gualdrón Durán, L. (2016). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos. *Revista Dinámica Ambiental*, 1, 83-102.
- Güiza Suárez, L. (2011). Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia. *Opinión Jurídica*, edición especial, pp.123-140.
- Horton, R.K., 1965. An index number system for rating water quality. *J. Water Pollut. Control Fed.* 37 (3), 300–306.
- Hoyos Chaverra, M., Rodriguez Barrientos, D., & Torres Quintero, J. (2018). Evaluación Del Recurso Hídrico Superficial En La Subcuenca Hidrográfica Del Río Frío En El Departamento De Cundinamarca: Oferta, Demanda Y Calidad Del Agua. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(1), 127-136. doi: 10.22490/21456453.2075
- Huang, Z., Pan, X., Wu, P., Han, J., & Chen, Q. (2014). Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China. *Food Control*, 36(1), 248-252. doi: 10.1016/j.foodcont.2013.08.036
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 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. 10 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2005). PSO Determinación De Alcalinidad Por Potenciometría (Versión 1,00). Programa De Fisicoquímica Ambiental. Colombia

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2007). Dureza Total en Agua con EDTA por Volumetría (Versión 1,00). Subdirección De Hidrología - Grupo Laboratorio De Calidad Ambiental. Colombia

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2007). Demanda Química De Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Volumetría (Versión 1,00). Subdirección De Hidrología - Grupo Laboratorio De Calidad Ambiental. Colombia

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2005). Demanda Bioquímica De Oxígeno – 5 Días, Incubación Y Electrometría (Versión 1,00). Subdirección De Hidrología - Grupo Laboratorio De Calidad Ambiental. Colombia

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2007). Sólidos Suspendidos Totales En Agua Secados A 103 – 105 °C. (Versión 1,00). Subdirección De Hidrología - Grupo Laboratorio De Calidad Ambiental. Colombia

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM (2002). Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos, Aguas superficiales y Subterráneas

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM. 2015. Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C.

Li, G., Lei, Y., Ge, J., & Wu, S. (2017). The Empirical Relationship between Mining Industry Development and Environmental Pollution in China. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 14(3), 254. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph14030254>

López, I., Figueroa, A., & Corrales, J. (2016). Un mapeo sistemático sobre predicción de calidad del agua mediante técnicas de inteligencia computacional. *Revista*

Ingenierías Universidad De Medellín, 15(28), 35-52. doi:  
10.22395/rium.v15n28a2

Mamian, L. L., & Zamora, G. H. (2016). Estudio ecológico del cangrejo de río, *Hypolobocera* sp (Crustacea, decapoda) en la quebrada mano de oso, jardín botánico de Popayán, municipio de Timbío, Cauca – Colombia.

Martínez, G., Fermín, I., Brito, F., Márquez, A., De La Cruz, R., Rodríguez, G. & Pinto, F. 2013. Calidad de las Agua del Caño Mánamo, Delta del Río Orinoco, Venezuela. Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela. 52(1): 17-27

Martínez, L. (2010). Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa, Barcelona.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2007). Resolución 2115 del 2007. Colombia

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Resolución 0631 del 2015. Colombia

Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento básico (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS 2000. Colombia.

Mosquera Chaverra, L. (2016). Evaluación exploratoria de la calidad del agua del río san juan en el municipio de Tadó, chocó, por el impacto que causan los vertimientos mineros. Magister. Universidad de Manizales.

Nava-Ruíz, C. & Méndez-Armenta, M., (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). Archivos de Neurociencias, 16(3), pp.140–147.

- Ocampo, A. (2013). Evaluación del estado actual de la calidad del agua de la quebrada la Jaramilla, municipio de la tebaida, departamento del Quindío. Universidad de Manizales. Facultad de ciencias contables, económicas y administrativas maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente.
- Olivero Verbel J, Caballero Gallardo K, Negrete Marrugo J. (2011). Relationship Between Localization of Gold Mining Areas and Hair Mercury Levels in People from Bolivar, North of Colombia. *Biological Trace Element Research*.144 (1-3):118-132.
- ONU (2018). ¿Puede ayudarnos la naturaleza a mejorar la gestión del agua? Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2018/03/1429362>
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). *Minería ambiental* (1st ed., pp. 124-146). [S.l.]: Ediciones GEMM - Aula2punto.net.
- Palleiro Suárez, I. (2016). *Influencia de la Escorrentía Rural Sobre el Aporte De Metales Pesados y Sedimentos al Sistema Fluvial: Análisis a Escala de Cuenca*. Doctorado. Universidad de la Coruña.
- Pantoja, F. & Pantoja, S. (2016). Problemas y desafíos de la minería de oro artesanal y en pequeña escala en Colombia. En: *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*. rev.fac.cienc.econ, 24 (2), DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rfce.2217>
- Pardavé, Walter & Pedro Delvasto. (2017). «Estimation of the water footprint in a small scale gold ore beneficiation plant located in the municipality of Vetas, Santander, Colombia». En XVI World Water Congress. Quintana Roo, Mexico.
- Pérez O, M., & Betancur V, A. (2016). Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia. *Sociedad Y Ambiente*, 4(10), 95-96.

- Pérez Osorio, Gabriela, & Arriola Morales, Janette, & García Lucero, Tania, & Saldaña Blanco, María Lourdes, & Mendoza Hernández, José Carlos (2016). Evaluación de la calidad del agua de cuatro jagüeyes del parque estatal “flor del bosque”, puebla, México. *Ra Ximhai*, 12 (4), ISSN: 1665-0441. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=461/46146927009>
- Pérez, A & Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. Universidad de Costa Rica
- Pérez, M. (2014). Conflictos ambientales en Colombia: inventario, caracterización y análisis. Cali (Colombia): Working Paper, Universidad del Valle, 70 p.
- Pérez, Mario Alejandro, Peña, Miguel Ricardo, & Alvarez, Paula. (2011). Agroindustria cañera y uso del agua: análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Ambiente & Sociedade*, 14(2), 153-178. <https://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2011000200011>
- Plazas, P. W. (2018). Evaluación temporal del impacto causado por las cargas contaminantes de los vertimientos realizados a la quebrada La Jabonera y a un tramo del río Las Ceibas en sector rural de Neiva – Huila. Universidad de Manizales. Colombia.
- Ponce, Á. (2005). Distritos Mineros: Exportaciones e Infraestructura de Transporte. Energética. Bogotá: UPME.
- Protocolo de Calidad del Agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días por incubación y electrometría, Versión 02. Subdirección de Hidrología - Grupo Programa de Fisicoquímica Ambiental. 2007. 9p.
- Ramírez Moreno, G. & Ledezma Rentería, E. (2007). Efectos de las actividades socio-económicas (minería y explotación maderera) sobre los bosques del

departamento del Chocó. Revista institucional Universidad Tecnológica del Chocó, 26(1), pp.58-65.

Ramírez, A. & Viña, G. (1998). Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Bogotá, Colombia: Panamericana, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro Índices De Contaminación Para Caracterización De Aguas Continentales. Formulaciones Y Aplicación. C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro Bucaramanga, vol.1 (no.3).

Ramírez, A., Restrepo, R., Cardeñosa, M. (1999). Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales y Vertimientos. Formulaciones. . Ciencia y Tecnología y Futuro 1(3), 135-15.

Ramos Ortega, L., Vidal, L., Vilardy Q, S., & Saavedra-Díaz, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de santa marta, caribe colombiano. Acta Biol. Colomb, Vol. 13(No. 3), 87 - 98.

Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2004). Arsenic and Heavy Metal Pollution of Soil, Water and Sediments in a Semi-Arid Climate Mining Area in Mexico. Water, Air, & Soil Pollution, 152(1-4), 129-152. <http://dx.doi.org/10.1023/b:wate.0000015350.14520.c1>

Restrepo Valencia, I. (2015). Evaluación de la calidad del recurso hídrico del río Cabí a través de la formulación de un índice de contaminación asociado a la actividad minera aurífera (Maestría). Universidad de Manizales.

Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz-Lagos, M., & González, E.E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16 (2), pp. 66-77.



- Roldán, G. (2003). Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: uso del método BMWP/Col. Editorial Universidad de Antioquia. Colección ciencia y tecnología. Medellín, Colombia
- Rubio Giraldo, A., Amézquita Bautista, L., & Martínez Torres, E. (2017). Determinación de la capacidad de asimilación del vertimiento de la PTAR del municipio de Tenjo Cundinamarca en la quebrada Churuguaco mediante el modelo qual2kw (Especialización). Universidad Católica de Colombia.
- Saldarriaga A, Villegas C, Arango S. (2013). The public good dilemma of a non-renewable common resource: A look at the facts of artisanal gold mining. *Resources Policy*. 38(2):224-232. 4.
- Sánchez C, R. (2019). Determinación de la contaminación por metales pesados (plomo, cromo, cadmio y mercurio) en aguas del río Cauca, en la zona urbana de la ciudad de Cali y evaluación de la mutagenicidad utilizando el test de Ames (Maestría). Universidad Del Valle.
- Sierra, L.F. (2015). Contribución al diagnóstico de calidad del agua en la quebrada las Brujas en el municipio de la Vega – Cundinamarca. Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente. Bogotá
- Silva Numa, S. (2014). La minería en Colombia: la maldición de los recursos naturales. *El Tiempo*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13366835>
- Simpson, S.L., Batley, G.E., 2007. Predicting metal toxicity in sediments: a critique of current approaches. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 3 (1), 18–31.[37].
- Simpson, S.L., Spadaro, D.A., 2016. Bioavailability and chronic toxicity of metal sulfide minerals to benthic marine invertebrates: implications for deep sea

exploration, mining and tailings disposal. *Environ. Sci. Technol.* 50 (7), 4061–4070.

Soni, H.B. and S. Thomas (2014) Assessment of surface water quality in relation to water quality index of tropical lentic environment, Central Gujarat, India. *International Journal of Environment.* 3 (1): 168-176.

Torres, Cruz & Patiño. (2009). “Índices de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas para la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8 (15), pp. 79-94.

Torres, P., Cruz, C. y Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8(No. 15), pp. 79-94.

Tripathi, M., & Singal, S. (2019). Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India. *Ecological Indicators*, 96, 430-436. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.025

Turizo Tapia, A., Caballero Gallardo, K., & Olivero Verbel, J. (2014). Mercurio en el distrito minero de San Martín de Loba, sur de bolívar (Colombia). En M. J.L & R. J.I, *Hacia un contexto de las ciencias ambientales: Iberoamérica. Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales SUE-Caribe y VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental* (1st ed., p. 87). Santa Marta, Colombia. Recuperado de <http://maestriaambiental.com/Memorias2014.html>

UNESCO (2018). Launches a pioneering tool to monitor water quality. Recuperado de <https://en.unesco.org/news/unesco-launches-pioneering-tool-monitor-water-quality>

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME (2016). Guía Metodológica para la evaluación de la Huella Hídrica del sector Minero Colombiano. Bogotá: UPME.

UPME (2015). Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - diseño de herramientas para la planeación sectorial. Bogotá. (39 – 40)

Villafrades Torres, R. (2017). El agua y la huella hídrica en Colombia. Recuperado de <https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?El-agua-y-la-huella-hidrica-en-Colombia>

Waite, T. 1984. Principles of water quality. Academic, Orlando, Florida, EEUU. 289 p.

World health organization (WHO). 2004 Guidelines for drinking-water quality. Vol 1. Recommendations, 2nd ed. Geneva.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2018). The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions. Paris, UNESCO.

Zapata L, Bock B, Palacio J. (2014). Mercury Concentrations in Tissues of Colombian Slider Turtles, *Trachemys callirostris*, from Northern Colombia. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 92 (5):562-6. 5.

## ANEXOS

### Anexo 1. Encuesta General Sobre el Recurso Hídrico y Saneamiento Básico.



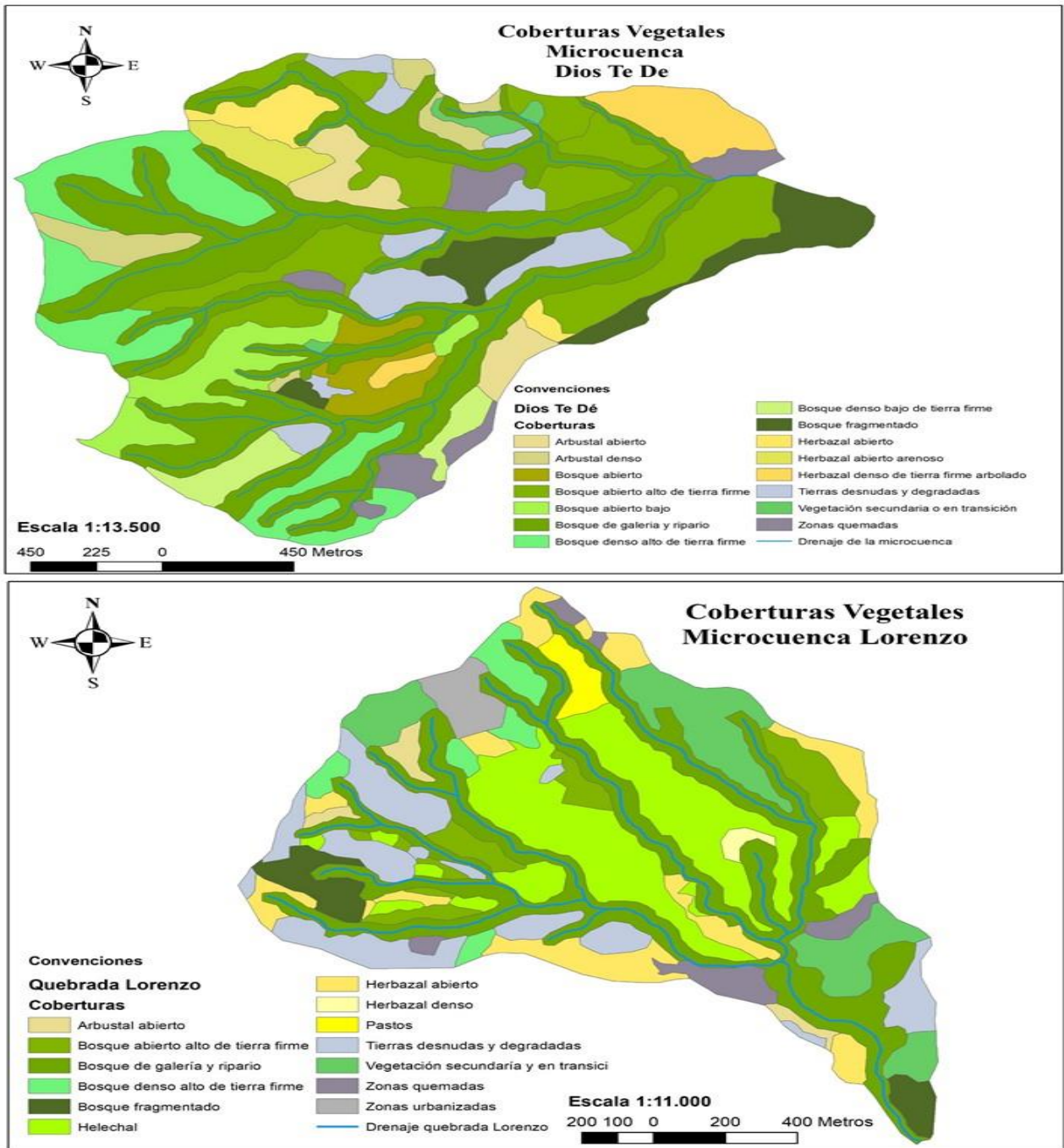
UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
DOCTORADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIAS AMBIENTALES  
*José Antonio Gallo Corredor*

Fecha								
Hora:								
Lugar:								
Encuesta N°: _								
Encuestador:								
Número del Usuario:								
Vereda:								
Coordenada: _								
Nombre y apellido del Encuestado:								
<b>PREGUNTAS SOBRE USO, VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS</b>								
1.	<b>¿Cuáles son las principales actividades económicas de la vereda?:</b>							
	Labores de minería		Comercio		Agricultura		Ganadería	
	¿Otra actividad cuál?							
2.	<b>¿Cuenta con servicio de agua en su vivienda?</b>							
	SI		NO					
3.	<b>¿Cómo es el suministro de agua en esta comunidad?</b>							
	Acueducto Veredal		Nombre de la quebrada					
	Acueducto Municipal			Nacimiento				
	Rio/quebrada		Nombre de la quebrada					
	Carro cisterna		Pozo		Agua de lluvia			
	¿Otro Cuál?							
4.	<b>El agua que llega del acueducto la usa en otras labores como:</b>							
	Riego para cultivos		Ganadería		Labores de Minería			
	Lavar carros		Lavar motos					
	¿Otros usos Cuáles?							
5.	<b>¿El agua que llega a su vivienda tiene algún tipo de tratamiento para potabilizarla?</b>							
	SI		NO					
6.	<b>¿El agua llega a su vivienda todos los días del año?</b>							
	SI		NO					

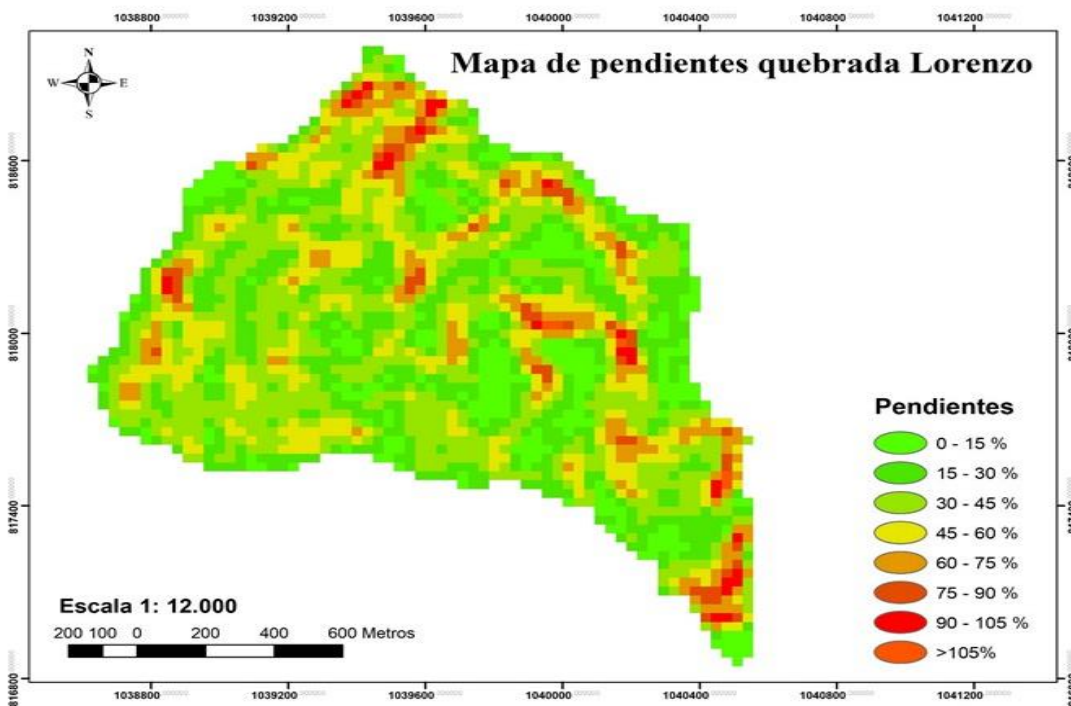
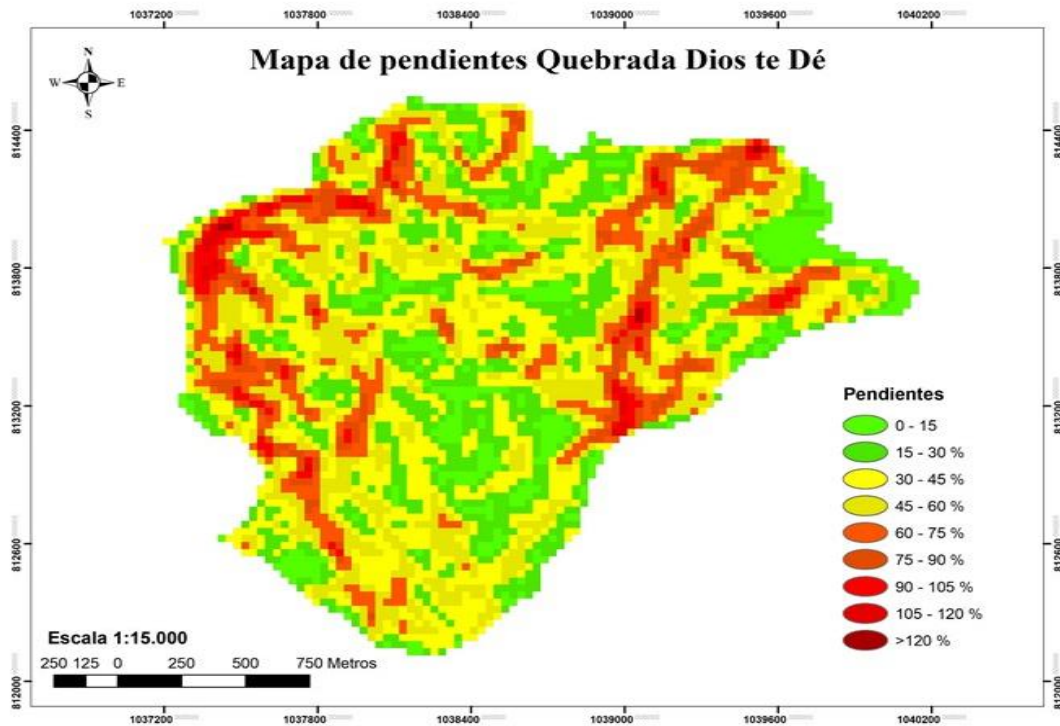
7.	<b>¿Sabe usted si el agua que consume se le realiza análisis fisicoquímicos y microbiológicos periódicamente?</b>			
	SI		NO	
8.	<b>¿Cómo considera que es la calidad del agua en su comunidad?</b>			
	Muy buena.		¿Por qué?	
	Buena.		¿Por qué?	
	Regular.		¿Por qué?	
	Mala.		¿Por qué?	
	Muy mala.		¿Por qué?	
9.	<b>¿Tiene conocimiento si se han presentado enfermedades en miembros de la comunidad o de su familia por consumir el agua que llega a su vivienda?</b>			
	SI		NO	
	¿Qué tipo de enfermedades?			
10.	<b>¿Cuándo le llega agua turbia a su hogar la hierve y luego la consume?</b>			
	SI		NO	
11.	<b>Utiliza el agua que sale de las labores de minería para:</b>			
	Uso doméstico		Riego en la agricultura	
	Dar de beber a los animales		No la usa	
	¿Otro uso cuál?			
12.	<b>¿En su vereda hay servicio de alcantarillado?</b>			
	SI		NO	
13.	<b>Los pobladores de su vereda que no tienen servicio de alcantarillado utilizan:</b>			
	SI		NO	
14.	<b>¿Dónde depositan o que hacen con los residuos sólidos de su vivienda?</b>			
	Los entierran		Los queman	
	Los depositan en el bosque		Los depositan en los sitios de cultivo	
	Los botan a otros lotes		Los botan dentro del patio	
	Los botan a la quebrada		Hacen compost o bioabonos	
	Los botan al río			
15.	<b>¿Cuáles cree usted que son las posibles fuentes de contaminación ambiental asociadas a las fuentes hídricas de abastecimiento (quebradas) de su vereda?</b>			
	Agricultura		Aguas residuales de labores de minería	
	Ganadería		Turismo	
	Aguas residuales domésticas			
	¿Otra fuente de contaminación?			
	¿Cuál?			

**Anexo 2.** Mapa de coberturas Vegetales, Quebrada Dios te Dé y Lorenzo.

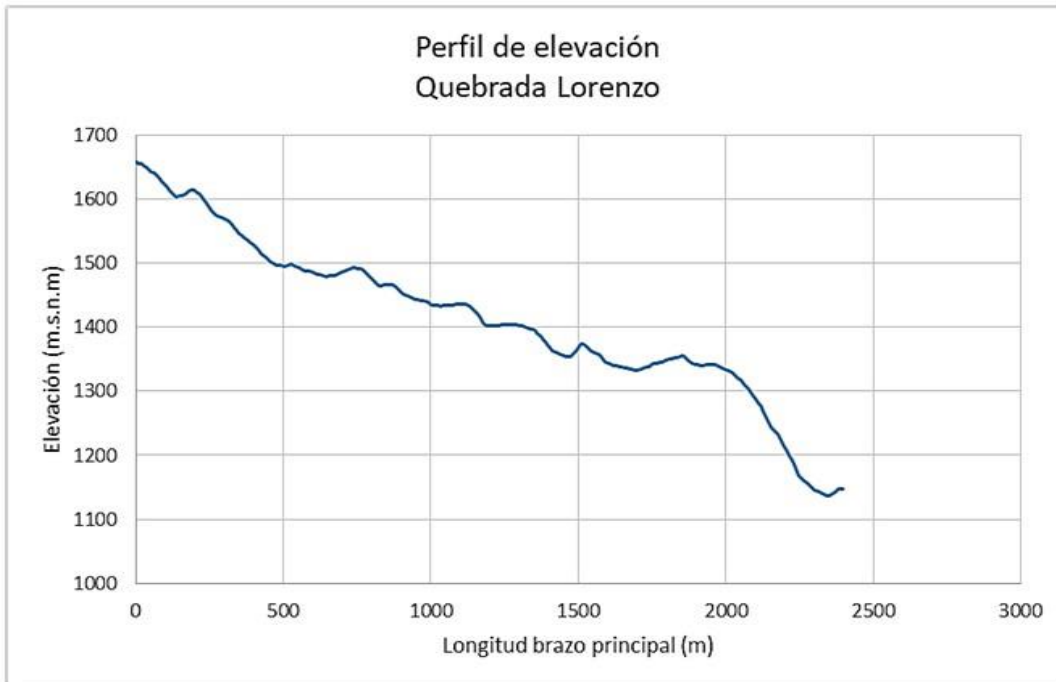
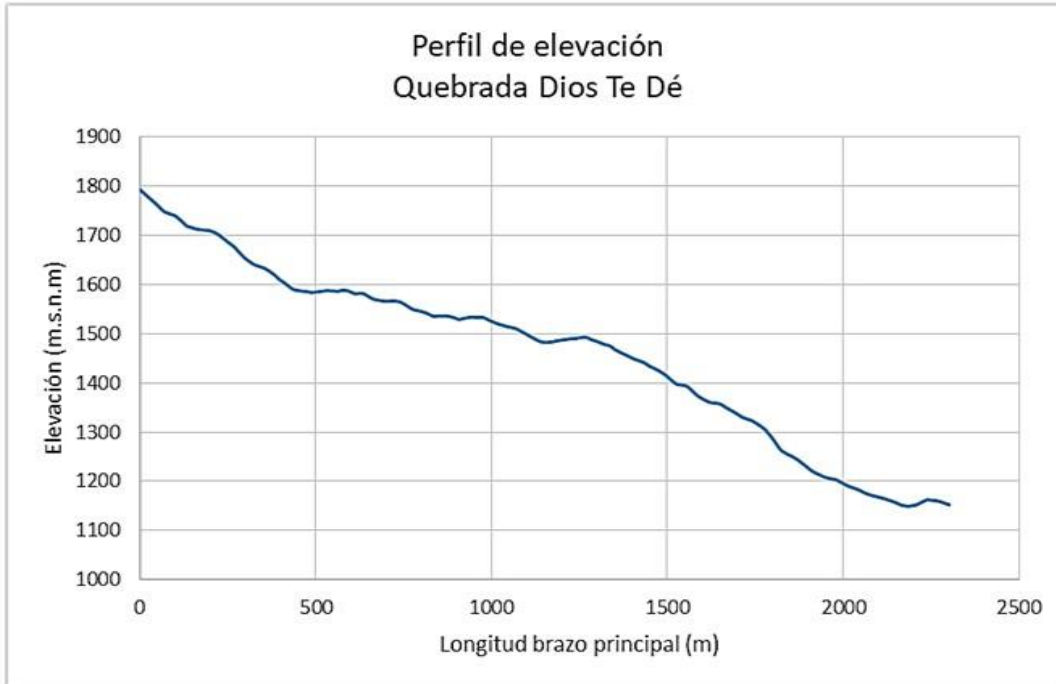
Las coberturas fueron una adaptación de la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover Adaptada Para Colombia. Escala 1: 100.000 e interpretación de imágenes satelitales Lansat del año 2018.



**Anexo 3.** Mapa de pendiente y perfiles de elevación del cauce principal de las quebradas Dios te Dé y Lorenzo



### Continuación del Anexo 3





#### Anexo 4. Cálculo tipo del índice de calidad del agua ICA – IDEAM

Se presenta el cálculo del ICA-IDEAM para el punto 1 de la quebrada Dios té Dé

##### Calculo de subíndices

%OD = 101.12	SST = 8.3333 mgSST/L	DQO = 16.4384 mgO <sub>2</sub> /L
I <sub>OD</sub> = 1-(0.01%OD -1)	I <sub>SST</sub> = 1-(-0.02+0,003SST)	Si DQO ≤ 20 entonces
I <sub>OD</sub> = 1-(0.01*101.12-1)	I <sub>SST</sub> = 1-(-0.02+0.003*8.3333)	I <sub>DQO</sub> = 0.91
I <sub>OD</sub> = 0.9888	I <sub>SST</sub> = 0.995	

C.E = 68.3333 μS/cm	pH = 7.8400
I <sub>CE</sub> = 1-10 <sup>(-3.26+1.34log<sub>10</sub>C.E)</sup>	Si 7 < pH ≤ 8 I <sub>pH</sub> = 1
I <sub>CE</sub> = 1-10 <sup>(-3.26+1.34log<sub>10</sub> (68.3333))</sup>	
I <sub>CE</sub> = 0.8421	

##### Cálculo del ICA-IDEAM

A partir del cálculo de los sub índices se halla el ICA-IDEAM de la siguiente forma

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

Donde W es la ponderación de cada sub índice; en este caso corresponde a 0.2

$$ICA-IDEAM = 0.2*(0.9888 + 0.995 + 0.91 + 0.8421 + 1)$$

$$ICA-IDEAM = 0.9472$$

## Anexo 5. Cálculo tipo de los índices de contaminación ICOS

Se presenta el cálculo del ICOS para el punto 2 de la quebrada Dios te Dé

### ICOMI

Sub-índices

$I_{\text{Conductividad}}$

C.E=398.6667  $\mu\text{S/cm}$

C.E >270  $\mu\text{S/cm}$  Entonces

$I_{\text{Conductividad}} = 1$

$I_{\text{Dureza}}$

Dureza=166.8484 mgCaCO<sub>3</sub>/L

Dureza > 100mgCaCO<sub>3</sub>/L

$I_{\text{Dureza}} = 1$

$I_{\text{Alcalinidad}}$

Alcalinidad=16.2054 mgCaCO<sub>3</sub>/L

Alcalinidad < 50 mgCaCO<sub>3</sub>/L

$I_{\text{Alcalinidad}} = 0$

$$\text{ICOMI} = \frac{1}{3}(I_{\text{Conductividad}} + I_{\text{Dureza}} + I_{\text{Alcalinidad}})$$

$$\text{ICOMI} = \frac{1}{3}(1 + 1 + 0)$$

$$\text{ICOMI} = 0.6667$$

Para el caso del ICOMINERO e ICOMO se realiza el cálculo tipo con el punto 3 de la quebrada Dios te Dé

### ICOMO

Sub-índices

$I_{\text{DBO}} = 0.3148$

$I_{\text{DBO}} = -0.05 + 0.70 \log_{10} \text{DBO mg/L}$

$I_{\text{DBO}} > 30 \text{ mg/L}$

$I_{\text{DBO}} = 1$

$I_{\text{Coliformes totales}} = 18000$

$I_{\text{Coliformes totales}} = -1.44 + 0.56 \log_{10} \text{Col. Tot NMP/100mL}$

$I_{\text{Coliformes totales}} = 0.9430$

$I_{\% \text{oxígeno}} = 101.1$

$I_{\% \text{oxígeno}} \text{ % Oxígeno} > 100\%$

$I_{\% \text{oxígeno}} = 0$

$$\text{ICOMO} = \frac{1}{3}(I_{\text{DBO}} + I_{\text{Coliformes}} + I_{\% \text{oxígeno}})$$

$$\text{ICOMO} = \frac{1}{3}(1 + 0.9430 + 0)$$

$$\text{ICOMO} = 0.3143$$

### ICOSUS

$I_{\text{SST}}$

SST=218.3333 SSTmg/L

$I_{\text{SST}} = -0.02 + 0.003 * 218.3333 \text{ SSTmg/L}$

ICOSUS=0.6350

### ICOpH

pH=8.3100

$$\text{ICOpH} = \frac{e^{-3.108 + 345 \text{pH}}}{1 + e^{-3.108 + 345 \text{pH}}}$$

ICOpH = 0.0824

### ICOMINERO

Sub-índices

Turbiedad=40.3067 NTU

$I_{\text{turbiedad}} = 0.174 * e^{0.0163 * X}$

$I_{\text{turbiedad}} = 0.3356$

SST= 54.6667 mgSST/L

$I_{\text{SST}} = -0.02 + 0.003 \text{ SSTmg/L}$

$I_{\text{SST}} = 0.1440$

Hg = 0.00884  $\mu\text{g/L}$

$I_{\text{Hg}} = 0.00364 * \text{Hg}^2 + 0.0589 * \text{Hg} + 0.0443$

$I_{\text{Hg}} = 0.0488$

$$\text{ICOMINERA} = \frac{1}{3}(I_{\text{Turbiedad}} + I_{\text{SST}} + I_{\text{Hg}})$$

$$\text{ICOMINERA} = \frac{1}{3}(0.3356 + 0.1440 + 0.0488)$$

$$\text{ICOMINERA} = 0.1748$$

## Anexo 6. Cálculo tipo de la Huella Hídrica Gris (HHG)

La huella hídrica Gris se calculó de acuerdo a los siguientes parámetros tomados de la UPM1.

$$\begin{aligned}Q_{\text{salida}} &= 6.1634 \text{ m}^3/\text{día} \\C_{\text{salida parámetro}} &= 0.0023 \text{ mg/L} \\Q_{\text{entrada}} &= 5.9591 \text{ m}^3/\text{día} \\C_{\text{entrada parámetro}} &= 0.0005 \text{ mg/L} \\C_{\text{Límite permisible parámetro}} &= 0.002 \text{ mg/L} \\C_{\text{natural parámetro}} &= 0.0000478 \text{ mg/L} \\ \text{Producción mina} &= 0.039648 \text{ kg}\end{aligned}$$

El límite permisible se obtuvo de la resolución 631 del 2015 donde se estipula el límite permisible para vertimientos a cuerpos de aguas superficiales, en este caso de mercurio; en cuanto a la concentración natural fue la medida en la parte alta de la cuenca donde no hay influencia de actividad minera aun.

Se reemplaza en la ecuación 18 y se obtiene la huella hídrica gris que deja el mercurio usado en la UPM1

$$HHG = \frac{Q_{\text{salida}} * C_{\text{salida parámetro}} - Q_{\text{entrada}} * C_{\text{entrada parámetro}}}{C_{\text{Límite permisible parámetro}} - C_{\text{natural parámetro}}} \cdot \text{Producción mina}$$

$$HHG = 176.9524 \text{ m}^3/\text{KgOro} \cdot \text{día}$$

## Anexo 7. Evidencias de Campo



Socialización del proyecto con las comunidades.



Inspección inicial del área de estudio.



Inspección inicial del área de estudio.



Establecimiento de las estaciones de muestreo.



Análisis de muestras de laboratorio.



Identificación de las unidades productivas mineras y caracterización del proceso.





Identificación de las unidades productivas mineras y caracterización del proceso.



Identificación de las unidades productivas y caracterización del proceso.



Análisis fisicoquímico de aguas