

**DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE MERCURIO PRESENTE EN EL AGUA
DE DOS QUEBRADAS, RECEPTORAS DE VERTIMIENTOS MINEROS QUE
DESCARGAN AGUAS AL EMBALSE LA SALVAJINA, MUNICIPIO DE
SUAREZ, CAUCA.**

**MELISSA ELIANA GUERRERO URRUTIA
KAROL MARYELI LÓPEZ ROSERO**



**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN 2017**

**DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE MERCURIO PRESENTE EN EL AGUA
DE DOS QUEBRADAS, RECEPTORAS DE VERTIMIENTOS MINEROS QUE
DESCARGAN AGUAS AL EMBALSE LA SALVAJINA, MUNICIPIO DE
SUAREZ, CAUCA.**



**MELISSA ELIANA GUERRERO URRUTIA
KAROL MARYELI LÓPEZ ROSERO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director trabajo de grado modalidad investigación

**Adriana Lorena Sánchez V.
Ingeniera ambiental
Magister en contaminación y toxicología ambiental.**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN 2017**

Nota de presentación:

El director y los jurados del trabajo de grado, modalidad investigación: “DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE MERCURIO PRESENTE EN EL AGUA DE DOS QUEBRADAS, RECEPTORAS DE VERTIMIENTOS MINEROS QUE DESCARGAN AGUAS AL EMBALSE LA SALVAJINA, MUNICIPIO DE SUAREZ, CAUCA.” Realizado por MELISSA ELIANA GUERRERO URRUTIA y KAROLL MARYELI LÓPEZ ROSERO. Una vez revisado el informe final y aprobada la sustentación autorizan para que se realice los trámites para optar por el título profesional de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director trabajo de investigación

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias en primera instancia a **mi Dios Jehová**, por darme las capacidades, las habilidades y porque gracias a Él y a su apoyo y guía estoy culminando una meta más en mi vida.

A mis **padres y mi hermano** por su apoyo, colaboración, empuje, amor y por el acompañamiento en todos los aspectos de mi vida.

A **mi familia**, por enseñarme el valor de la vida, del amor, por su fortaleza, apoyo y buenas energías.

A nuestra Directora de tesis **Adriana Sánchez** por su apoyo, guía y por los conocimientos impartidos. Además por su gran paciencia y por sus consejos oportunos que nos permitieron avanzar con el desarrollo de nuestro proyecto.

Al Biólogo **Arnol Arias** por su ayuda y guía, por su acompañamiento y aporte durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. **Francisco José Idrobo** por haber sido el promotor de esta investigación, por su cariño, amistad, acompañamiento y consejos a lo largo de esta investigación.

Al ing. **Carlos Torrado**, por su acompañamiento para el desarrollo de este trabajo.

A mi compañera de Tesis **Karoll Maryeli López Rosero**, porque a lo largo de nuestra formación me brindó su apoyo, me contagió de su alegría, por su entusiasmo, dedicación y fortaleza, por sus consejos y por las experiencias que nos permitieron forjar cada día nuestra amistad.

Melissa Eliana Guerrero Urrutia

DEDICATORIA

Esta tesis quiero dedicarla a **Jehová** por regalarme mis habilidades, mis capacidades, mi intelecto, la vida, las fuerzas, las ganas de luchar por mis metas, por su ayuda y guía.

A mi padre **Julio César Guerrero** por su apoyo, amor, por sus consejos, por contagiarme de su fortaleza y por enseñarme a luchar por mis metas y darme las herramientas para poder alcanzarlas.

A mi madre **Orfa Socorro Urrutia** por su amor, consejos, por sus energías y fortaleza, por su guía espiritual y por sus ánimos en los momentos difíciles, por ser mi amiga y mi compañera.

A mi hermano **Juan Miguel Guerrero Urrutia** por su cariño, amor, por acompañarme en algunos momentos de traspaso y por hacerme reír y olvidar los momentos tristes.

A mis tías **Alba, Oliva, María y Teresa** por brindarme consejos, por animarme a luchar cada día por mis sueños y por acompañarme durante este proceso.

A mis abuelos **Teresa, Miguel y Angélica** por su amor, por consentirme y por preocuparse cada día por mi bienestar.

A mis maestras espirituales **Lucy Betancourt y Escilda Meneses** por brindarme sus consejos, sus oraciones, su apoyo y su amistad incondicional.

A todos ustedes va dedicado mi trabajo, como muestra del gran amor, aprecio y gratitud que siento por ustedes.

Melissa Eliana Guerrero Urrutia

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a aquellos que estuvieron y han estado conmigo durante este proceso, a aquellos que contribuyeron a ser de mí una mejor persona, aquí donde termina un ciclo de mi vida, quiero agradecer de manera especial principalmente

A **DIOS** por darme sabiduría, por guiarme, por la fuerza, la tranquilidad, e iluminarme y permitir terminar con éxito la presente investigación, que en algún momento sentí desfallecer y parecía no tener fin.

A mi directora de Tesis **Adriana Sánchez**, por su paciencia, que, en algún momento colmamos de la suya, a ella por ser nuestra guía y ayuda, quien de manera amable y oportuna siempre estuvo ahí para brindar su apoyo y respuesta a los acertijos que siempre se presentaron a mitad de camino para el desarrollo del trabajo.

Al Biólogo **Arnol Arias** por ser una guía, ayuda, y por sus partes valiosos para el desarrollo de la presente investigación.

Al Ing. **Francisco José Idrobo** por haber sido el promotor de esta investigación, por su amistad, apoyo y consejos a lo largo de esta investigación.

Al ing. **Carlos Torrado**, por su acompañamiento para el desarrollo de esta investigación.

A mi compañera de Tesis **Melissa Eliana Guerrero**, porque a lo largo de la carrera siempre me brindo apoyo, por sus consejos, por las experiencias vividas y por su paciencia.

A **mi familia**, por el empuje, por sus energías, cariño y apoyo.

Karoll Maryeli López Rosero

DEDICATORIA

Esta tesis primeramente quiero dedicar a Dios por darme sabiduría y fuerza necesaria para enfrentar cada obstáculo presentado, por sus múltiples pruebas, para ser de mí una mejor persona, por hacerme ver que las cosas para conseguirlas hay que lucharlas, por tus bendiciones, sin ti nada sería posible.

A mi familia, conformada por mi padre Marino López, mi madre Edith Rosero, mi hermana Eliana López y abuelos por ser el motor, mi apoyo, y por creer en mi

A ellos quienes han infundido en mí, buenos valores, por inculcar que el que persevera alcanza, a ellos que siempre estuvieron pendientes y dándome muchos ánimos, cuando sentí desfallecer.

Este triunfo es de ustedes y para ustedes, los amo.

Karoll Maryeli López Rosero

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I: PROBLEMA	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	21
1.3 OBJETIVOS	23
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y REFERENTES CONCEPTUALES.....	24
2.1. DESCRIPCIÓN DEL MUNICIPIO DE SUÁREZ	24
2.1.1. LIMITES	24
2.1.2. HIDROGRAFÍA.....	24
2.1.3. RELIEVE.....	24
2.1.4. CLIMA.....	25
2.1.5. COBERTURA VEGETAL Y SUELOS	25
2.1.6. ECONOMÍA	25
2.2. BASES TEÓRICAS.....	26
2.2.1. ANTECEDENTES	26
2.2.2. Minería artesanal y de pequeña escala.....	32
2.2.3.1. Trituración.....	34
2.2.3.2. Molienda.....	34
2.2.3.3. Concentración gravimétrica	35
2.2.3.4. Amalgamación	36
2.2.4. CONTAMINACIÓN DEL AGUA A CAUSA DE LA MINERIA.....	37
2.2.4.1. Contaminación química	37
2.2.4.2. Erosión y sedimentación	37
2.2.4.3. Basura peligrosa- escombreras	37
2.2.5. LAS FORMAS DEL MERCURIO	38
2.2.6. PROCESOS DEL MERCURIO EN EL AMBIENTE	38
2.2.6.1. Movilidad del mercurio en el ambiente acuático.....	39
2.2.6.2. Mercurio en suelos	39
2.2.7. EL MERCURIO Y LA SALUD.....	39

2.2.8. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA CARACTERIZACIÓN DE VERTIMIENTOS.....	40
2.2.8.1. Temperatura	41
2.2.8.2. pH.....	41
2.2.8.3. Turbiedad.....	41
2.2.8.4. Color	41
2.2.8.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	41
2.2.8.6. Alcalinidad.....	42
2.2.8.7. Demanda química de oxígeno (DQO)	42
2.2.8.8. Sólidos.....	42
2.2.8.9. Caudal	43
2.2.8.10. Metales pesados.....	43
2.2.9. INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERÍA- ICOMINERA	44
2.3. BASES LEGALES	45
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	47
3.1. Etapa 1. Revisión bibliográfica	47
3.2. Etapa 2. Acercamiento.	49
3.3. Etapa 3. Reconocimiento de campo.....	49
3.4. Etapa 4. Recolección de muestras.....	49
3.5. Etapa 5. Análisis y resultados	52
3.6. Etapa 6. Entrega de resultados.....	52
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	53
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS REALIZADOS EN LAS UNIDADES PRODUCTORAS MINERAS-UPM DE SUÁREZ, CAUCA	55
4.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, MERCURIO EN AGUA Y SEDIMENTOS	58
4.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE MERCURIO	60
4.4.1 MERCURIO EN AGUA.....	60
4.4.2 MERCURIO EN SEDIMENTOS.....	62
4.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS-PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	64

4.5.1	CAUDAL.....	64
4.5.2	POTENCIAL DE HIDRÓGENO-pH	65
4.5.3	ALCALINIDAD.....	66
4.5.4	ACIDEZ TOTAL	67
4.5.5	TEMPERATURA.....	69
4.5.6	TURBIDEZ.....	70
4.5.7	CONDUCTIVIDAD.....	72
4.5.8	SDT- SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES.....	72
4.5.9	SOLIDOS SEDIMENTABLES.....	73
4.5.10	SÓLIDOS SUSPENDIDOS	74
4.5.11	COLOR.....	76
4.5.12	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO- DQO.....	77
4.5.13	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO- DBO ₅	78
4.6	RESULTADOS ICOMINERA- ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN MINERA.....	80
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		83
5.1	CONCLUSIONES.....	83
5.2	RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....		85
ANEXOS.....		90

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Localización puntos de muestreo Tamboral y Turbina.....	54
Imagen 2. Cocos amalgamadores.....	57
Imagen 3. Canales	57
Imagen 4. Diques de colas	57

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Esquema básico del beneficio del oro.....	33
Gráfica 2. Esquema metodológico.	48
Gráfica 3. Diagrama de los procesos de UPM1 en Suárez, Cauca.....	56
Gráfica 4. Valores de Hg en agua.	60
Gráfica 5. Valores de mercurio en sedimentos.	62
Gráfica 6. Valores de caudal.	64
Gráfica 7. Valores del Potencial de Hidrógeno.....	65
Gráfica 8. Valores de alcalinidad	66
Gráfica 9. Niveles de acidez del agua.	67
Gráfica 10. Valores de temperatura	69
Gráfica 11. Valores de Turbidez.	70
Gráfica 12. Valores de conductividad.	72
Gráfica 13. Valores de sólidos disueltos totales.....	72
Gráfica 14. Valores de sólidos sedimentables.	73
Gráfica 15. Valores de sólidos suspendidos.	74
Gráfica 16. Valores de color.....	76
Gráfica 17. Valores de DQO.....	77
Gráfica 18. Valores de DBO ₅	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del índice de contaminación por minería aurífera	45
Tabla 2. Normatividad minero ambiental colombiana.....	45
Tabla 3. Listado de parámetros a medir in situ.	50
Tabla 4. Parámetros analizados en el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la UTP.....	51
Tabla 5. Método de medición de caudal y las condiciones de aplicación.....	52
Tabla 6. Coordenadas geográficas de las plantas de beneficio.	55
Tabla 7. Resultados de los parámetros analizados en las Quebradas Turbina y Tamboral.	59
Tabla 8. Calidad de agua en función de su contenido de alcalinidad.....	67
Tabla 9. Resultados ICOMINERA para las quebradas en los diferentes muestreos.	80
Tabla 10. Recomendaciones para la aplicación de la ICOMINERA.	81

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de análisis UTP- Universidad tecnológica de Pereira- muestreo 1.....	90
Anexo 2. Informe de resultados de análisis UTP- Universidad tecnológica de Pereira- Muestreo 2.....	91
Anexo 3. Informe de resultados de análisis UTP- Universidad tecnológica de Pereira- muestreo 3.....	93
Anexo 4. Trabajo de campo, parámetros fisicoquímicos in situ.....	94
Anexo 5. Quebrada Turbina.	95
Anexo 6. Quebrada Tamboral.	96
Anexo 7. Entrega de muestras UTP –Universidad Tecnológica de Pereira.	97

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, tuvo como finalidad determinar los niveles de mercurio en las quebradas Turbina y Tamboral, receptoras de efluentes provenientes de la actividad minera de oro, en el municipio de Suarez Cauca. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira, para su respectivo análisis.

Se evaluaron parámetros fisicoquímicos como: pH, temperatura, turbidez conductividad, sólidos disueltos totales, color, sólidos sedimentables, caudal, DQO, DBO₅, alcalinidad total, sólidos suspendidos totales y acidez total. Se estimó la concentración de mercurio en sedimentos y en aguas para analizar la presencia del metal tóxico en el ecosistema.

Posteriormente estos resultados fueron comparados con la normatividad establecida en la Resolución 0631 de 2015, con la intención de analizar la afectación de las quebradas a causa de las descargas de las UPM- unidades productoras mineras.

En la determinación de mercurio en aguas se obtuvo unos niveles de <0,0008 mg Hg/L para los muestreos 1 y 2 en las quebradas Turbina y Tamboral, para el último muestreo se registró un valor de 0,003mg Hg/L en ambas quebradas; mientras que para los sedimentos se obtuvo la máxima concentración de 12,15 mg Hg/Kg en la quebrada Turbina y 2,41 mg Hg/Kg en la quebrada Tamboral, lo que indica, que el mercurio presenta más afinidad de fijarse en la materia orgánica que está fija en el suelo, donde el metal se adhiere al material particulado o en suspensión, así mismo, para los sólidos suspendidos en un punto de muestreo para la quebrada Tamboral sobrepasa el límite permisible con 60 y 764 mg/L. No obstante la variación de los parámetros fisicoquímicos analizados es poco significativa para los efluentes, debido a la influencia de las quebradas, por ser caudalosas y actuar como autodepuradoras.

Palabras claves: amalgamación, ganga, mena, mercurio, minería artesanal de pequeña escala, plantas de beneficio, relaves, vertimiento.

ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the amount of mercury in the Turbina and Tamboral streams, receiving effluents from the gold mining activity, in the municipality of Suarez Cauca. The samples were sent to the laboratory of water and food of the technological university of Pereira, for their respective analysis

There were evaluated physicochemical parameters such as: pH, temperature, turbidity, total dissolved solids, color, sedimentable solids, flow rate, COD, DBO5, total alkalinity, total suspended solids and total acidity. Was estimated the concentration of mercury in sediments and in water to analyze the presence of the toxic metal in the ecosystem.

Later these results were compared with the normativity established in the resolution 0631 of 2015 with the intention of analyzing the impact of the streams to Because of the discharges of the PMU-producing mining units

In the determination of mercury in waters, levels of <0.0008 mg Hg / L were obtained for samples 1 and 2 in the Turbina and Tamboral streams, for the last sampling a value of 0.003 mg Hg / L was recorded in both streams ; While for the sediments the maximum concentration of 12.15 mg Hg / kg was obtained in the Turbine stream and 2.41 mg Hg / Kg in the Tamboral stream indicating that the mercury has more affinity to be fixed in the organic matter that is fixed in the soil, where the metal adheres to the particulate material Or in suspension, also for suspended solids at a sampling point for Tamboral stream exceeds the permissible limit with 60 y 764 mg / L. Notwithstanding the variation of the physicochemical parameters analyzed, is not very significant for the effluents, due to the influence of the streams, for being abundant and to act like purifying.

Keywords: amalgamation, gangue, ore, mercury, small scale artisanal mining, profit plants, tailings, dumping.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los mercados internacionales de minerales como el oro dan condiciones económicas favorables, lo que propende al incremento exponencial de la explotación formal e informal de estos minerales en Colombia. Pero es la minería de tipo informal la que genera mayor preocupación, debido al uso descontrolado de insumos químicos.

A la minería de tipo informal se le asocia una serie de pasivos ambientales, debido a que este tipo de minería se está practicando sin estudios previos y sin los parámetros técnicos y ambientales, carentes en muchos casos de esquemas mínimos de seguridad. Estas condiciones propician el uso inadecuado de los recursos mineros, y pasivos ambientales tales como: la contaminación de las aguas, procesos erosivos, la destrucción de la fauna y flora y afectación de los ecosistemas en general [1].

La utilización de mercurio es una práctica común en la minería de oro, dada por la facilidad y rapidez que implica su aplicación, la independencia que brinda al minero al no requerir de mano de obra adicional, por su bajo costo y facilidad de adquisición, por el rápido flujo de caja que genera, entre otras ventajas [2]. El principal método de uso del mercurio en la minería informal es mediante la amalgamación, un proceso que involucra la mezcla del metal con arenas auríferas para formar un producto que es recuperado a manera de un botón metálico. Posteriormente, el “botón” de oro-mercurio es sometido a calor para vaporizar el mercurio y dejar el metal precioso en el fondo del recipiente [3].

Se debe prestar especial atención a la contaminación del recurso hídrico, ya que el mercurio termina asociado a los efluentes de los entables o plantas de beneficio y concentración, pudiendo contaminar aguas superficiales por derrames directos, escorrentía o acumulación y/o aguas subterráneas por infiltración.

Una vez introducida en el medio acuático, el mercurio inorgánico se transforma en metilmercurio a través de la actividad microbiana, esta forma de mercurio es la más tóxica y más biodisponible para los seres vivos. Los niveles de metilmercurio pueden acumularse en la cadena alimentaria hasta el punto que presenten un riesgo para la vida silvestre, la vida acuática y la vida de los seres humanos, debido al consumo de peces [4].

Según datos y cifras de la OMS (Organización mundial de la salud), la exposición al mercurio, incluso a pequeñas cantidades puede causar graves problemas de salud y es peligrosa para el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida, además el mercurio puede ser tóxico para los sistemas nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos; así mismo, para la OMS, el mercurio es uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública pues la principal vía de exposición humana es el consumo de pescado y marisco contaminados con metilmercurio, compuesto orgánico presente en esos alimentos [5].

De ahí que el gobierno a través de la Ley 1658 del 15 de julio de 2013 tenga como objeto reglamentar las disposiciones para el uso, importación, producción, comercialización, manejo, transporte, almacenamiento, disposición final y liberación al ambiente del mercurio en las actividades industriales, de igual manera, a través de esta ley se promueve que las instituciones de educación superior desarrollen actividades de formación, investigación y proyección social, que contribuyan a la consecución de los objetivos propuestos por determinada ley [6].

El departamento del Cauca, es una zona que por su amplia potencialidad de recursos naturales, se ha convertido en un factor importante para el desarrollo económico, pues a través de la creciente expansión minera aurífera se brindan oportunidades de empleo, sostenimiento y crecimiento del comercio entorno a ella. El municipio de Suarez, seleccionado para este estudio y perteneciente al departamento en mención, se caracteriza por poseer actividad minera artesanal, donde se emplean diversos métodos y técnicas para el proceso de beneficio y concentración del oro explotado, el cual presenta diferentes niveles de afectación ambiental dependiendo de la capacidad de proceso instalada.

El objetivo de este trabajo fue determinar la presencia de mercurio en dos quebradas, receptoras de vertimientos provenientes de la actividad minera de oro desarrollada en el Municipio de Suarez, Cauca; con la intención de contribuir en la generación de nuevo conocimiento acerca de la situación general que se desarrolla en torno a la explotación minera de oro y al uso de sustancias que ponen en riesgo la salud humana, los recursos naturales renovables y el medio ambiente.

De esta manera, este estudio de determinación de los niveles de mercurio en agua se convierte en un aporte al proceso que adelanta el gobierno por erradicar el uso

del mercurio, ya que al contar con este tipo de investigación que proporcione cifras acerca de los parámetros fisicoquímicos y la proporción de mercurio encontrados en el recurso hídrico contribuye a alertar a la sociedad de que los recursos naturales no renovables no deben ser explotados de manera descontrolada, porque se generan daños ambientales que tomarían tiempo en regenerarse por sí mismo, además esto permite al gobierno conocer la situación general que se presenta en el municipio de Suarez entorno a la actividad minera y que se impulsen acciones que propendan a la búsqueda de alternativas o posibles soluciones que mejoraran la calidad de vida de sus habitantes, también en pro de cumplir con el derecho de gozar de entornos saludables y para la protección del recurso hídrico garantizando así la calidad de éste, para uso de consumo humano.

CAPITULO I: PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La actividad minera en el municipio de Suarez, Cauca, se ha incrementado significativamente debido a que este tipo de territorios pretende lograr su desarrollo regional a través de dicha actividad, con acciones como la conformación de distritos mineros y la difusión de los avances tecnológicos que permitan mejorar su eficiencia en los procesos productivos de la extracción del mineral [7]. Sin embargo, la problemática identificada por la minería, en éste municipio, hace referencia a la producción permanente de vertimientos, que en algunos casos puede llegar a contener cantidades considerables de mercurio, lo que ha generado consecuencias negativas en los ecosistemas a los que son descargados dichos vertimientos poniendo en riesgo la vida acuática y la de los habitantes de la zona.

En la minería de oro, el uso indiscriminado y descontrolado de insumos químicos para la extracción de dicho metal precioso, genera impactos ambientales relacionados con el aporte de material particulado que puede estar contaminando las fuentes hídricas.

Actualmente, Colombia está siendo catalogada como uno de los países que contaminan el ambiente debido al uso irresponsable que se le da al mercurio en la extracción del oro. En el 2010, Colombia ocupó el segundo lugar con 75,0 Ton/año, después de China con 444,5 Ton/año, esto convierte a Colombia en el país que más contamina de los de América Latina [8].

El Mercurio es el compuesto químico más empleado; este presenta un alto grado de persistencia en el ambiente, además, su forma como metilmercurio, es de fácil asimilación en el organismo, por ende, es común encontrar altos grados de concentración en las zonas próximas a las plantas de beneficio, en los seres humanos y especies animales que han estado en contacto con el Mercurio [9].

En regiones afectadas por la minería del oro, una de las principales fuentes de contaminación, reconocida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es el consumo de agua contaminada. Aunque por lo general las aguas superficiales contienen bajos niveles de mercurio debido a que este es rápidamente consumido por microorganismos acuáticos, se ha encontrado que bajo ciertas circunstancias su concentración en el agua puede alcanzar valores alarmantes, superando

incluso los 2,0 µg/L —valor estipulado en la legislación colombiana para aquellas fuentes hídricas destinadas para consumo humano y doméstico—. En algunos municipios colombianos se han detectado concentraciones de mercurio en aguas superficiales por encima de los 3,0 µg/L y en otros lugares del mundo por encima de los 8,0 µg/L. En algunos casos se podría encontrar bajas concentraciones, pero estas también contribuyen gradualmente a la carga contaminante que afecta la salud humana [10].

La minería de oro artesanal y en pequeña escala es, por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio, la cual, somete a los trabajadores a una grave exposición; libera mercurio en el medio ambiente y genera riesgos para los habitantes de las comunidades cercanas, quienes consumen pescado contaminado con dicho insumo químico. Siendo las mujeres en embarazo y los niños las poblaciones más vulnerable. Por consiguiente, el resultado de esta actividad es la extensa degradación del medio ambiente, la alteración de los ecosistemas, consecuencias que pueden permanecer durante varias décadas después del cese de las actividades mineras y el aumento de la morbilidad en los seres humanos [11].

1.2 JUSTIFICACIÓN

La minería, en la actualidad ha incrementado significativamente su actividad de manera descontrolada. Lo cual trae consigo impactos ambientales, asociados a la carencia de conocimiento técnico en cuanto al uso y disposición del mercurio, seguimiento de aspectos de seguridad y salud ocupacional, también por el manejo inadecuado e irresponsable de la labor extractiva del mineral; además, esta sustancia que se emplea de forma indiscriminada en las plantas de beneficio, es perjudicial para el medio ambiente y en especial para la salud de las personas [8].

La actividad minera artesanal y de pequeña escala, genera consecuencias negativas, en los aspectos: sociales, económicos, culturales, salud pública y principalmente en el ambiental, es decir, las estructuras sociales y productivas se alteran [12].

En los aspectos ambiental y social se presentan diferentes afectaciones, por ejemplo, el mercurio llega a la atmósfera, debido a que una vez sea formada la amalgama oro-mercurio, esta es calentada y el mercurio elemental es evaporado,

así mismo, el mercurio se deposita en los cuerpos de agua cercanos y es transformado por las bacterias a metilmercurio, ión que se biomagnifica a través de la cadena trófica, alcanzando los peces, y eventualmente a sus consumidores, entre ellos el hombre. El metilmercurio es mucho más tóxico que el mercurio elemental, aunque ambos impactan severamente la salud de los mineros como también la calidad de vida de las personas próximas a esta actividad, tanto por consumo de pescado como por exposición directa, respectivamente [9].

Los residuos resultantes de los entables o plantas de beneficio, que generan efluentes, contienen en algunos casos cantidades de oro y mercurio, el cual no es logrado recolectar durante los procesos de lavado y amalgamación. Este tipo de proceso, se desarrolla sin un control adecuado, generando pérdidas de los recursos naturales, pues se contaminan las fuentes hídricas superficiales y subterráneas e incluso los suelos; adicionalmente, originando pérdidas económicas para el minero [8].

Actualmente, en Colombia, debido al apogeo que ha tenido la actividad minera, se ha visto demarcada principalmente por dos formas de explotaciones: la minería formal e informal. Es importante que, tanto la minería formal como la informal, deben adecuarse a la normatividad vigente a fin de que funcione sobre la base de desarrollo sostenible, esto garantiza que la minería reduzca los impactos y se les obliga a que implementen programas de gestión ambiental, de responsabilidad social y sea económicamente viable para el minero [13]. De tal manera que todas las medidas que se tomen, contribuyan a minimizar los impactos ambientales y a mejorar la condición de vida del minero y de los trabajadores.

En virtud de lo anterior, se resalta la importancia de que se genere una minería responsable, de tal manera que este sector garantice una adecuada inversión en proyectos que les permita aumentar la seguridad, la productividad y la minimización de los impactos.

El presente proyecto contribuirá a determinar, la cantidad de mercurio en las dos quebradas, receptoras de efluentes provenientes de la actividad minera de oro, con el propósito de conocer si, en la etapa del procesamiento del mineral para recuperación del oro se está realizando un adecuado manejo de los residuos. Es imprescindible, realizar este tipo de estudios que permitan conocer información cuantitativa. A fin de generar bases de conocimiento que pudiera ser de interés de entidades o instituciones dedicadas a la investigación, y que propendan a continuar con el proceso investigativo en pro de la búsquedas de alternativas o posibles

soluciones ante la problemática planteada, así mismo esto contribuye para que el gobierno nacional y los entes ambientales como la CRC –Corporación Autónoma Regional del Cauca, conozca de antemano la situación que se está presentando y los efectos negativos que se producen al entorno, la vida acuática y la de los seres humanos, para que de igual manera estas instituciones impulsen acciones, programas, proyectos entre otros, que tiendan a mitigar, minimizar, restaurar, recompensar o recuperar la zona afectada.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general:

Evaluar la presencia de Mercurio en dos quebradas, receptoras de vertimientos provenientes de la actividad minera de oro que desembocan al embalse la Salvajina, en el municipio de Suarez, Cauca.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Determinar los niveles de mercurio provenientes de la actividad minera de oro, presente en las dos quebradas receptoras de efluentes mineros en el municipio de Suarez, Cauca.
- Evaluar los parámetros físicos químicos del agua para establecer el nivel de afectación del recurso basado en el Resolución 0631 de 2015.
- Realizar un análisis de los efectos ambientales en la zona de estudio.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y REFERENTES CONCEPTUALES

2.1. DESCRIPCIÓN DEL MUNICIPIO DE SUÁREZ

El proyecto de investigación se ubica en el municipio de Suarez Cauca, ubicado al Noroccidente del Departamento del Cauca, entre las coordenadas IGAC 1'026.000 E, 802.000 N a 1'048.000 E, 832.000 N [14].

2.1.1. LIMITES

Limita al norte y oriente con el municipio de Buenos Aires, al Suroriente y al Sur con el Municipio de Morales y al Occidente con López de Micay, con una extensión de 389,87 Km², de los cuales 3,57 km² corresponde a la parte urbana. Con una altura sobre el nivel del mar de 1.050 m. Dista de la capital del departamento, Popayán 107 Km [14].

2.1.2. HIDROGRAFÍA

El municipio de Suarez esta surcado de sur a norte por el río Cauca en cuya cuenca se encuentra emplazado el embalse de la Salvajina, hasta el sector nororiental y desembocando en el rio Cauca se encuentra el río Oveja, la cuenca de este río es muy importante por su recepción de vertimientos y desechos mineros, hacia el occidente los drenajes corren al río Inguitó, el cual finalmente drena al río Cauca [14].

Además cuenta con importantes ríos como Marilopito, Damián, Asnazú, Marilópez y San Miguel, con las quebradas El Chupadero, Chorrero, Los Pasos, Los Morados, La Laja, El Danubio [15].

2.1.3. RELIEVE

La región minera de Suarez posee una topografía con pendientes de medias a moderadas serranías redondeadas en la parte oriental, hacia el occidente el relieve es montañoso de pendientes fuertes y abruptos y hacia el norte se encuentran zonas totalmente planas [14].

2.1.4. CLIMA

Por su ubicación geográfica la zona cuenta con un clima templado húmedo tropical, con estaciones verano – invierno. El gradiente altitudinal se marca entre 1.100 m y los 2.050 metros aproximadamente, con temperatura media entre 19°C y una precipitación media anual de 2.600 mm [14].

2.1.5. COBERTURA VEGETAL Y SUELOS

En su gran mayoría el área está cubierta por pastos naturales y en menor proporción por rastrojos, bosque y cultivos. De acuerdo con las condiciones topográficas, se presentan suelos de diferentes características, la mayoría de ellos relativamente pobre en nutrientes y de poco espesor, con serias restricciones para su uso [16].

2.1.6. ECONOMÍA

Basada fundamentalmente en el sector primario; agricultura (café, yuca, caña panelera, maíz, fríjol, frutales entre otros) y minería principalmente. La extracción del oro se realiza en la zona Suroriental del municipio en inmediaciones de los corregimientos de La Toma y Mindalá, siendo esta la principal fuente de explotación. En la zona noroccidental la producción agropecuaria es la actividad económica más importante, a tal punto que la agricultura participa en un 52% de la producción del municipio, seguido de la actividad minera con un 27%, el comercio con un 3% y el 18% restante está en actividades como piscicultura, avicultura, ganadería, entre otros. En algunos sectores se practica la actividad forestal por Smurfit Cartón de Colombia [15].

El turismo no presenta aún una actividad económica importante para el Municipio por su deficiente infraestructura y publicidad, pero este sector promete convertirse en una actividad líder si se aprovechan las ventajas escénicas naturales y artificiales que tiene este municipio, sobre todo la representada por el lago o embalse de Salvajina y el Sistema Hídrico Municipal incluyendo sus principales ríos [15].

2.2. BASES TEÓRICAS

A continuación se presenta estudios realizados que determinan los niveles de mercurio en agua y sedimentos, en el ámbito global, nacional y local.

2.2.1. ANTECEDENTES

A nivel mundial, la actividad minera se ha convertido en un componente importante para el desarrollo económico de los diferentes países, sin embargo, hoy en día una gran mayoría de las explotaciones mineras se hacen dentro del marco de la informalidad, por fuera de parámetros de tipo técnico, ambiental, carentes en muchos casos de esquemas mínimos de seguridad, con casi ninguna responsabilidad social frente a los trabajadores y de muy bajos rendimientos económicos.

Es importante resaltar que durante los procesos de beneficio del metal (oro), muchas de los entables mineros, minas artesanales emplean elementos de alta toxicidad como el mercurio, que al ser utilizado de manera inadecuada ocasiona daños considerables a la salud y el medio ambiente. Unos de los principales escenarios ambientales encontrados de manera evidente es la contaminación a los efluentes, el suelo y en algunos casos el paisaje.

En virtud de lo anterior, se han adelantado investigaciones, convenios, programas etc., que permitan regular la producción, uso y disposición de mercurio y de productos con contenido de mercurio. Muchos países a través de regulaciones, políticas y medidas encaminadas buscan atender estos problemas.

Como respuesta a la preocupación internacional sobre el mercurio, y a instancias del entonces Consejo de Administración del PNUMA, se publicó en el año 2002 la primera evaluación mundial sobre el mercurio y sus compuestos, en cooperación con otros miembros. Como resultado de esta evaluación, el Consejo de Administración acordó que se requería una mayor acción internacional para reducir los riesgos sobre la salud y el medio ambiente [12].

Ante la necesidad urgente de adoptar medidas a nivel internacional, en Febrero de 2009 el PNUMA decidió iniciar el proceso de negociación hacia un instrumento vinculante sobre el mercurio (Decisión 25/5). A este instrumento se le denominó, Convenio de Minamata sobre el Mercurio, este representa una oportunidad para encaminar acciones bajo una plataforma acordada internacionalmente que debe

contar con mecanismos de cooperación y apoyo a los países en desarrollo acordes a las necesidades que se plantean [12].

El Convenio de Minamata tuvo lugar en Japón y surgió en alusión al episodio de contaminación por mercurio, con ello, la Enfermedad de Minamata; un desorden neurotóxico causado por la ingesta de productos marinos contaminados con compuestos de metilmercurio vertidos desde la planta de Minamata de la Shin-NipponChissoHiryo K.K. Se calcula que entre 1932 y 1968, se vertieron a la bahía 81 toneladas. La Enfermedad de Minamata causó también problemas importantes a la naturaleza y la sociedad local en general en las zonas afectadas por la contaminación [17].

En esta misma labor de investigación y consulta se encontraron investigaciones realizadas en países latinoamericanos que evidencian el aporte de concentraciones de mercurio en agua y sedimentos, que ponen en riesgo los recursos naturales y el bienestar de los seres humanos.

Por ejemplo en un estudio realizado en afluentes del río Amazonas en Perú, para determinar el contenido de mercurio en agua y sedimentos, se encontraron niveles en agua de 0,008 ppm y 3,03 ppm en sedimentos, lo que indicó que aunque para mercurio en agua las concentraciones no superaron la norma, se debe considerar que para sedimentos los niveles registrados fueron altos. La preocupación está en que este río es fuente de abastecimiento de la ciudad de Iquitos, lo que representa un riesgo para la salud humana [18].

En otro estudio, desarrollado en la cuenca del río Ocoña, Perú, se evaluó la contaminación por mercurio en agua, plantas, cabello y suelos. Como resultado, en las muestras de agua, las concentraciones de mercurio eran muy elevadas en la zona minera de Misky, cercanas a la zona de concentración y trituración, con valores superiores a 1 µg/L, lo que indicó que hay un aporte importante de mercurio a la cuenca del río Ocoña por los asentamientos mineros artesanales y que además los niveles encontrados superan el límite máximo permisible establecido por la OMS de 1 µg/l para agua potable [19].

En una investigación desarrollada en el río Napo, Amazonas, para identificar la presencia de mercurio en agua, peces y sedimentos, los valores registrados de mercurio en agua fueron de 0,023 a 0,027 mg/L y en sedimentos las muestras superaron el valor de 1,0 mg/kg, lo que indicó que los resultados superaron lo establecido por los estándares nacionales de calidad ambiental (MINAM) (0,001

mg/L de Hg en agua) e incluso los reportados por DIGESA, cuyo reporte es de 0,00002 mg/L de Hg en agua. Además el 93,75% de las muestras en sedimentos superaron los estándares nacionales. Los autores resaltan que es importante realizar una rápida intervención, estricta vigilancia y una investigación exhaustiva de los cuerpos de agua para identificar la fuente principal de contaminación de mercurio en la Amazonía [20].

En el país de Chile, se desarrolló una investigación para determinar los niveles basales de metales traza como el Hg en sedimentos, en tres lagos: Chungará, Laja y Castor. En el lago Chungará el Hg presentó mayores concentraciones, entre 0,038 – 0,12 mg/g. Los resultados muestran que sólo el lago Chungará presentó un enriquecimiento superficial de Hg, con concentraciones dos veces más altas que los estratos profundos. El aumento de metales pesados detectados en los niveles superficiales de los sedimentos del lago Chungará, son atribuidos tanto a contaminación local como regional [21].

De acuerdo, al segundo congreso Internacional sobre geología y minería en la ordenación del territorio y en el desarrollo. En la ponencia titulada: Proceso de tratamiento para la recuperación de oro en el asentamiento minero artesanal de Misky, Perú, se socializó el contenido de mercurio de aguas del área de Misky y sus alrededores, los valores fueron; Río Ocaña (Secocha) 9,09 ppb, San Martín1 4,53 ppb, San Martín2 3,56ppb, Quimbalete San Martín1 186,00 ppb, Quimbalete San Martín2 1322,10 ppb, Quimbalete San Martín3 1437,31 ppb, Agua corriente de Misky 3,39 ppb, Labor Charpera Interior 2,38 ppb, Labor Hermanos Coa 2,11 ppb. La muestra del río Ocaña, presenta unos contenidos en mercurio con valores de orden de nueve veces superiores al nivel máximo recomendado por la organización Mundial de la Salud (OMS). Este resultado puede ser debido a que en la parte superior del río se encuentran otros asentamientos mineros que también utilizan el mercurio para el procesamiento del mineral aurífero que explotan. Los valores dan resultados de 100 a 1500 veces superior al nivel máximo recomendado por la OMS. Todos los resultados obtenidos reflejan unas concentraciones de mercurio en las aguas altísimas teniendo en cuenta que la máxima concentración de Hg permitida por la OMS es de 1,00 ppb [22].

En Colombia, el oro es el primero en la lista de los más extraídos con una producción de 59.202 kg para el año 2015. Para el primer trimestre (Enero, Febrero y Marzo) del año 2016 la producción fue de 16.229 Kg de Oro [23]. A nivel nacional hay un total de 4.133 UPM (unidades de producción minera) que representan el 90.9% del territorio Colombiano, de los cuales sólo 549 UPM (13.3

%) tiene título minero y 3.584 UPM (86.7%) se encuentran en el marco informal [24]. Como resultado de estas cifras, en Colombia también se han desarrollado estudios, que confirman la presencia de mercurio en cuerpos de agua y los efectos negativos en la salud humana y medio ambiente.

Por ejemplo, en un estudio realizado por García [25], se determinó el grado y la extensión de la contaminación producida por el uso de mercurio debido a la minería aurífera artesanal en la zona Minera de Pacarní-San Luis departamento del Huila. De este estudio se obtuvo que el valor no excede el límite establecido para ninguno de los usos como recurso humano, doméstico, pecuario o para la preservación de flora y fauna; pero sí excede los criterios establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para los niveles de exposición crónica de la vida acuática $0,012 \mu\text{g/L}$.

En la Bahía de Cartagena, Caribe Colombiano se desarrolló una investigación para determinar la concentración de mercurio total y metilmercurio en sedimentos y seston. En las estaciones: Zona Industrial, Centro de la Bahía, Canal del Dique, Tierra Bomba y Boca Chica. Los resultados señalan que el promedio de HgT en los sedimentos fue $0,18 \pm 0,01 \mu\text{g/gp}$. De lo anterior se concluyó, que La bahía de Cartagena presenta un aporte constante de mercurio al ecosistema, que se transfiere a los compartimentos abióticos (seston y sedimentos); aunque las concentraciones de mercurio total en sedimentos son bajas, comparadas con ecosistemas altamente contaminados con este metal, existe una fracción aproximada del 10% que está disponible en el ecosistema para ingresar a las redes tróficas [26].

En Antioquia, Colombia, se visitaron cinco municipios (Remedios, Segovia, Zaragoza, El Bagre y Niche) seleccionados por la ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial) para implementar el Proyecto Mercurio en Colombia y un municipio al Sur del Departamento de Bolívar, San Martín de la Loba. Los datos indirectos sobre emisiones de mercurio procedentes de los cinco municipios de Antioquia indicaron que se pierden alrededor de 50 toneladas / año en las que es probable que se pierdan 33 toneladas con relaves para el medio terrestre y acuático y se emitan al aire 17 toneladas indicando una afectación al ecosistema [27].

En el Distrito Minero de San Martín de Loba, Colombia, se desarrolló una investigación con el objetivo de determinar el grado de contaminación de Hg derivado de la extracción de oro. Se analizaron muestras de cabello, sedimentos,

peces, macrófitas y en agua. Como resultado se obtuvo que las mayores concentraciones de Hg-t (mercurio total) en agua fueron registradas en Mina Catanga, en San Martín de Loba ($39.18 \pm 7.50 \mu\text{g/L}$), mientras que la más baja fue observada en la mina Villa Kelly, humedal Loma de Gallo ($0.17 \pm 0.01 \mu\text{g/L}$). Por su parte, los niveles de Hg-t en muestras de sedimentos revelaron una alta variabilidad. Los sedimentos de la mina Catanga presentaron las mayores concentraciones de metal, seguido de la Ciénaga Palenquillo y Mina Villa Kelly en Hatillo de Loba. Los mayores valores de Hg-t en agua fueron encontrados en los canales que recogen los efluentes de Mina Catanga en San Martín de Loba (hasta $73.17 \mu\text{g/L}$), los mismos superaron el límite recomendado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (12 ng/L) para proteger la vida acuática contra los efectos adversos. Los niveles de Hg-t en sedimentos provenientes de las minas del Distrito Minero de San Martín de Loba reflejan una elevada contaminación de Hg en los residuos líquidos generados por las minas de oro. De acuerdo con el índice Igeo, la contaminación de Hg en estos sedimentos los clasifican como altamente contaminado (clase 6). En conclusión, la contaminación por Hg en el Distrito Minero de San Martín de Loba es extensa y cubre los compartimentos ambientales y humanos [28].

En agosto de 2007 los Ministerios de Ambiente y de Minas, la Fiscalía, la Procuraduría e INGEOMINAS suscribieron el Convenio 027, para unir esfuerzos e implementar estrategias tendientes a la prevención, detección y sanción que permita la erradicación de la minería ilegal en el territorio Colombiano. En el marco de este convenio, los ministerios de Ambiente y de Minas y Energía, la Fiscalía General de la Nación, el Ejército Nacional y la Armada Nacional llevaron a cabo en el mes de abril de 2009 uno de los operativos donde se decomisaron 24 dragas utilizadas para la explotación ilegal de oro en el Chocó, en particular en el municipio de Río Quito, las cuales estaban causando un enorme daño ambiental sobre los recursos naturales: 3,7 toneladas al año de mercurio dispuestas tanto en suelos como en ríos; vertimiento de 450 mil toneladas al año de sedimentos [29].

En el río Suratá, Santander, Colombia, se desarrolló un proyecto que permitió establecer los orígenes y cuantifico los vertimientos y emisiones de mercurio. Como resultado se obtuvo un volumen de 1000 a 1200 kg Hg/año entre vertimientos y emisiones de mercurio. Gran parte del mercurio es vertido al sistema hídrico del área, que abastece a una de las plantas del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga [30].

La producción de oro a nivel del departamento del Cauca para el año 2015 fue de 5.322,84 kg. De igual forma, para el primer trimestre del presente año (2016) la cantidad de oro producida en el Cauca es de 1.054,33 Kg [23]. De acuerdo al último censo minero departamental (2010-2011) En el Cauca hay un total de 544 UPM, dentro de las cuales, 476 UPM son de tipo informal y 68 UPM son de tipo formal, es decir que poseen título minero [24]. Debido a la gran cantidad de UPM de tipo informal; la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), adelantó estudios que permitieran determinar el estado de contaminación de los recursos presentes en las zonas de los entables mineros.

La CRC desarrolló un estudio que se llevó a cabo en el Distrito minero de Buenos Aires, Cauca, con el objetivo de conocer el grado de contaminación de la zona, asociada por la implementación del mercurio en la actividad extractiva de oro; esta investigación arrojó que 11 plantas de beneficio emplean la amalgamación y que exceden entre 30 y 80 veces el límite permisible (2 ppb) de mercurio para efluentes [31].

Para el área de estudio del presente proyecto, es decir el Municipio de Suárez, Cauca, a través de un diagnóstico minero ambiental en los corregimientos de Mindala y la Toma en el perímetro de la cortina embalse de la Salvajina, se conoció que Suárez, es uno de los municipios del departamento que presenta mayor desarrollo minero, además tiene un gran potencial de recursos, entre los cuales el de mayor explotación es el oro [32].

La zona de interés del anterior diagnóstico, compete las áreas del corregimiento de Mindala en las veredas del Desquite, el Tamboral, la Turbina y corregimiento de la Toma en el margen hídrico de la represa la Salvajina en una extensión de 5 km. Donde la minería es artesanal y empírica, el nivel de tecnificación es escaso y la explotación se ha limitado a obtener los gramos de oro que justifiquen el sustento diario. En este diagnóstico se localizaron alrededor de 70 bocaminas, 6 sitios adecuados para trituración, molienda y concentración gravimétrica de mineral enriquecido con oro y plata [32].

Dentro de los procesos que se realizan para la extracción del oro se identificaron el uso de sustancias como el mercurio, el cual es utilizado en el proceso de amalgamación [33]. Cabe resaltar que la amalgamación con este metal sigue siendo una de las técnicas preferidas en la minería artesanal que se desarrolla en el Municipio de Suárez.

2.2.2. Minería artesanal y de pequeña escala

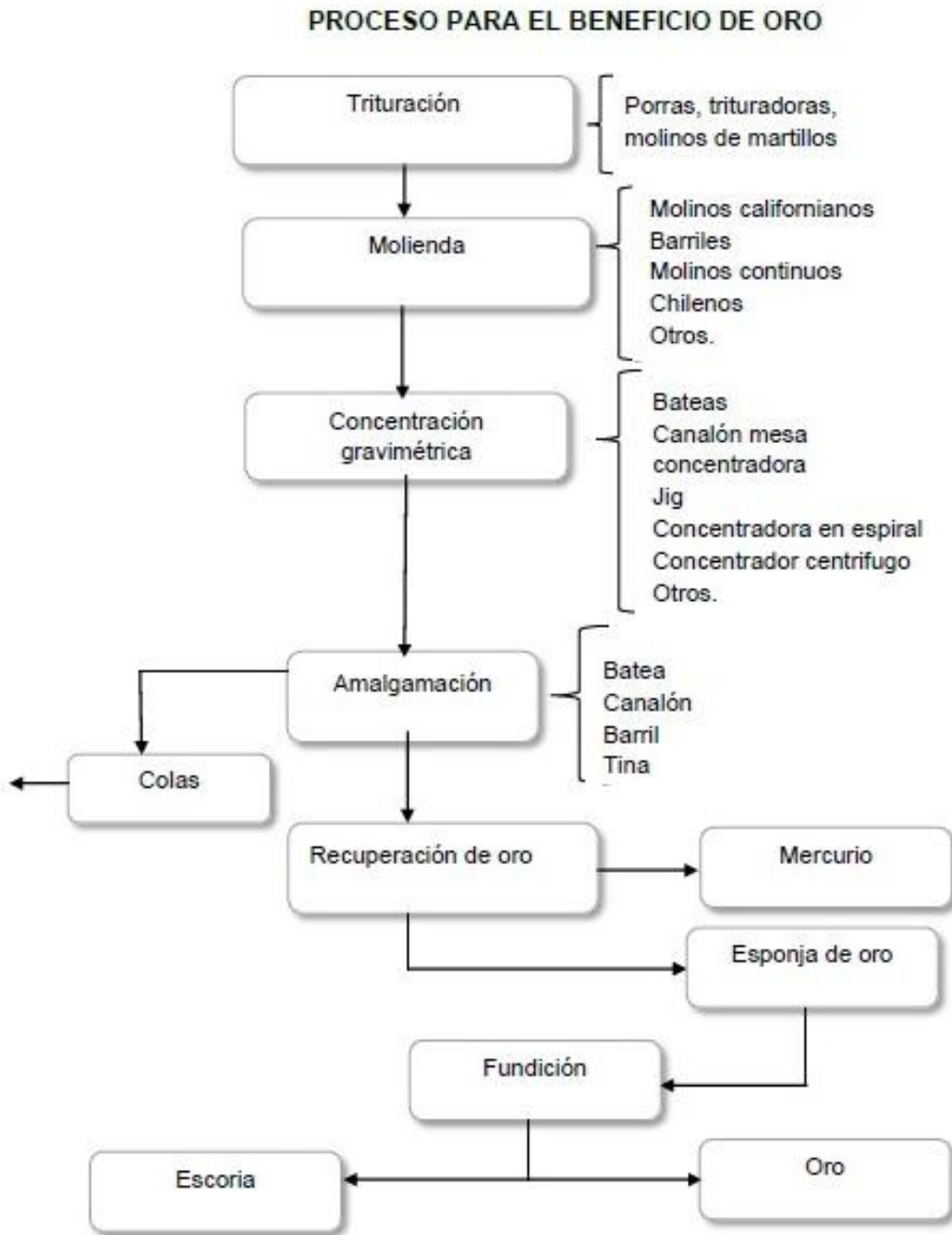
La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) – hace referencia a personas que trabajan con herramientas y equipamiento simples, por lo general en el sector informal, fuera del marco regulador y legal [34]. La minería artesanal no requiere grandes volúmenes de reservas minerales, dando inicio rápidamente a las operaciones en áreas específicas y generando ingresos a muy corto plazo para los explotadores [35].

Muchas veces en este tipo de minería se realizan prácticas ambientales inaceptables que conllevan al deterioro ambiental del entorno, al agotamiento de los recursos minerales y al abandono prematuro de los yacimientos; de otro lado, son frecuentes las condiciones inseguras de trabajo y la falta de seguridad social para los mineros.

2.2.3. PROCESO PARA EL BENEFICIO DE ORO

El beneficio de oro en este tipo de minería (MAPE), se desarrolla con el uso de medios de concentración como bateas, canalones en tierra y madera, motobombas de muy baja potencia, trituración manual, molienda en pequeños molinos de bolas discontinuos (marranas, tarros, tambores o cocos), muchas veces incluyen mercurio en el beneficio, en especial para los minerales provenientes de yacimientos filonianos [36]. A continuación se presenta el esquema del proceso de beneficio de oro (ver **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**).

Gráfica 1. Esquema básico del beneficio del oro



Fuente: Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala.

Teniendo en cuenta la

El beneficio de oro en este tipo de minería (MAPE), se desarrolla con el uso de medios de concentración como bateas, canalones en tierra y madera, motobombas de muy baja potencia, trituración manual, molienda en pequeños molinos de bolas discontinuos (marranas, tarros, tambores o cocos), muchas veces incluyen mercurio en el beneficio, en especial para los minerales provenientes de yacimientos filonianos [36]. A continuación se presenta el esquema del proceso de beneficio de oro (ver **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**).

Gráfica 1, se describen a continuación los procesos:

2.2.3.1. Trituración

Se emplean molinos de pistones o de barril para realizar la trituración del material extraído de la mina de oro, en esta etapa de beneficio se generan impactos ambientales como ruido, generación de polvo, gases, consumo elevado de agua y energía. Durante la molienda se logra que el material de la mina quede en polvo para luego proceder a lavarlo y extraer el mineral (oro).

El mineral aurífero almacenado en los patios o en las tolvas de recibido, es sometido a una reducción mediante la fracturación de rocas, esta operación es generalmente realizada de una forma manual y mediante el uso de una porra de

acero; luego las rocas son cargadas a una trituradora de mandíbula o alimentadas a un molino de martillos.

Los diferentes equipamientos que se utilizan para la trituración son:

- **Porras:** Es una herramienta pesada, que usan los mineros en la extracción del mineral.
- **Trituradoras:** Es una maquinaria para romper y reducir de tamaño fragmentos o trozos grandes de roca y otros materiales [37].
- **Molinos de martillos:** Se utiliza en las de minería donde se necesita reducir el tamaño de la roca para el beneficio de minerales, como triturador secundario [38].

Después de la preparación del mineral en donde se logra el tamaño requerido y adecuarlo, se pasa a la siguiente fase del beneficio [39].

2.2.3.2. Molienda

Es una de las variables relevantes para la mayor o menor recuperación del oro; por lo general en esta se producen mayores consumos de energía, que se traducen en pérdidas de oro, en aumento en consumos de reactivos, en el incremento de los tiempos de proceso, en mayores emisiones y liberaciones de mercurio al medio ambiente.

Los diferentes tipos de molinos que se utilizan en los procesos de recuperación de oro son:

- **Molinos californianos:** De carácter pesado, se constituye de treinta pisones, se utiliza para triturar los minerales de las minas.
- **Molinos continuos:** Están formados por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior tiene bolas libres, estas se mueven haciendo el efecto “de cascada”, rompiendo el material que se encuentra en la cámara de molienda mediante fricción y percusión [40].

- **Molinos chilenos:** Se utilizan según el tonelaje a procesar, de fácil manejo, construcción y mantenimiento, estos molinos necesitan cerca de 1000 m³ de agua por día para su funcionamiento [41].
- **Barriles:** se encuentran en casi todos los montajes o plantas de beneficio, ya sea como equipos de solo molienda, como equipos de amalgamación o de uso mixto[36].

2.2.3.3. Concentración gravimétrica

Es un proceso basado en la reducción el mínimo posible de los minerales sin interés económico (ganga), que acompañan al oro y en el enriquecimiento de los concentrados de este metal precioso; el proceso se realiza en presencia de agua.

Para la concentración gravimétrica se utilizan diferentes compartimientos, los cuales son:

- **Bateas:** Las bateas se utilizan frecuentemente en la fase preparatoria para limpiar o enriquecer los preconcentrados. Una batea para oro es un aparato simple, generalmente circular, con un corte transversal en forma trapezoidal o triangular [42].
- **Jig:** Se instalan en la descarga del molino, cerrando el circuito con un clasificador de espiral, para recuperar la mayor parte del oro laminado y una gran parte de los sulfuros auríferos, evitando una sobre molienda innecesaria.
- **Mesas de golpe:** Tiene una leve inclinación, una depresión (o canal) a lo largo de su borde inferior y cretas ligeramente elevadas en su longitud. El mineral y el agua se vierten en el borde superior de la tabla y esta vibra impulsada por un motor.
- **Concentrador en espiral:** Son bateas especiales montadas sobre un eje inclinado con ranuras en espiral en la superficie.
- **Concentrador centrífugo:** Una centrífuga consiste en un tazón giratorio con una serie de crestas que atrapan el oro cuando el tazón gira [43].

2.2.3.4. Amalgamación

La técnica de amalgama consiste en agregar mercurio sobre los minerales previamente molidos o pulverizados y debido a la aleación que presenta el mercurio a los metales este se une al oro precipitando una pasta blanca, blanda, brillante y que se puede cristalizar cuando existe mercurio en exceso [36].

Los diferentes elementos que se utilizan para realizar la amalgamación son:

- **Canalón:** Consisten en un canal, a través del cual fluye la pulpa, de varios materiales (trampas) para la captura de minerales pesados, los cuales se hunden hasta el fondo, mientras el agua saca hacia afuera a los sólidos livianos[44].
- **Batea:** Las bateas, junto con las canaletas, son el instrumento de mayor importancia en la pequeña minería aurífera tanto en la minería aurífera aluvial como en la minería primaria, para la concentración del mineral [41].
- **Tina:** Las tinas son utilizadas para recibir miles de toneladas de menas, para su lixiviación de oro [45].
- **Colas:** son residuos obtenidos, después de removerse los finos en pozos de decantación, en todos los casos son vertidas a las corrientes de agua más cercanas [46].

2.2.4. CONTAMINACIÓN DEL AGUA A CAUSA DE LA MINERIA

Durante el proceso de recuperación del oro, se genera una serie de impactos al recurso hídrico como:

2.2.4.1. Contaminación química

Esta contaminación se produce cuando el mercurio es empleado para los procesos de minería, en la separación de oro del material bruto y entra en contacto con el agua. Los metales son extraídos y llevados por la corriente superficial, causando deterioro y erosión de suelos y fuentes hídricas. Esta afectación se presenta en el proceso de amalgamación debido que para el beneficio de oro se necesita una sustancia que permita la precipitación del metal.

La inexistencia de un tratamiento para las aguas residuales provenientes de este proceso permite la generación de la alteración de la calidad química de fuentes hídricas cercanas además de la infiltración en el suelo desmejorando las condiciones bióticas del entorno [47].

2.2.4.2. Erosión y sedimentación

La actividad minera perturba el suelo y las rocas en el transcurso de la construcción y mantenimiento de caminos, basureros y excavaciones a la intemperie. Por la ausencia de prevenciones adecuadas estrategias de control, la erosión de la tierra expuesta puede transportar una cantidad de sedimentación a arroyos, ríos y lagos. La sedimentación excesiva puede obstruir riveras, la vegetación y el hábitat para la fauna y organismos acuáticos [47].

2.2.4.3. Basura peligrosa- escombreras

Después que los minerales han sido procesados y recuperados, la roca sobrante se vuelve otra forma de desperdicio minero que se ubican en las escombreras. Estas pueden contener agentes químicos usados para el procesamiento del mineral en bruto. Las escombreras son usualmente colocadas en la superficie, en áreas de contención o lagunas de oxidación [47].

2.2.5. LAS FORMAS DEL MERCURIO

Elemento químico, símbolo Hg, número atómico 80 y peso atómico 200,59. Es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente (punto de fusión -38.4°C); ebulle a 357°C a presión atmosférica. El metal y sus compuestos son muy tóxicos. El mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (por ejemplo, oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio) [48].

En su forma metálica, se volatiliza inmediatamente a temperatura ambiente; no tiene función biológica alguna y puede tomar diferentes formas químicas; tres de las cuales son importantes para el entendimiento de su comportamiento ambiental:

- Mercurio elemental o metálico, el cual es líquido y se volatiliza a temperatura ambiente; es la forma de mayor presencia en el aire y es prácticamente insoluble en agua. Se simboliza como Hg^0 .

- Mercurio inorgánico, simbolizado como Hg^{2+} y Hg_2^{2+} (mercúrico y mercurioso), forma sales con diferentes aniones y se ioniza inmediatamente. Las sales mercúricas son ligeramente solubles en agua, y en la atmósfera se asocia con partículas y agua.
- Mercurio orgánico, como el metilmercurio, es la forma orgánica más importante del mercurio. El monometilmercurio, simbolizado como CH_3Hg^+ , es soluble en agua y es muy estable por la presencia de un enlace covalente carbono-mercurio. El dimetilmercurio, simbolizado como $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$, es menos estable que la forma monometilada, y también es menos soluble en agua y es volátil [49].

2.2.6. PROCESOS DEL MERCURIO EN EL AMBIENTE

El Mercurio, dentro de la industria minera artesanal, es utilizado de forma elemental, al aprovechar su propiedad de aleación con metales para lograr la extracción del metal precioso de la veta rocosa. Este disuelve el metal, y la amalgama resultante, es sometida a procesos de separación, calentándola. El Mercurio se evapora, se recupera con un sistema de condensación y el remanente es el metal precioso; sin embargo, durante el proceso siempre hay un nivel de desperdicio tanto en el transcurso de amalgamación, como en el de separación y condensación donde el Mercurio se pierde ya sea de forma líquida o de vapor, liberándose en el ambiente [50].

2.2.6.1. Movilidad del mercurio en el ambiente acuático

Existe una serie de vías a partir de las cuales el mercurio puede entrar en el agua. $\text{Hg}(\text{II})$ y metilmercurio pueden ser depositados directamente desde la atmósfera por vía húmeda o seca sobre cuerpos de agua terrestre; también pueden ser incorporados a las aguas terrestres por acción de la lluvia; por otro lado, este lavado y arrastre de mercurio desde el suelo a las aguas terrestres pueden realizarse a partir de corrientes de agua subterránea. Una parte de este $\text{Hg}(\text{II})$ estará en el sistema acuático, sobre todo si existe una elevada concentración de materia orgánica disuelta en la columna de agua.

El Hg^0 también puede ser producido en aguas terrestres a partir de la reducción de $\text{Hg}(\text{II})$ por los ácidos húmicos presentes en los suelos o sedimentos. Una parte

pequeña de este Hg^0 permanecerá disuelto mientras que la mayoría pasara a la atmósfera por volatilización [51].

2.2.6.2. Mercurio en suelos

Gran parte de compuestos inorgánicos de Hg (II) son bastante solubles (y en consecuencia, móviles), suelen formar complejos con la materia orgánica (sobre todo ácidos fúlvicos y húmicos) y arcillas de los suelos. Este comportamiento limita en gran medida la movilidad del mercurio en los suelos, haciendo que estos actúen como grandes reservas de mercurio antropogénico. Una parte del Hg(II) puede, sin embargo, ser adsorbido por ligandos orgánicos solubles u otras formas de carbono orgánico disuelto (COD) facilitando la partición del mercurio hacia la fase acuosa.

Una parte de mercurio puede estar presente en proporciones muy pequeñas en suelos, pero de gran importancia, debido a su toxicidad y capacidad para la bioacumulación, como el metilmercurio; su formación viene dada principalmente por varios procesos microbianos que actúan sobre compuestos de Hg(II); el metilmercurio presenta una gran afinidad por la materia orgánica, hecho que limita su movilidad en el medio ambiente [52].

2.2.7. EL MERCURIO Y LA SALUD

Como se enunció anteriormente el mercurio se encuentra en varias formas: elemental (o metálico) e inorgánico; u orgánico (como el metilmercurio). Estas formas de mercurio difieren por su grado de toxicidad y sus efectos sobre los sistemas nerviosos e inmunitarios, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos.

Una vez liberado el mercurio al medio, ciertas bacterias pueden transformarlo en metilmercurio. Este se bioacumula en peces y mariscos, y además tiende a biomagnificarse en los tejidos vivos donde se incorpora. Los grandes peces depredadores, tiene más probabilidades de presentar niveles elevados de mercurio porque en su cadena alimenticia han consumido peces pequeños, que a su vez han ingerido esta sustancia química [5].

Aunque las personas pueden verse expuestas a cualquiera de las formas de mercurio y a diversas circunstancias, las principales vías de exposición son el consumo de pescado y mariscos contaminados con metilmercurio y la inhalación de vapores de mercurio elemental desprendidos en procesos industriales.

El mercurio elemental y el metilmercurio son tóxicos para el sistema nervioso central y periférico. La inhalación de vapor de mercurio puede ser perjudicial, con consecuencias a veces fatales. Las sales de mercurio inorgánicas son corrosivas para la piel, los ojos y el tracto intestinal [5].

Tras la inhalación o ingesta de distintos compuestos de mercurio o la exposición cutánea a ellos se pueden observar trastornos neurológicos y del comportamiento, con síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefaleas o disfunciones cognitivas y motoras. En trabajadores expuestos durante varios años a niveles atmosféricos de al menos $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de mercurio elemental se pueden observar signos subclínicos leves de toxicidad para el sistema nervioso central. Y se han descrito efectos en los riñones que van de la proteinuria a la insuficiencia renal [5].

2.2.8. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS PARA CARACTERIZACIÓN DE VERTIMIENTOS

El recurso hídrico se ha visto perturbado debido a la disposición directa e inadecuada de vertimientos provenientes de la actividad minera de oro, por tal razón es necesario determinar el estado en el cual se encuentra el ecosistema y para ello se debe considerar el decreto 0631 de 2015.

A continuación se describen los parámetros indicadores de contaminación:

2.2.8.1. Temperatura

Las descargas de aguas con temperaturas considerablemente mayores a las aguas receptoras pueden causar daños a la flora y fauna al intervenir con los procesos reproductivos de las especies. De igual forma, pueden incrementar el crecimiento de bacterias y otros organismos no autóctonos, acelerar las reacciones químicas y reducir los niveles de oxígeno, influyendo en la precipitación de muchos compuestos y acelerando la eutrofización [53].

2.2.8.2. pH

El intervalo de concentración adecuado para la proliferación y desarrollo de la vida acuática es bastante estrecho y crítico, la mayoría de animales acuáticos prefieren

un rango de 6.5-8.0. Fuera de este rango se reduce la diversidad por estrés fisiológico, así como la reproducción [54].

2.2.8.3. Turbiedad

La turbiedad en el agua es causada por materia suspendida y coloidal tal como arcilla, sedimento, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos [55].

2.2.8.4. Color

El material colorante resulta del contacto del agua detritus orgánico como hojas, madera en diferentes estado de descomposición. Se considera que las principales fuentes de color son los taninos, el ácido húmico y los humatos. El hierro algunas veces está presente como humato férrico, que produce una coloración de alta intensidad.

El color causado por la materia en suspensión es llamado color aparente y es diferente al color debido a extractos vegetales u orgánicos, que son coloidales al que se llama color real [55].

2.2.8.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se define usualmente como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica “susceptible de descomposición”, se hace referencia a que la materia orgánica puede servir de alimento a las bacterias y que su oxidación genera energía. Esta prueba es una de las más importantes en las operaciones de control de la contaminación de las corrientes [56].

2.2.8.6. Alcalinidad

En el agua es entendida como la capacidad que tiene para neutralizar los ácidos. La alcalinidad puede considerarse como la presencia de sustancias básicas en el agua, principalmente, sales de ácidos débiles o bases fuertes [57].

2.2.8.7. Demanda química de oxígeno (DQO)

Es una prueba ampliamente utilizada para determinar el contenido de materia orgánica de una muestra de agua. A diferencia de la DBO, en esta prueba la materia orgánica es oxidada utilizando una sustancia química y no microorganismos [56].

2.2.8.8. Sólidos

Las partículas sólidas presentes en el agua pueden sedimentar o pueden permanecer en suspensión debido a su densidad.

Muchos procesos industriales generan apreciables cantidades de estos materiales que influyen adversamente en los cuerpos de aguas receptores, obstruyen el paso de la luz solar disminuyendo con ello la actividad fotosintética de las plantas acuáticas y por consiguiente tanto la concentración de oxígeno disuelto. Los sólidos se clasifican en:

- **Sólidos totales**

Están constituidos por el residuo que queda después de la evaporación de una muestra de agua y su subsecuente secado en una estufa a 103-105°C. Estos sólidos comprenden los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos totales.

- **Sólidos disueltos**

Son la porción de los sólidos totales que pasan a través de un filtro con tamaño de poro 2 μm (o menos).

- **Sólidos suspendidos**

Constituyen la porción retenida en el filtro de tamaño de poro de poro 2 μm . Estos se dividen en sedimentables y coloidales.

- **Sólidos sedimentables**

Son la porción de los sólidos suspendidos cuyo tamaño y peso es suficiente para que sedimenten dentro de un periodo determinado de tiempo.

2.2.8.9. Caudal

Cantidad de agua que pasa por un río o riachuelo, por una sección normal de una corriente de agua, medida en una unidad de tiempo [53].

2.2.8.10. Metales pesados

En la presente investigación se fija específicamente en un metal pesado, en este caso el mercurio ya que este se utiliza, en la actividad minera artesanal y de pequeña escala, en el proceso de amalgamación para extraer el mineral oro, de los residuos sobrantes.

El mercurio (Hg) es un metal tóxico que puede causar una variedad de efectos adversos dependiendo de la especie (elemental, orgánica o inorgánica), así como la vía, cantidad y duración de exposición; siendo un contaminante ambiental persistente en el ambiente y distribuido globalmente en la atmosfera [55].

2.2.9. INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERIA- ICOMINERA

El Índice de Contaminación por Minería fue desarrollado por Ramírez en Colombia el año 1997, el cual permite medir la afectación a los recursos naturales, a través de una serie de parámetros fisicoquímicos seleccionados como: turbidez, sólidos suspendidos totales y el mercurio [57].

La fórmula a aplicar es:

$$ICOMINERA = \frac{1}{3} (I_{Turbiedad} + I_{Sólidos\ suspendidos\ totales} + I_{Mercurio})$$

Dónde:

$$I_{\text{Turbiedad}} = 0,174 * e^{0,0163 * X}$$

X= valor asociado a la turbiedad en NTU

Si la turbiedad es > 100 NTU, entonces $I_{\text{Turbiedad}}$ es 1

Si la turbiedad es < 0 NTU, entonces $I_{\text{Turbiedad}}$ es 0,17

$$I_{\text{Sólidos suspendidos totales}} = -0,02 + 0,003 * x(\text{SST})$$

Si sólidos suspendidos son mayores a 340 mg/l, entonces el subíndice es 1

Si sólidos suspendidos son menores a 10 mg/l, entonces el subíndice es 0

$$I_{\text{mercurio}} = 0,003648X^2 + 0,0589 * X + 0,0443$$

X: concentración del mercurio en µg/l

A continuación se menciona la tabla 1 en la cual se describen los valores del índice de contaminación por minería aurífera.

Tabla 1. Valores del índice de contaminación por minería aurífera

Valor del índice	Valoración cualitativa
0 - 0,2	No hay contaminación
>0,21 – 0,4	Contaminación leve
>0,41 – 0,6	Contaminación mediana
>0,61 - 0,8	Contaminación Alta
>0,81 - 1	Contaminación muy alta

Fuente: 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 [57].

2.3. BASES LEGALES

En la Tabla 2 se presenta algunas de las normas que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de este trabajo investigativo.

Tabla 2. Normatividad minero ambiental colombiana

NORMATIVIDAD	CONTENIDO
Ley 99 de 1993 Sistema Nacional Ambiental (SINA)	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones [58].
Ley 685 de 2001 Código de Minas	El presente Código tiene como objetivos de interés público fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada [59].
Ley 1333 de 2009	Por el cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental [60].
Decreto 933 de 2013	Por el cual se dictan disposiciones de materia de formalización de minería tradicional [61].
Ley 1658 de 2013	Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación [6].
Resolución 0631 de 2015	Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a otros sistemas de alcantarillado público. CAPÍTULO VI. SECTOR MINERO [62].
Resolución 1258 de 2015	Por la cual se adoptan los lineamientos, la guía ambiental y los términos de referencia para las actividades de formalización de minería tradicional a que se refiere el Decreto

	número 933 de 2013 y se toman otras determinaciones [63].
Decreto único 1076 del 2015	Decreto Único reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible [64].

Para el análisis de la concentración de mercurio en sedimentos se utilizó el Decreto Supremo 002 de 2013 de Perú, debido a que en Colombia no existe una norma que reglamente los niveles permisibles de mercurio en sedimentos por extracciones mineras.

CAPITULO III: METODOLOGIA

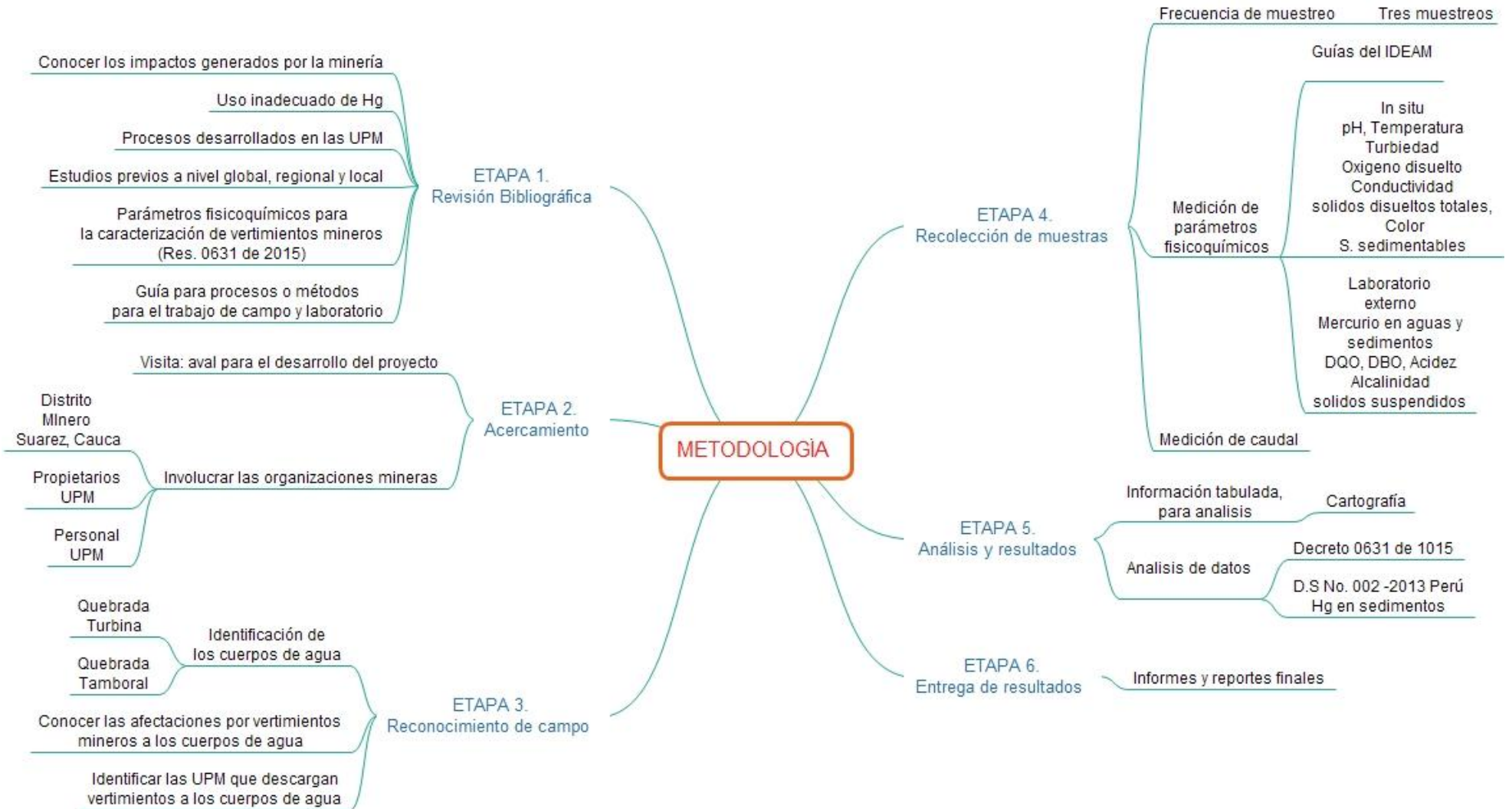
La investigación de este proyecto se desarrolló de acuerdo con la metodología planteada en la Gráfica 2, esta se encuentra dividida en etapas que permitieron cumplir los objetivos del proyecto a través de diferentes actividades.

3.1. Etapa 1. Revisión bibliográfica

Para el desarrollo de este proyecto, en primera instancia fue necesario realizar una revisión bibliográfica, que permitió orientar la investigación hacia la problemática que se planteó anteriormente, a fin de cumplir con el objetivo de determinar los niveles de mercurio en agua en las quebradas que reciben vertimientos provenientes de las UPM y que posteriormente son descargados al embalse la Salvajina. Para ello la búsqueda se centró en conocer los impactos generados por la actividad minera de oro, principalmente por el uso inadecuado de mercurio; identificando los procesos que se desarrollan dentro de las UPM; estudios previos que confirmen a nivel global, regional y local los niveles de mercurio encontrados en diferentes zonas y que ponen en riesgo el ambiente y la salud de los seres vivos; además de ello, conocer los métodos de análisis apropiados para identificar los niveles de mercurio en agua, así mismo, determinar los parámetros fisicoquímicos para la caracterización de vertimientos mineros y los procesos o métodos para tomar en campo o laboratorio, finalmente, se tuvo en cuenta la legislación minero ambiental pertinente para desarrollar este proyecto.

Para obtener la información, anteriormente mencionada, se consultaron bases de datos de internet, journals, artículos u otras investigaciones afines para el proyecto en mención como por ejemplo, páginas de Internet del Ministerio de Minas y Energía, la OMS (Organización Mundial de la Salud), estudios de minería de oro adelantados por la CRC (Corporación Autónoma Regional del Cauca) y otras entidades ambientales.

Gráfica 2. Esquema metodológico.



Fuente: elaboración propia

3.2. Etapa 2. Acercamiento.

Se realizó una visita previa, a fin de obtener el aval para el desarrollo del proyecto en el municipio de Suárez, Cauca, e igualmente involucrar a las organizaciones mineras como: los propietarios de las unidades de producción minera- UPM y el personal que labora en estas.

3.3. Etapa 3. Reconocimiento de campo

En esta etapa, se llevó a cabo una segunda visita, con el propósito de realizar el reconocimiento de las zonas a intervenir. El recorrido se desarrolló en lancha sobre el embalse de la Salvajina para identificar los dos cuerpos de agua a estudiar, donde posiblemente estos estén recibiendo vertimientos provenientes de las UPM; se visitó cada una de las quebradas con el interés de conocer la afectación producida por los vertimientos de la actividad minera de oro, además fue necesario hacer un recorrido aguas arriba del vertimiento con el objetivo de identificar las UPM que descargan sus vertimientos a los cuerpos de agua seleccionados.

3.4. Etapa 4. Recolección de muestras

Al finalizar la tercera etapa, y con base en la información recolectada, se llevó a cabo las visitas para la recolección y toma de muestras en los dos cuerpos de agua seleccionados.

Para ello, se seleccionó el tipo de muestra, para el presente proyecto, las muestras fueron puntuales, definida como aquella muestra tomada en un lugar representativo y en un determinado momento.

Para efectos del proyecto, se realizaron tres días de muestreo, cada uno en diferentes meses: 19 de octubre, 05 de diciembre de 2016 y 02 de febrero de 2017. Para cada muestreo se recolectaron muestras de agua y de sedimentos en cada cuerpo de agua a evaluar para determinar los niveles de mercurio. También, se midieron algunos de los parámetros fisicoquímicos estipulados en la Resolución 0631 de 2015. Esto se llevó a cabo aguas abajo de las quebradas en el punto de descarga al embalse la Salvajina. En la Tabla 3, se especifican los parámetros que se midieron in situ y el listado de los equipos utilizados para medir cada uno.

Tabla 3. Listado de parámetros a medir in situ.

Equipos	Parámetro a medir
GPS	Coordenadas- altitud
pHmetro Medidor De pH Resistente Al Agua / Schott 850	pH
Turbidímetro 2100Q	Turbiedad
Sonda paramétrica. Medidor portátil multiparamétrico de calidad de agua. HQD HACH	Conductividad Sólidos disueltos totales Temperatura
Espectrofotómetro DR 2700	Color
Cono imhoff (gravimétrico)	Sólidos sedimentables

Fuente: elaboración propia

Para la recolección, almacenamiento y cadena de custodia de las muestras de los parámetros fisicoquímicos, mercurio en agua y mercurio en sedimentos se siguió la guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM.

Todas las muestras se recolectaron en recipientes plásticos de 1 L, excepto la de mercurio en sedimentos. Las muestras de sedimentos se recolectaron en bolsas de sellado hermético, este procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a lo estipulado en la guía del IDEAM para metales pesados en agua y sedimentos [65].

Las muestras de mercurio en agua se preservaron con una solución de ácido nítrico (HNO_3) al 65% hasta pH 2 y se refrigeró a una temperatura de 4°C.

Los parámetros de mercurio en agua, mercurio en sedimentos, DQO, DBO, alcalinidad, acidez y sólidos suspendidos, fueron analizados por el Laboratorio de Aguas y Alimentos perteneciente a la Universidad Tecnológica de Pereira- UTP, en la Tabla 4 se encuentra el método que se aplicó a cada parámetro.

En el Anexo 7 se muestra la manera como cada una de las muestras era previamente almacenada, rotulada y posteriormente entregada al Laboratorio de Aguas y Alimentos de la UTP.

Tabla 4. Parámetros analizados en el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la UTP.

Método	Parámetro
Espectrofotometría de absorción atómica vapor frío	Mercurio en agua
Espectrofotometría de absorción atómica vapor frío	Mercurio en sedimentos
SM: 7720C Titulométrico reflujo cerrado	DQO
SM: 5210 Test DBO ₅	DBO ₅
SM: 2320 B. Titulométrico	Alcalinidad
SM: 2320 B. Titulométrico	Acidez
SM: 2540 – D Sólidos suspendidos totales a 103 – 105 °C	Sólidos suspendidos

Fuente: elaboración propia

Así mismo, se midió el caudal, para ello se evaluó el método apropiado y su elección dependió del tipo de vertimiento, las características del área de estudio y las condiciones al momento de su realización [66].

El métodos de aforo implementado para el desarrollo de esta investigación se encuentran en Tabla 5, en esta también se especifican los elementos y equipos necesarios.

Tabla 5. Método de medición de caudal y las condiciones de aplicación.

Método de aforo	Equipo o dispositivo	Condiciones
Área / Velocidad	Flotador	Tramo del cauce en estudio lo más recto posible, alejado de curvas y el agua corra libremente. Sección transversal lo más regular posible.

Fuente: Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM.

Finalmente, la recolección de los datos se realizó a través de tablas que fueron elaborados de acuerdo a las necesidades del proyecto. También, cada punto de muestreo fue georreferenciado, con la ayuda de un GPS.

3.5. Etapa 5. Análisis y resultados

Una vez obtenidos los resultados, la información fue tabulada y registrada. Se realizó la cartografía de la zona de estudio, para ello se implementó el programa SIG- Sistema de Información Geográfico; este permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica.

Los resultados de parámetros fisicoquímicos obtenidos fueron comparados con los valores permisibles estipulados en el decreto 0631 de 2015 y el Decreto Supremo 002-2013-MINAN de Perú para los niveles de mercurio en sedimentos, debido a que Colombia no cuenta con una normatividad que reglamente los niveles de mercurio en sedimentos y suelos, además el periodo de eliminación del mercurio en Perú no es tan antiguo como en países como EE.UU y por ende los niveles son más aproximados a los registrados en Colombia, que solo hace poco tiempo inició la erradicación de uso de este metal en minería

Finalmente, se calculó la ICOMINERA- Índice de Contaminación por Minería. A partir de los parámetros turbiedad, sólidos suspendidos totales y mercurio en agua.

3.6. Etapa 6. Entrega de resultados

Finalmente, con la información ya organizada, se elaboraron informes y reportes finales, tales como: el informe final de trabajo de grado y se realizó la socialización de los resultados con los actores mineros involucrados.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

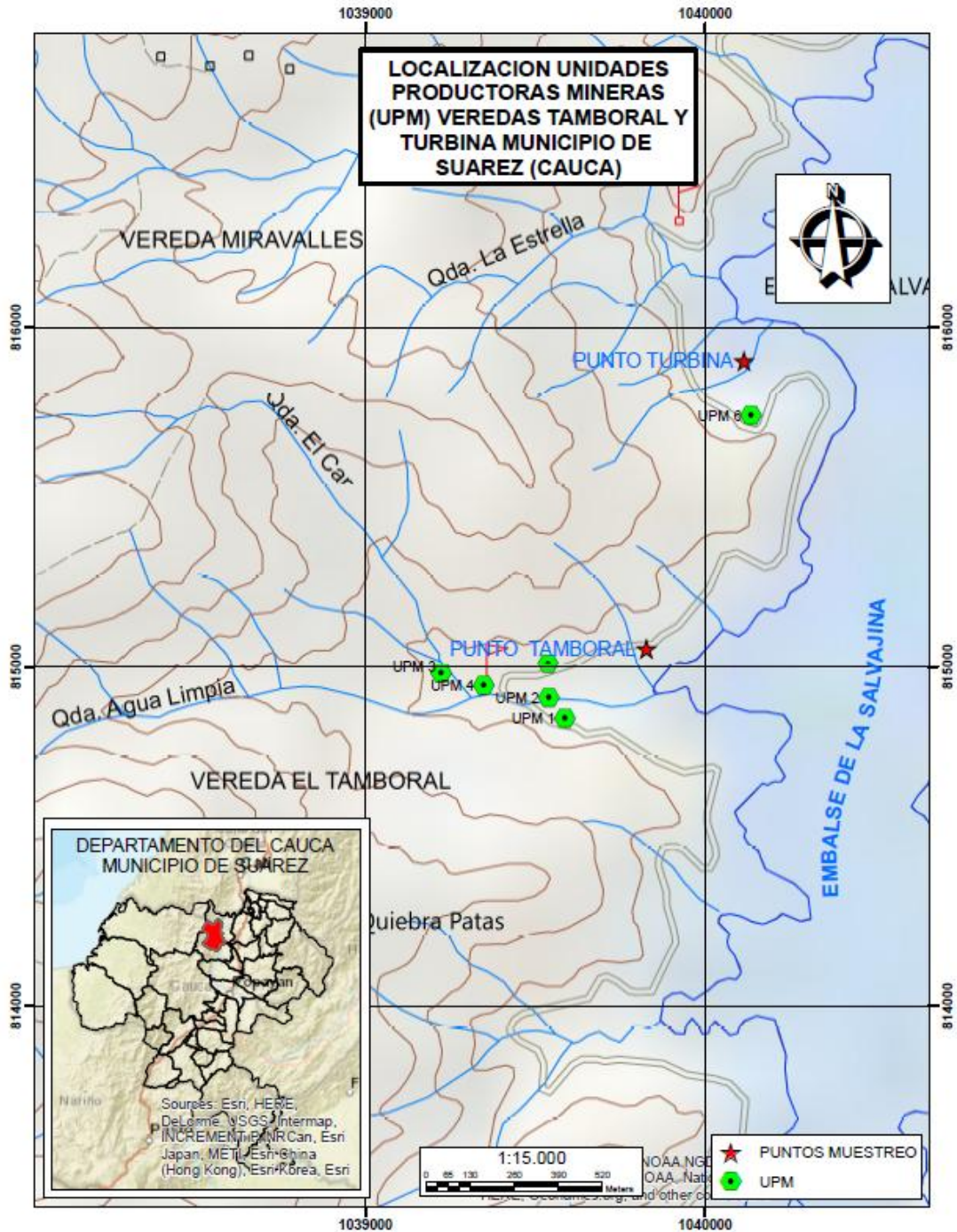
4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

A través de la Imagen 1 se presenta el área de influencia de esta investigación, que se encuentra ubicada en el municipio de Suarez Cauca, en las veredas Tamboral y Turbina.

Específicamente la zona de estudio de los cuerpos de agua a intervenir están ubicados en las coordenadas N 815052,4 E 1039827,2 Turbina, N 815900,2 E 1040114,2 Tamboral. En los anexos 5 y 6 se pueden apreciar mediante registro fotográfico, las condiciones de las quebradas en estudio.

Para ambas veredas se realizó una georeferenciación de las plantas de beneficio más representativas (Imagen 1), las cuales descargan sus vertimientos a las quebradas de estudio. Estas quebradas no tienen un nombre de acuerdo a los mapas del IGAC, de ahí que los nombres utilizados están de acuerdo a como las reconocen los habitantes de la zona.

Imagen 1. Localización puntos de muestreo Tamboral y Turbina.



Fuente: propia

Según información suministrada por mineros se tiene conocimiento de que existen más plantas de beneficio que realizan sus descargas a estos efluentes, pero debido a dificultades para el acceso solo se georreferenciaron las plantas que se

encuentran sobre la vía. De lo anterior se tiene que, para la Quebrada Tamboral cinco plantas de beneficio descargan sus vertimientos, mientras que para la Quebrada Turbina sólo una. A continuación se presenta en la Tabla 6 las coordenadas de las plantas de beneficio:

Tabla 6. Coordenadas geográficas de las plantas de beneficio.

COORDENADAS		
QUEBRADA TAMBORAL		
UPM1	814845,92 N	1039586,37 E
UPM2	814906,83 N	1039539,17 E
UPM3	814977,84 N	1039221,02 E
UPM4	814492,66 N	1039348,15 E
UPM5	815007,85 N	1039536,37 E
QUEBRADA TURBINA		
UPM6	815738,32 N	1040135,55 E

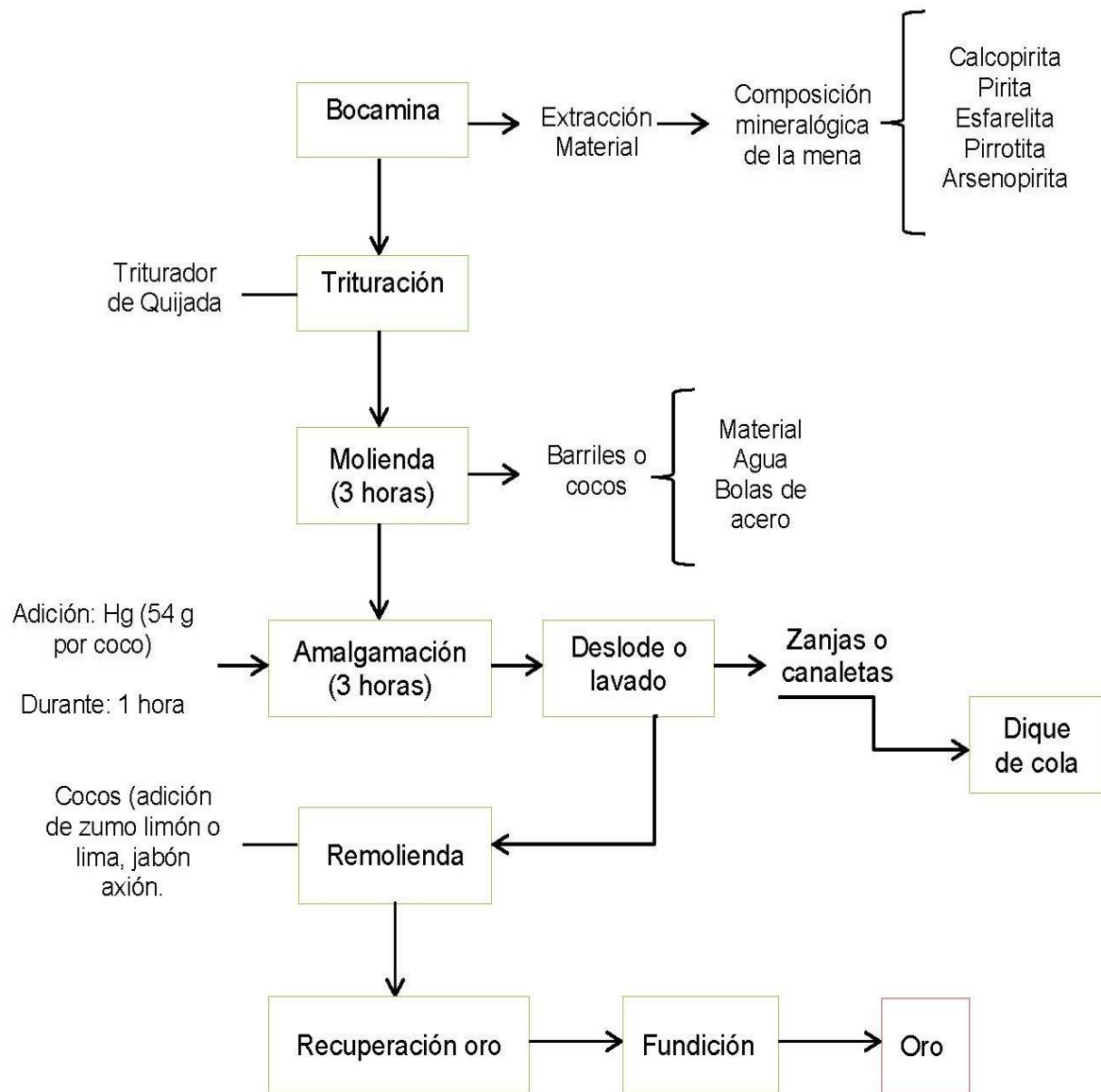
Fuente: elaboración propia

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS REALIZADOS EN LAS UNIDADES PRODUCTORAS MINERAS-UPM DE SUÁREZ, CAUCA

En la

Gráfica 3 se indica a continuación, los procesos que se desarrollan dentro de una unidad productora minera en el municipio de Suarez, Cauca.

Gráfica 3. Diagrama de los procesos de UPM1 en Suárez, Cauca.



Fuente: elaboración propia

El proceso anteriormente descrito se tomó de una planta de beneficio representativa (UPM1), ubicada aguas arriba de la Quebrada Tamboral, la cual cuenta con 35 cocos o barriles. En las imágenes 2, 3 y 4 se presentan los procesos que implican una demanda de agua, como también una contaminación con mercurio.

Imagen 2. Cocos amalgamadores



Fuente: elaboración propia

Imagen 3. Canales



Fuente: elaboración propia

Imagen 4. Diques de colas



Fuente: elaboración propia

4.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, MERCURIO EN AGUA Y SEDIMENTOS

A continuación se presentan los resultados y los análisis de los parámetros físicoquímicos recolectados en los cuerpos de agua Turbina y Tamboral que desembocan al embalse la Salvajina, Suárez, Cauca.

Algunos de estos datos fueron tomados en el lugar de muestreo y otros hacen parte de los resultados registrados en los anexos 1, 2, y 3 los cuales muestran el análisis correspondiente al laboratorio de Aguas y Alimentos de la UTP- Universidad Tecnológica de Pereira.

Los análisis de los parámetros físicoquímicos caracterizados para esta investigación fueron comparados con la Resolución 0631 de 2015. Algunos de los parámetros físicoquímicos, no son de interés sanitarios, es decir, la normatividad sólo exige realizar el análisis y el reporte

En la Tabla 7 se encuentran registrados los datos obtenidos para los parámetros físicoquímicos que fueron objeto de estudio en el marco de esta investigación.

Tabla 7. Resultados de los parámetros analizados en las Quebradas Turbina y Tamboral.

		PRIMER MUESTREO		SEGUNDO MUESTREO		TERCER MUESTREO	
FECHA DE MUESTREO (DD/MM/AAAA)		19/10/2016		05/12/2016		02/02/2017	
NOMBRE PUNTO DE MUESTREO							
DEPARTAMENTO:							
Cauca							
MUNICIPIO:							
Suarez							
ÁREA OPERATIVA:							
Embalse Salvajina							
PARÁMETROS A MEDIR EN CAMPO		PROMEDIO					
PARÁMETRO	UNIDADES						
pH	unidades	8,34	7,08	8,24	7,58	8,56	7,73
Temperatura	°C	23,93	21,50	20,37	19,07	21,60	19,40
Turbidez	NTU	9,09	2,95	7,45	31,23	16,83	224,33
Conductividad	µs/cm	203,67	314,00	156,90	174,33	172,80	130,63
SDT	mg/L	137,15	221,87	111,80	128,27	120,03	115,35
Color	Pt Co	51,33	fuera rango	81,33	180,67	159,67	457,33
Sólidos sedimentables	mg/L	0,50	0,60	<0,10	1,00	<0,10	1,0
Caudal	m³/seg	0,003	0,005	0,113	0,446	0,035	0,254
PARÁMETROS: LABORATORIO UTP							
Hg en agua	mg Hg/L	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	0,003	0,003
Hg en sedimentos	mg Hg/ kg	12,15	2,41	1,1	2,1	0,32	0,44
DQO	mgO ₂ /L	27	51	<4	<4	11	32
DBO ₅	mgO ₂ /L	<2,0	3	<2	<2	<2,0	<2,0
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	60	80	50	59	60	59
SST	mg/L	-	-	15	44	60	764
Acidez total	mg CaCO ₃ /L	-	-	2,5	2	2	2,7

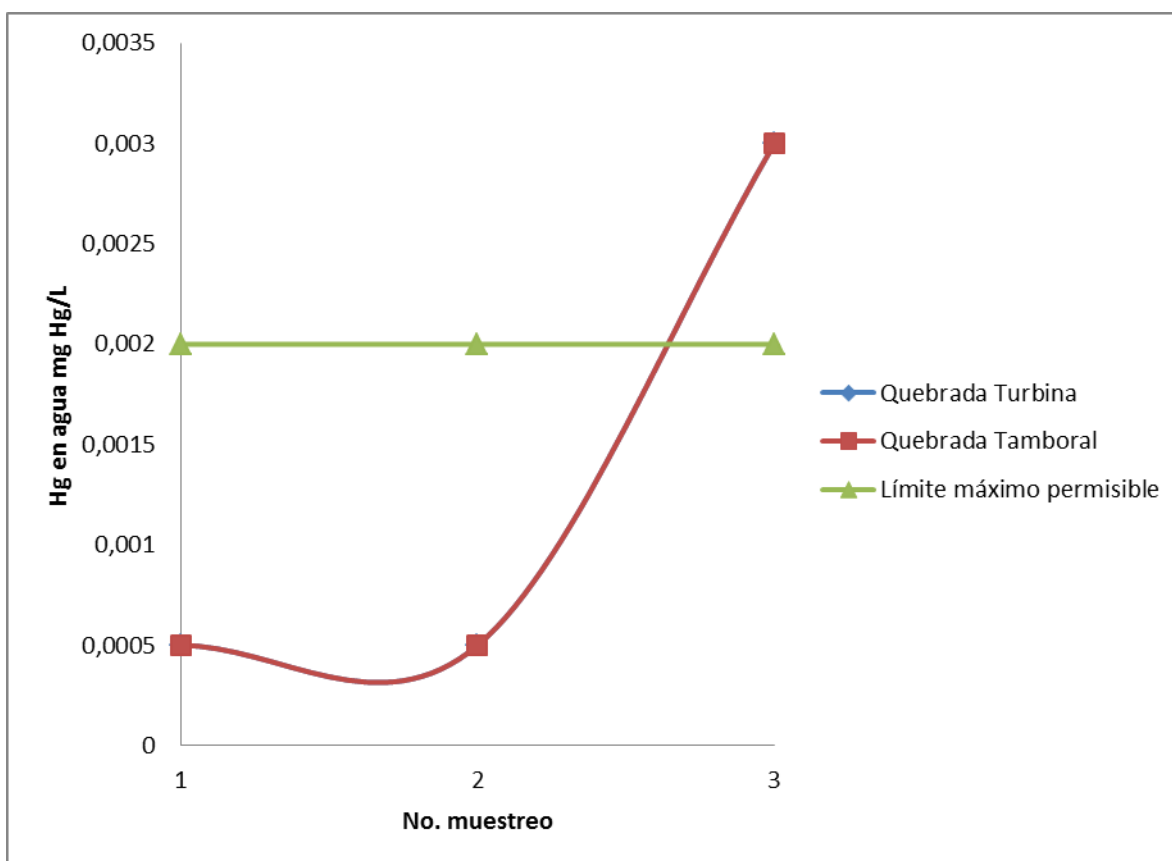
Fuente: elaboración propia

4.4 RESULTADOS Y ANALISIS DE MERCURIO

A continuación se presentan los niveles de mercurio en agua y sedimentos encontrados para las Quebradas Turbina y Tamboral.

4.4.1 MERCURIO EN AGUA

Gráfica 4. Valores de Hg en agua.



De acuerdo a la gráfica anterior, se puede indicar que a pesar de que en ambas quebradas se presentan niveles de mercurio inferiores a lo que estipula la resolución 0631 de 2015, en los muestreos uno y dos; estas presentan una importante variabilidad en el muestreo tres debido a que después de encontrarse en $<0,0008$ mg/L, logra superar el límite máximo permisible de 0,002 mg/L, hasta llegar a una concentración de 0,003 mg/L.

Las bajas concentraciones de mercurio en la columna de agua de los efluentes, se podría asociar a que en ocasiones las velocidades del agua en las quebradas es notable y por ende se genera un arrastre del material permitiendo la no permanencia del metal durante extensos periodos de tiempo.

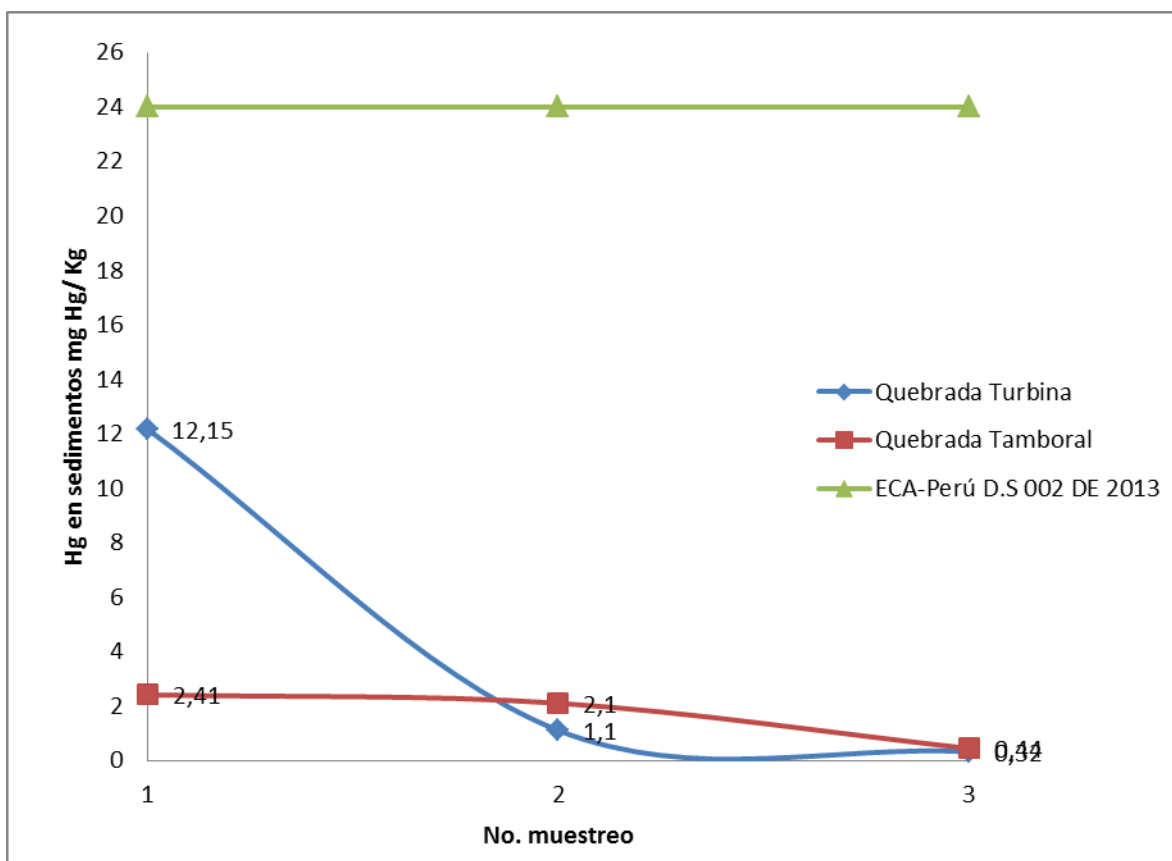
En los muestreos uno y dos los valores son menores a cero y esto puede deberse a que probablemente se presentó una precipitación de este metal debido a la presencia de sulfuros, los cuales están presentes en la materia prima, esto basado en estudios de la CRC de la composición mineralógica de la mena, en el municipio de Suarez, donde se encontró, que gran parte de la roca presenta compuestos de pirita, esfarelita, calcopirita, arsenopirita y pirrotina [16].

Igualmente puede argumentarse que debido a que en los muestreos uno y dos no se evidencio un aumento importante de caudal originado por vertimientos propios del beneficio de oro, esto podría repercutir en el bajo nivel de mercurio, que difiere del muestreo tres debido a que en este si se presencié una descarga considerablemente alta por efectos de vertimientos líquidos mineros.

De modo similar, una investigación en el departamento del Choco, cuantificó el consumo de agua y caracterizó los vertimientos en 6 entables mineros donde se reportó en la mayoría de los puntos bajas concentraciones, con valores de 0,007 - 0,002 - 0,003 - 0,004 - 0,005 - 0,007 mg Hg/L que no superan los valores permisibles. Esta situación pudo deberse a las fuertes corrientes de agua durante el lavado de la tierra, lo que permite que el mercurio liberado sea dispersado al ambiente con mucha rapidez [67].

4.4.2 MERCURIO EN SEDIMENTOS

Gráfica 5. Valores de mercurio en sedimentos.



Con base en la gráfica anterior, se evidencia que existe una variación de los valores de Hg en sedimentos, que puede estar ligada a la movilidad que presenta este metal en los ecosistemas a los cuales ingresa, debido a que la mayor parte del mercurio que se incorpora a las quebradas objeto de estudio, se moviliza en el material suspendido y es arrastrado por las corrientes del cauce; posteriormente, este se sedimenta porque el mercurio no es soluble en agua. Además, posiblemente se queden cantidades considerables de mercurio en los diques de cola y en los suelos debido a que los vertimientos son indirectos.

Debido a que en Colombia no existe actualmente una norma que estipule los niveles máximos permisibles de mercurio en sedimentos y suelo, originado por actividades mineras, se consideró una norma internacional que fue el Decreto supremo No. 002-2013-MINAN de Perú; el periodo de eliminación del mercurio en

Perú no es tan antiguo como en países como EE.UU y por ende los niveles son más aproximados a los registrados en Colombia, que solo hace poco tiempo inició la erradicación de uso de este metal en minería.

A partir de este decreto se tiene como referencia el valor permisible de 24 mg/ kg para suelo de uso comercial, industrial o extractivo, y en este estudio se constata que los valores de mercurio en sedimentos de las quebradas Tamboral y Turbina no superan los estándares de calidad ambiental para el uso del suelo.

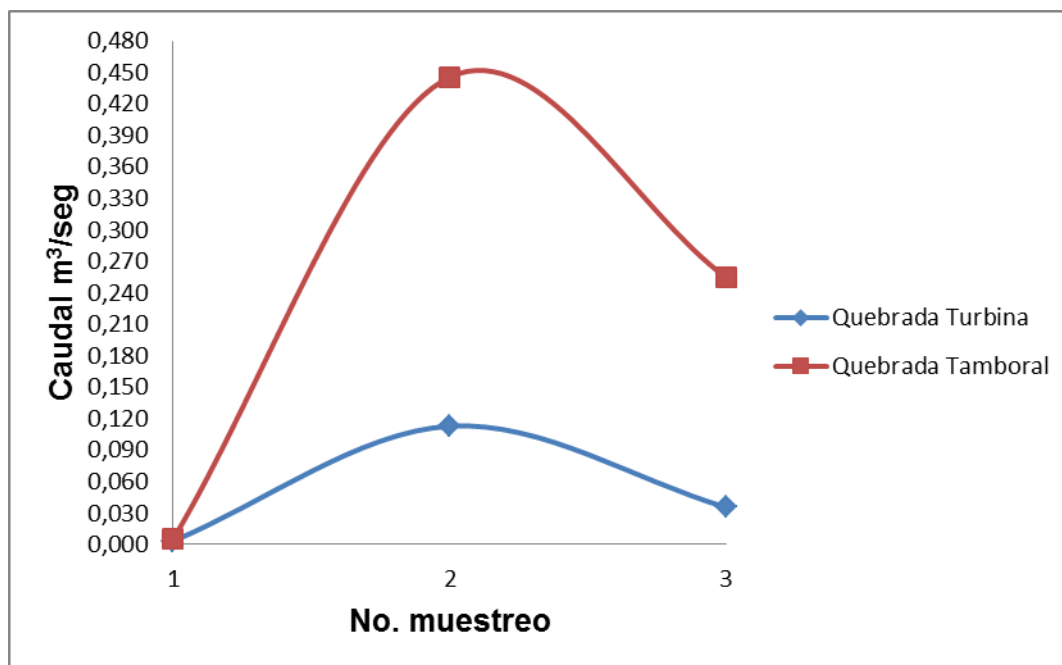
Al encontrar niveles de mercurio en los sedimentos de las quebradas objeto de estudio, se demuestra que los sedimentos pueden actuar como fuentes de contaminación y los metales pesados pueden ser liberados a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales [68]. Esta situación genera preocupación pues indica que hay una afectación al ecosistema y que por ende puede traer consecuencias negativas para la biota acuática y la vida de las personas.

4.5 RESULTADOS Y ANALISIS-PARAMETROS FISICOQUÍMICOS

A continuación se presentan las gráficas y análisis de los parámetros fisicoquímicos realizados a las quebradas Turbina y Tamboral.

4.5.1 CAUDAL

Gráfica 6. Valores de caudal.



La gráfica 18, muestra la variación del caudal en los diferentes días de muestreo. Para el primer muestreo los valores para las dos quebradas se encuentran en un rango de 0,000 a 0,010 m³/seg, esto se relaciona con las características del clima de la zona, pues las condiciones encontradas coinciden con una época de verano, lo que a su vez también influyó en el nivel del embalse pues el nivel registrado para el primer muestreo fue de 1.116,85 msnm. En el segundo muestreo los valores registrados se encuentran 0,100 a 0,450 m³/seg, que al compararlos con respecto al primer muestreo se aprecia un aumento en los valores de caudal de las Quebradas, así como también un aumento en los niveles del embalse la Salvajina con valor de 1.131,70 msnm, siendo estos los valores picos de caudal para las dos quebradas, esto se podría asociar al aporte de caudal generado por los vertimientos de las plantas de beneficio de las UPM, y posiblemente a un aumento de las precipitaciones. Cabe resaltar que no se tuvo acceso a los datos de estaciones meteorológicas puesto que esta ha dejado de funcionar ya hace varios años. Por último en el tercer muestreo, los valores tienden a disminuir, pero

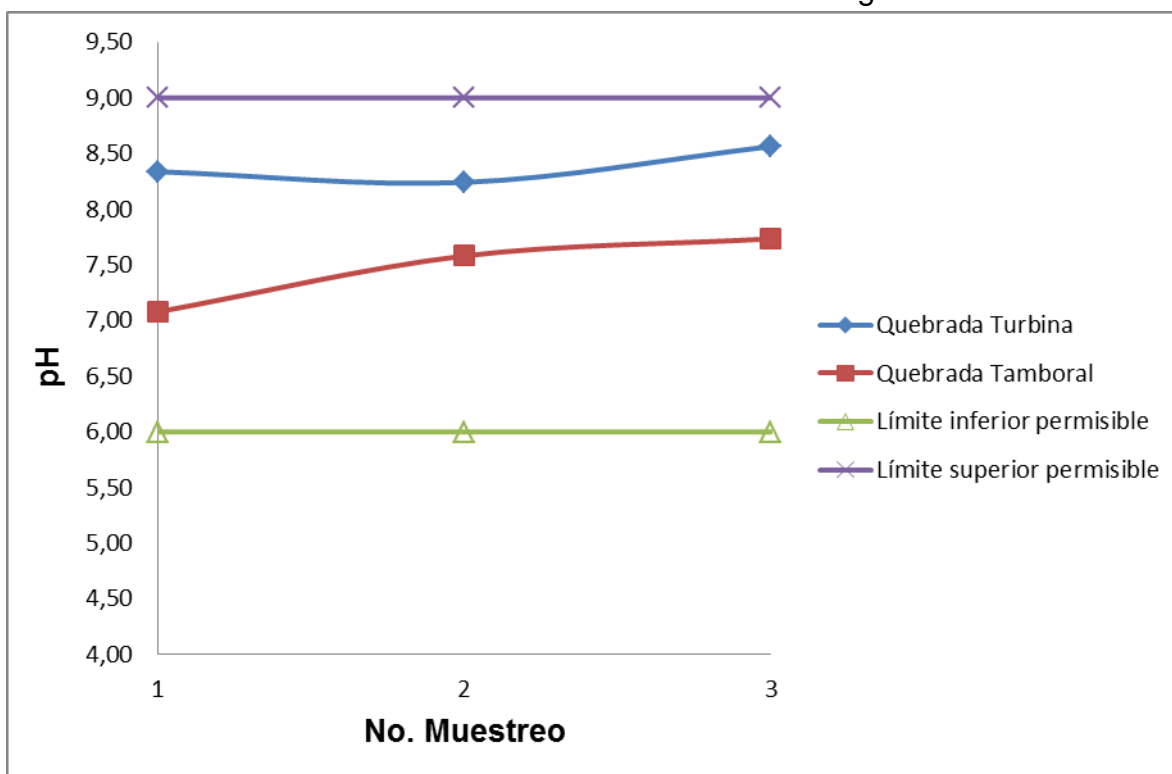
siguen siendo altos con respecto al primer muestreo; para la Quebrada Turbina el valor es de 0,035 m³/seg y para la Quebrada Tamboral es de 0,254 m³/seg.

La variación del caudal está relacionada directamente con los períodos de producción dentro de las plantas de beneficio ubicadas aguas arriba de las Quebradas Turbina y Tamboral, así como también, con la cantidad de UPM-unidades productoras mineras que descargan sus vertimientos a las quebradas.

El caudal es uno de los parámetros importantes para este estudio, pues los sistemas acuáticos pueden en ocasiones ser autodepuradores, es decir, que pueden asimilar cargas de contaminación antes de que los efectos negativos de la contaminación sean apreciables.

4.5.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO-pH

Gráfica 7. Valores del Potencial de Hidrógeno



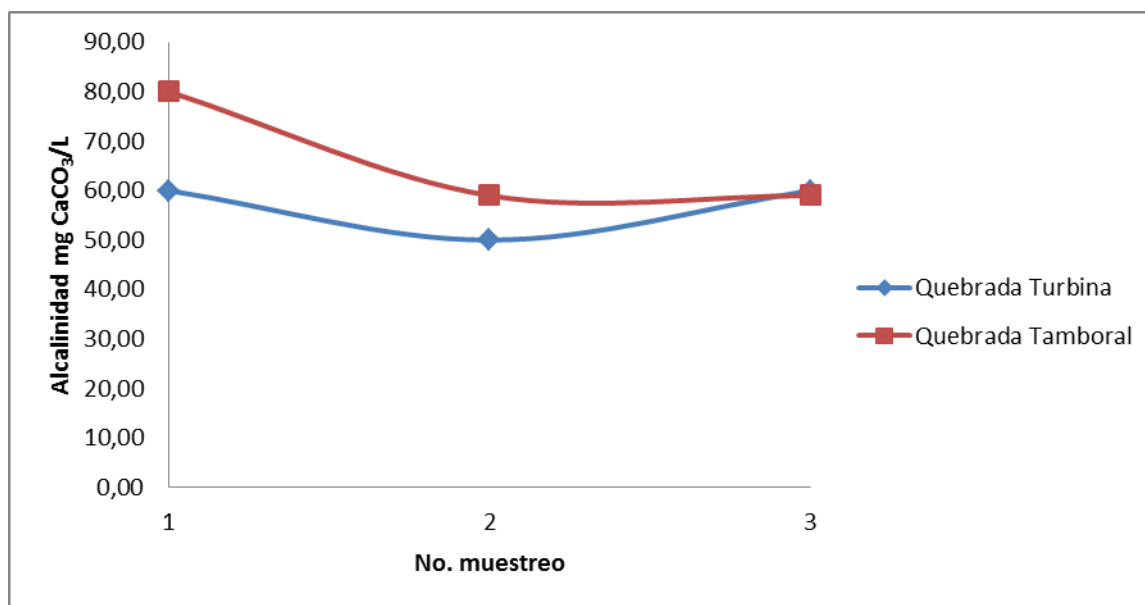
De acuerdo con los resultados obtenidos en este parámetro (pH), se puede indicar que las diferencias en la actividad productiva de las plantas de beneficio y los valores de caudal influyen en la variabilidad del pH. Esto se ratifica con el hecho

de que la quebrada más caudalosa tiene una capacidad de dilución mayor, porque al comparar la Quebrada Tamboral con la Quebrada Turbina, el valor de caudal pico registrado para la quebrada Tamboral fue de 0,446 m³/seg en contraste con la quebrada Turbina que fue de 0,113 m³/seg, de ahí que se evidencien menores unidades de pH en contraste con la Quebrada Turbina.

Al tener en cuenta la Gráfica 7, y los valores máximos permisibles que menciona la Resolución 0631 de 2015, se observó que los resultados están dentro del rango estipula la norma. Para la Quebrada Turbina los valores oscilan entre 8 y 8,5 unidades, mientras que para la Quebrada Tamboral los valores se encuentran entre 7 y 7,7, esto indica que las dos Quebradas cumplen con el criterio de la normatividad. Es importante resaltar que las diferencias de pH entre las quebradas se debe al número de entables mineros que descargan sus vertimientos y al material (roca) que se utiliza dentro de las UPMs

4.5.3 ALCALINIDAD

Gráfica 8. Valores de alcalinidad



La grafica 8 muestra los niveles de alcalinidad registrados para ambas quebradas, en donde se aprecia que para la quebrada Tamboral se obtuvo una concentración alta de 80 mg/L CaCO₃, donde se tiene para este recurso, una calidad de agua muy amortiguada, (Tabla 8) mientras que para Turbina con valores de 60mg/L CaCO₃ indica que esta agua es moderadamente amortiguadora. Esto se atribuye

que estas aguas tienen la capacidad de evitar grandes variaciones de los pH, llamados también sistema buffer o tampones, que representan un equilibrio de ácidos y bases [69]. Al presentarse este sistema dentro de las zonas de estudio es bueno porque evita que se dé un impacto directo a las aguas receptoras, por lo tanto, menor afectación la fauna o la biota acuática.

Tabla 8. Calidad de agua en función de su contenido de alcalinidad.

Calidad de agua	Alcalinidad (mg/L)
Mínimo aceptable	20
Probablemente amortiguada	<25
Moderadamente amortiguada	25 – 75
Muy amortiguada	>75

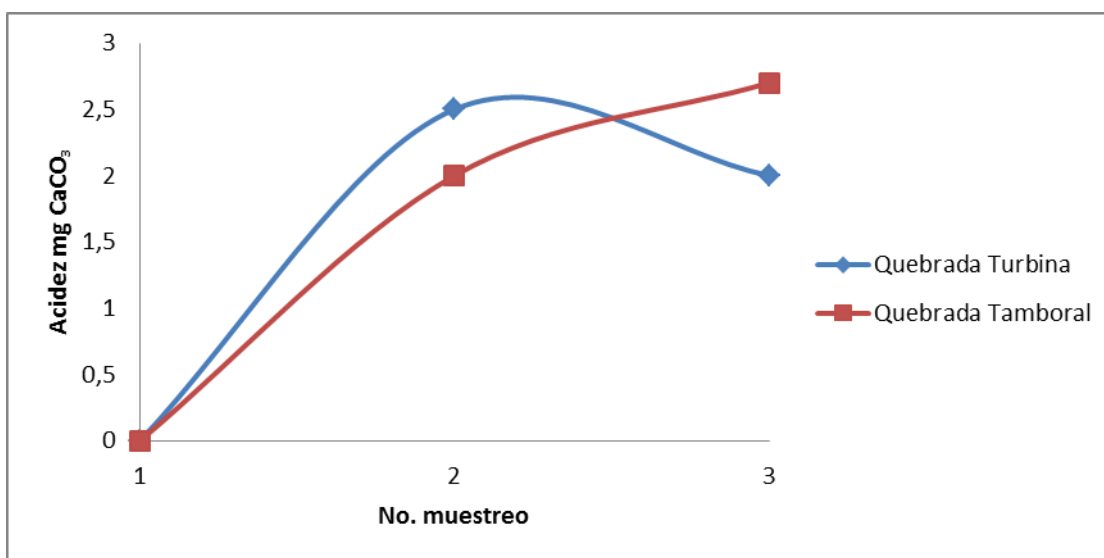
Fuente: Caracterización del agua recirculada y optimización de la dosificación de lechada de cal en el agua residual del ingenio Risaralda S.A [70].

De acuerdo a los requerimientos de la resolución 0631 de 2015, para este parámetro no se especifica el máximo permisible, solo se sugiere que sea analizado y reportado.

4.5.4 ACIDEZ TOTAL

Esta medida corresponde a una disminución del pH de un agua, provocada por la entrada de ácidos más o menos fuertes que puedan anular la capacidad reguladora [71].

Gráfica 9. Niveles de acidez del agua.



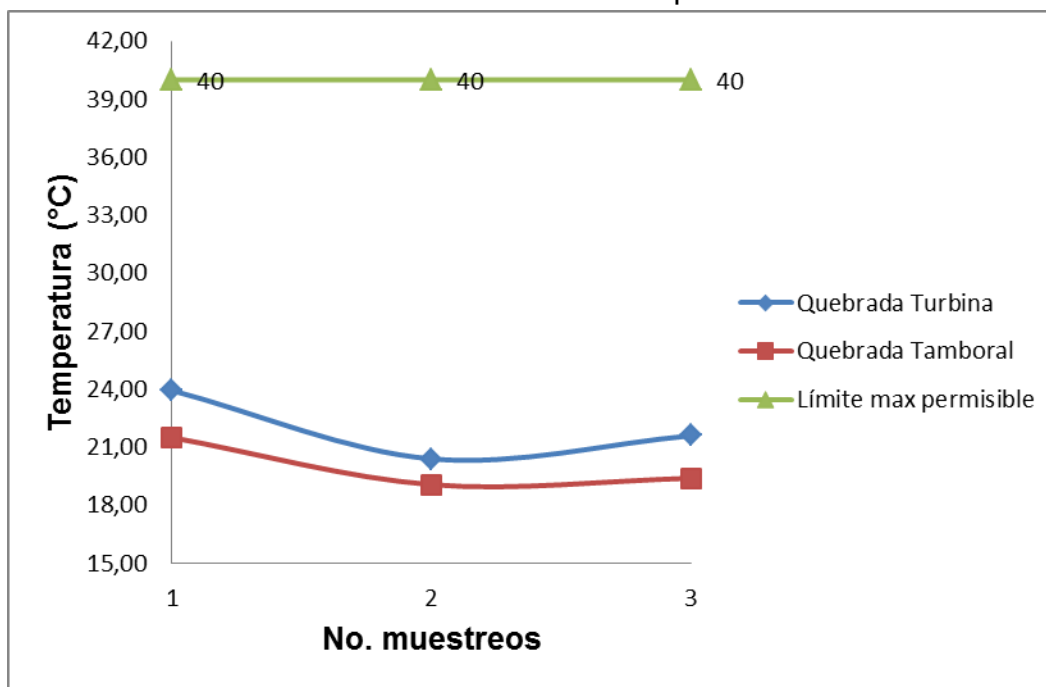
La acidez para las quebradas Turbina y Tamboral representada en la gráfica 8 expresa una variación poco significativa para los muestreos de 2,0- 2,5 y 2,7 mg CaCO₃, estos valores de pH, pueden ocasionar daños a los ecosistemas acuáticos y también terrestres, dado que en algunas unidades productoras las escorrentías pasan por suelos impactando la vegetación y aniquilando su capacidad de resistencia por las descargas, además de ello en la vida acuática la probabilidad de supervivencia de los organismos es nula, estos requieren un rango de pH 6.5 a 8.00 para sobrevivir [54] pues no tiene capacidad asimilativa de permitir una acidez tan baja.

De manera que, en las operaciones mineras y metalúrgicas pueden generarse efluentes como agua de relave, filtraciones o derrames de aguas ácidas, donde los efluentes pueden contener contaminantes tóxicos en alta concentración, así como también acidez o alcalinidad, metales pesados, sulfato, sólidos en suspensión [72].

Finalmente la acidez está relacionada con la alcalinidad, ya que a decreciente acidez, valores crecientes de alcalinidad se obtendrán, tal como indica la Gráfica 9 por la capacidad que este tiene para amortiguar. Para este parámetro, la normatividad de vertimiento (Decreto 0631 de 2015) únicamente pide su análisis y reporte.

4.5.5 TEMPERATURA

Gráfica 10. Valores de temperatura



La Quebrada Turbina presentó un valor máximo y mínimo de temperatura de 23,90°C y 21,60°C, respectivamente, mientras que para la Quebrada Tamboral el valor máximo y mínimo corresponden a 21,50°C y 19,07°C, de lo que se infiere, que con base a la resolución 0631 de 2015, los valores obtenidos se encuentran dentro del valor límite máximo permisible. Así mismo, se puede apreciar que los valores de temperatura para las Quebradas fluctúan debido a las variables, tales como: época del año, caudal, la espesura o boscosidad en que se encuentra la zona de estudio, y la hora del día en que se determinó.

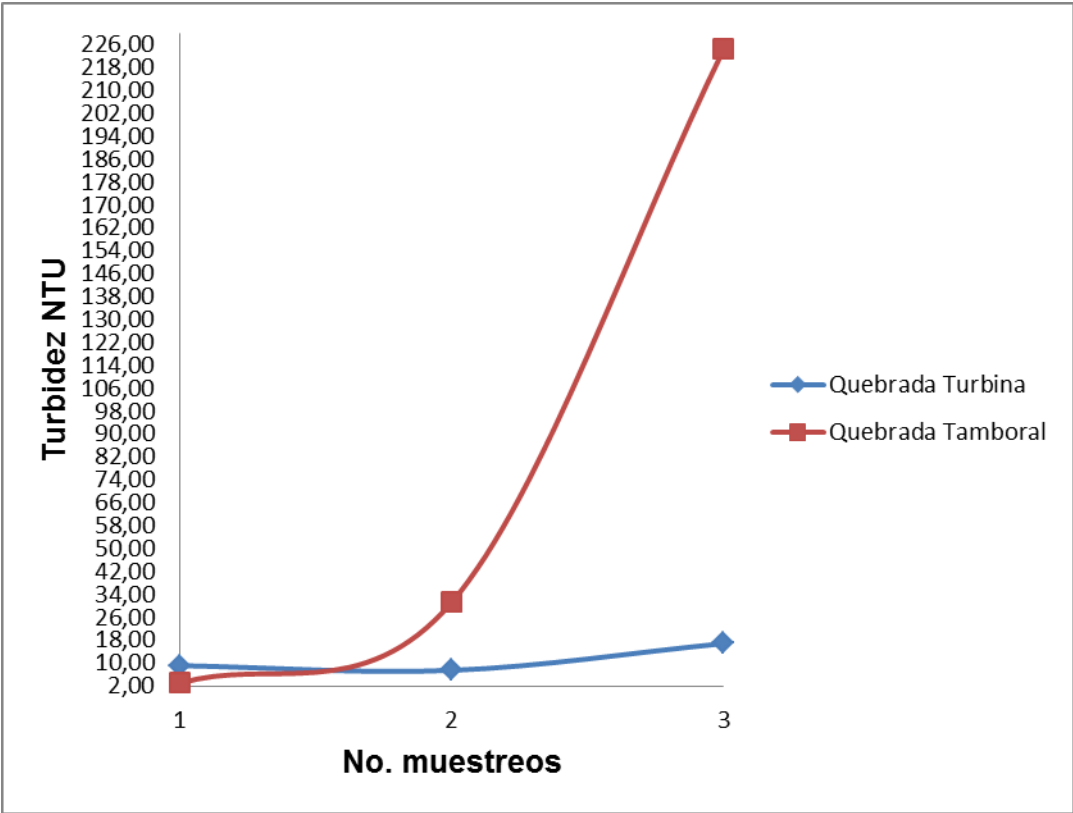
La mayor temperatura se presentó para el primer muestreo para ambas quebradas, Turbina y Tamboral con valores de 23,93°C y 21,50°C, respectivamente; teniendo en cuenta que este primer muestreo se realizó en horas de la tarde con temperatura ambiente de 32°C.

En contraste con lo anterior, para los siguientes muestreos, dos y tres la temperatura ambiente registrada fue de 29°C, obteniendo un descenso con valores de 19 y 20 °C, para cada una de las quebradas.

La temperatura de los efluentes mencionados, no se está alterando con el proceso que se lleva a cabo en la actividad minera, pues al estar dentro del rango permisible, no afecta las condiciones y hacen que sean aptas para la supervivencia de la biota acuática.

4.5.6 TURBIDEZ

Gráfica 11. Valores de Turbidez.



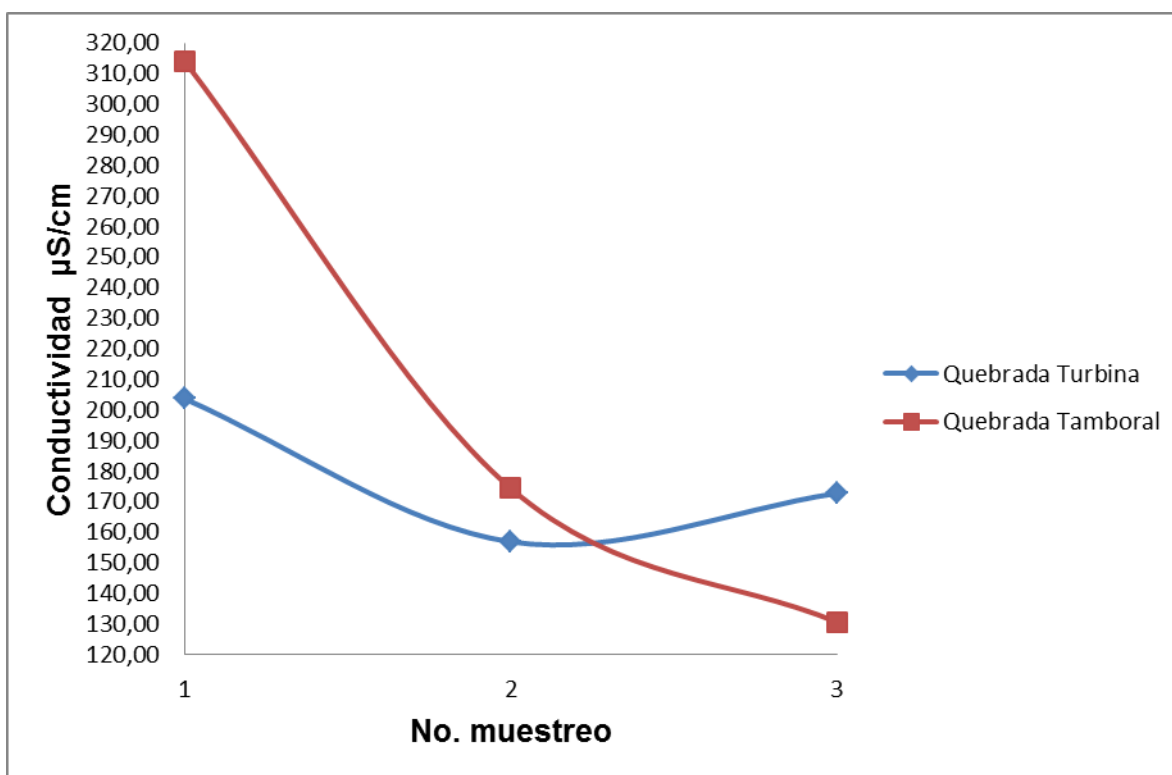
La turbidez es un parámetro de carácter físico y en el agua es provocado por la materia insoluble, en suspensión o dispersión coloidal.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los diferentes muestreos realizados para cada una de las Quebradas, se aprecian valores que presentan fluctuaciones considerables (gráfica 11) puesto que para la Quebrada Turbina, los datos van desde 9,09 NTU hasta un máximo de 16,83 NTU, mientras que para la Quebrada Tamboral el valor mínimo y máximo son de 2,95 NTU y 224,33 NTU, respectivamente.

De lo anterior se deduce que estas fluctuaciones se deben a los procesos que se realizan aguas arriba de la Quebrada, es decir, en las plantas de beneficio y a la cantidad de estas que descargan aguas a dicha quebrada. El valor pico de turbidez es de 224,33 NTU y corresponde a la Quebrada Tamboral, este dato se debe a que posiblemente se haya presentado una descarga de vertimientos mineros, también a la cantidad de UPM o plantas de beneficio ya que es mucho mayor en comparación con Turbina, pues en Tamboral son cinco plantas de beneficio que descargan sus vertimientos, además, sólo una planta de beneficio más cercana a la Quebrada, cuentan con 35 cocos o barriles, lo que aumenta la cantidad de materia en suspensión pues en el proceso de lavado de las zanjales o canalones se realiza un aporte considerable de partículas insolubles a los diques de cola, estos a su vez, desembocan en la quebrada Tamboral. Valores altos de turbidez están asociados a la disminución de la producción de oxígeno por fotosíntesis e indica deterioro estético en el cuerpo de agua, además restringe los posibles usos de esta, así mismo ocasiona depósitos por sedimentación, lo que favorece para este caso la concentración de cantidades de mercurio en los sedimentos, esto se hace evidente en los niveles registrados de mercurio para sedimentos puesto que son mayores a los niveles de mercurio en agua. [73].

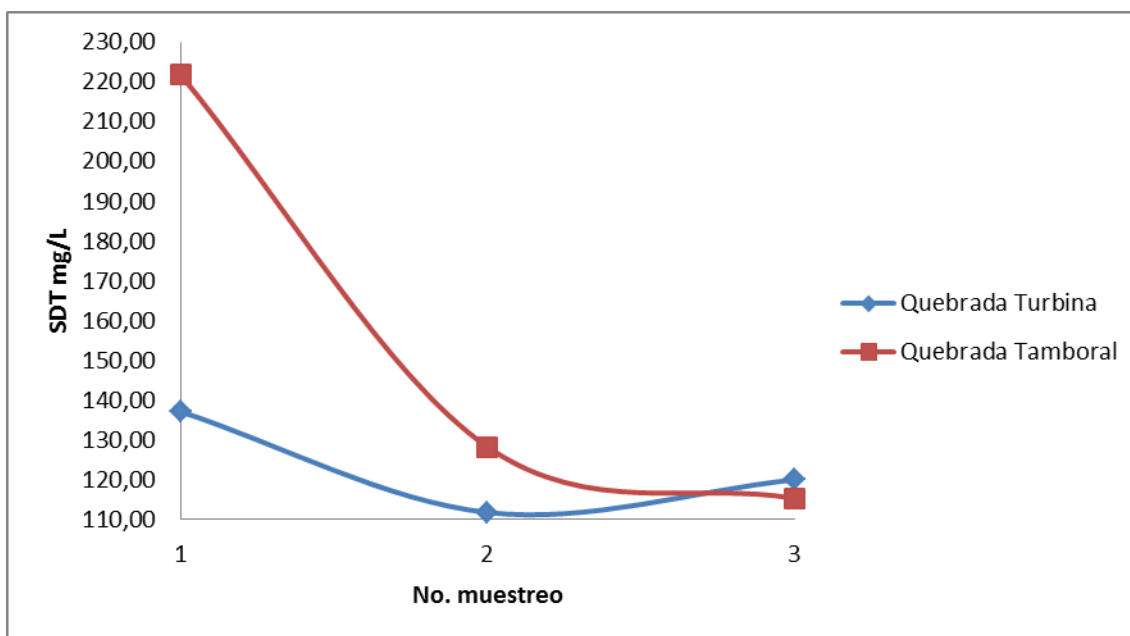
4.5.7 CONDUCTIVIDAD

Gráfica 12. Valores de conductividad.



4.5.8 SDT- SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

Gráfica 13. Valores de sólidos disueltos totales.

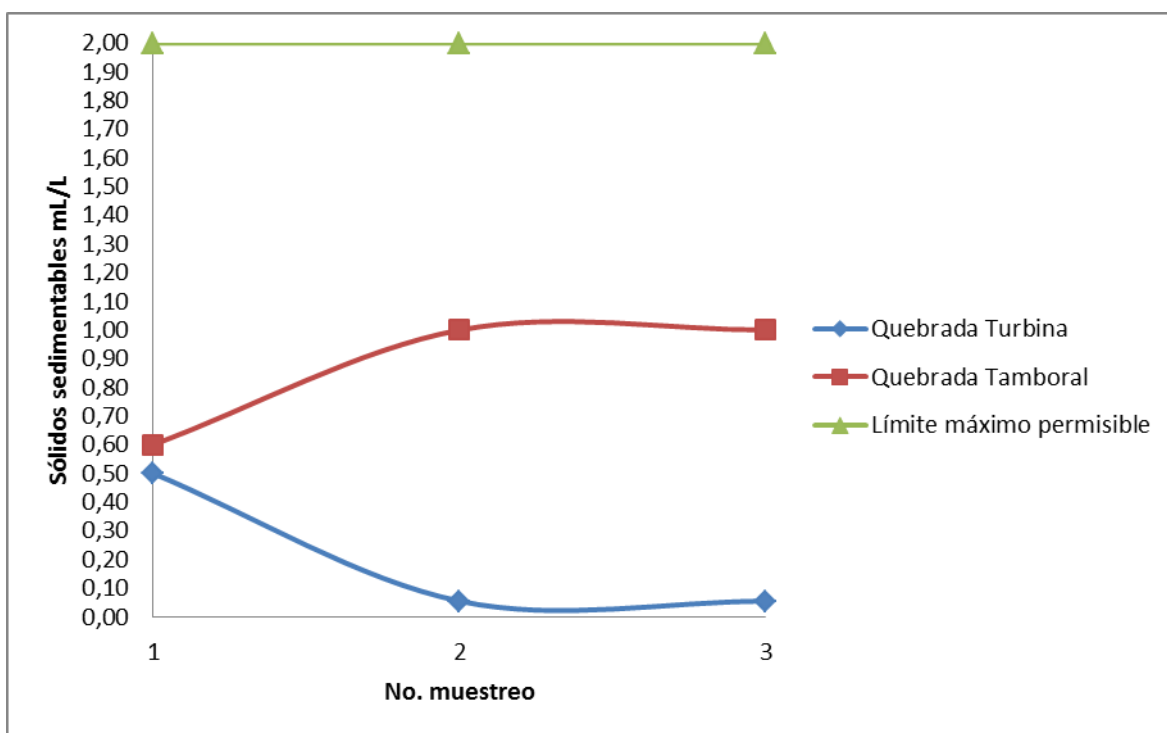


Es importante resaltar que la conductividad eléctrica está estrechamente relacionada con los sólidos disueltos totales SDT, pues cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad; es decir una relación directamente proporcional [68]. Lo anterior se hace evidente en los valores registrados para este estudio, pues de acuerdo con las gráficas 12 y 13 para la Quebrada Turbina el valor más alto de conductividad fue de 203,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los SDT fueron de 137,15 mg/L; así mismo, para la Quebrada Tamboral el valor de conductividad corresponde a 314 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los SDT registrados fueron de 221,87 mg/L.

Este valor pico se registra debido a que en el momento de la toma de muestra de agua, se estaban generando vertimientos a la quebrada.

4.5.9 SÓLIDOS SEDIMENTABLES

Gráfica 14. Valores de sólidos sedimentables.



Los resultados obtenidos para los dos cuerpos de agua Turbina y Tamboral están influenciados por los vertimientos provenientes de las unidades productoras, en la gráfica 14 se muestra que la Quebrada Tamboral posee valores de 0,60 mg/L, 1,00 mg/L, y 1,00mg/L en sólidos sedimentables mayores a la Quebrada Turbina; esto atribuido a que en el sector de la vereda Tamboral hay un mayor número de entables mineros, por ende se presenta una mayor producción, y a su vez un

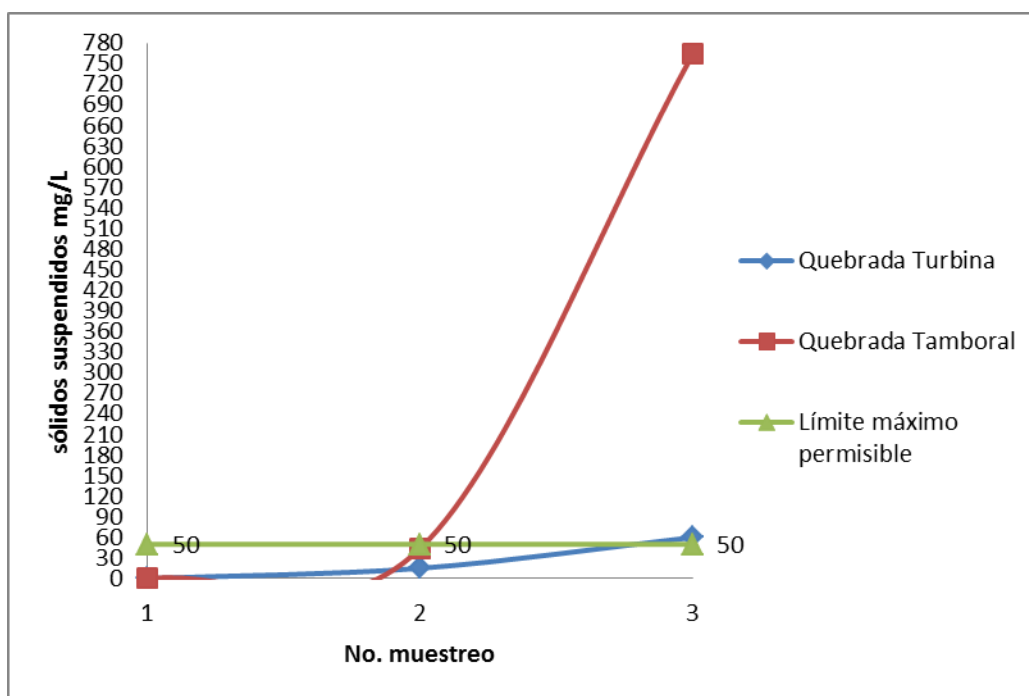
aumento en los sólidos sedimentables. La elevada concentración de sólidos sedimentables son un aspecto muy relevante en las actividades mineras debido a que estos favorecen la decantación de metales pesados y su posterior acumulación en los sedimentos, como se evidencia en los valores encontrados de Hg en sedimentos para este estudio.

Para este estudio se logró visualizar que los vertimientos provenientes de las UPM son indirectos. En los diques de cola evidenciados se genera colmatación por causa de las precipitaciones de la zona, y el frecuente aumento de caudal al interior de la planta de beneficio. Durante el reconocimiento de campo se apreció que se generan escorrentías superficiales, que además arrastran partículas provenientes del suelo; posteriormente llegan hasta las quebradas, aumentando de esta manera las partículas que se disuelven.

De acuerdo a la resolución 0631 de 2015, los valores obtenidos para las quebradas se encuentran dentro del rango de la normatividad, es decir, por debajo de 2 mg/L de concentración de sólidos sedimentables.

4.5.10 SÓLIDOS SUSPENDIDOS

Gráfica 15. Valores de sólidos suspendidos.



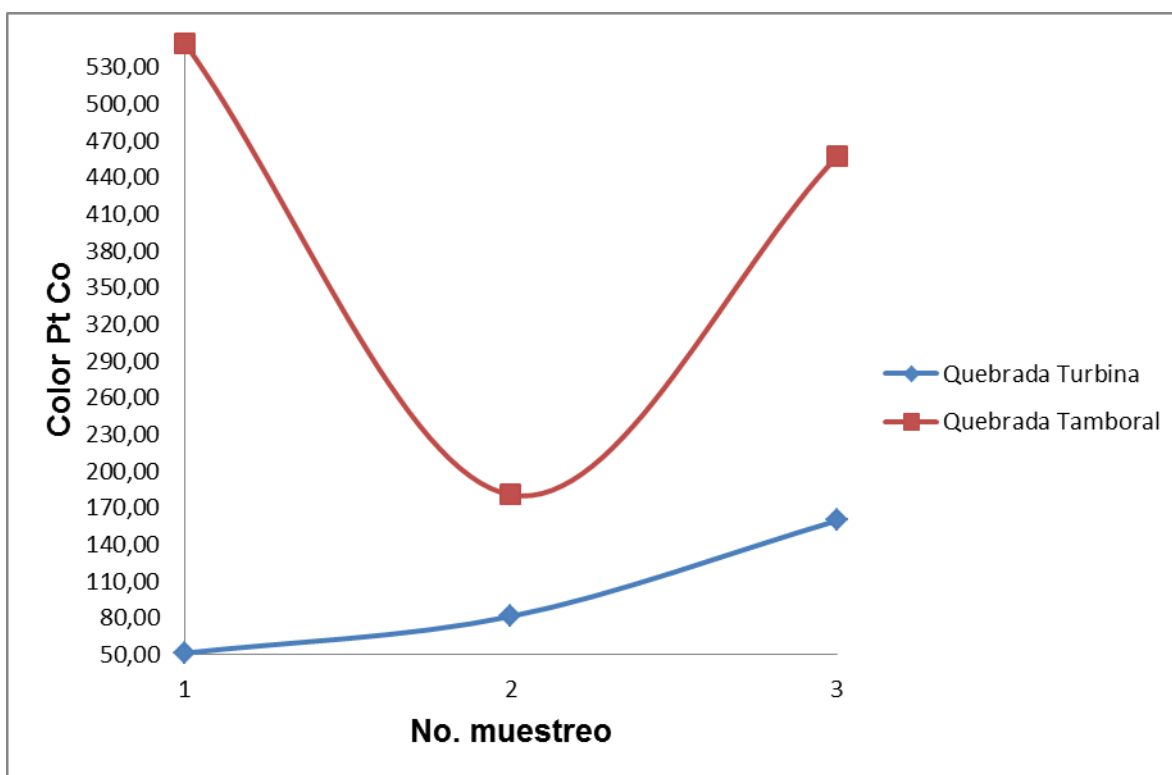
Los sólidos suspendidos son un importante indicador, ya que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando la actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno [75]. En la Gráfica 15 se puede observar una variación en los valores obtenidos para las dos quebradas. En el primer muestreo, no se realizó el análisis de los sólidos suspendidos, mientras que para el segundo muestreo, los valores obtenidos fueron de 15 mg/L para la Quebrada Turbina y 44 mg/L para la Quebrada Tamboral. En el tercer muestreo, los valores registrados fueron de 60 y 764 mg/L para la Quebrada Turbina y Tamboral, respectivamente. Es de apreciar que los valores obtenidos para el segundo muestreo, no sobrepasan el límite máximo permisible establecido por la resolución 0631 de 2015, en contraste con los registrados para el tercer muestreo, que sí superan el límite máximo.

El valor pico corresponde a la Quebrada Tamboral y se presentó para el tercer muestreo, con valor de 764 mg/L, esto debido a la cantidad de UPM o plantas de beneficio, que descargan sus vertimientos a esta quebrada, pues el número de ellas es mayor a comparación con la Quebrada Turbina, además de ello los valores de caudal más altos corresponden a esta misma quebrada, indicando la posibilidad de un arrastre mayor de partículas suspendidas.

Por otra parte, los sólidos suspendidos, influyen en la turbiedad del agua, de ahí que se encuentra una relación directamente proporcional con los valores de turbiedad, porque son los materiales suspendidos de las unidades productoras mineras- UPM o plantas de beneficio ubicados aguas arriba de las quebradas, los que impiden el paso de la luz. Esto se hace evidente en los valores pico registrados para turbiedad correspondientes al tercer muestreo para cada una de las quebradas.

4.5.11 COLOR

Gráfica 16. Valores de color



Cuando un cuerpo de agua presenta cierta coloración esta puede ser causada bien sea por sustancias en solución o en suspensión. Por otro lado, los cuerpos de agua que son afectados por actividades humanas variarán su color dependiendo del tipo de actividad que se lleva a cabo [74]. Debido a los procesos que se realizan dentro de las unidades productoras mineras, se generan vertimientos que ocasionan el arrastre de partículas y la dispersión de las mismas, favoreciendo un cambio en el color aparente de las Quebradas objeto de estudio, puesto que, durante los días de muestreo se pudo apreciar que el color aparente para la Quebrada Tamboral y Turbina, era variable, debido a que en el momento de la descarga se presenta un color gris pálido, pero después de transcurrido un tiempo el color varía a uno casi transparente.

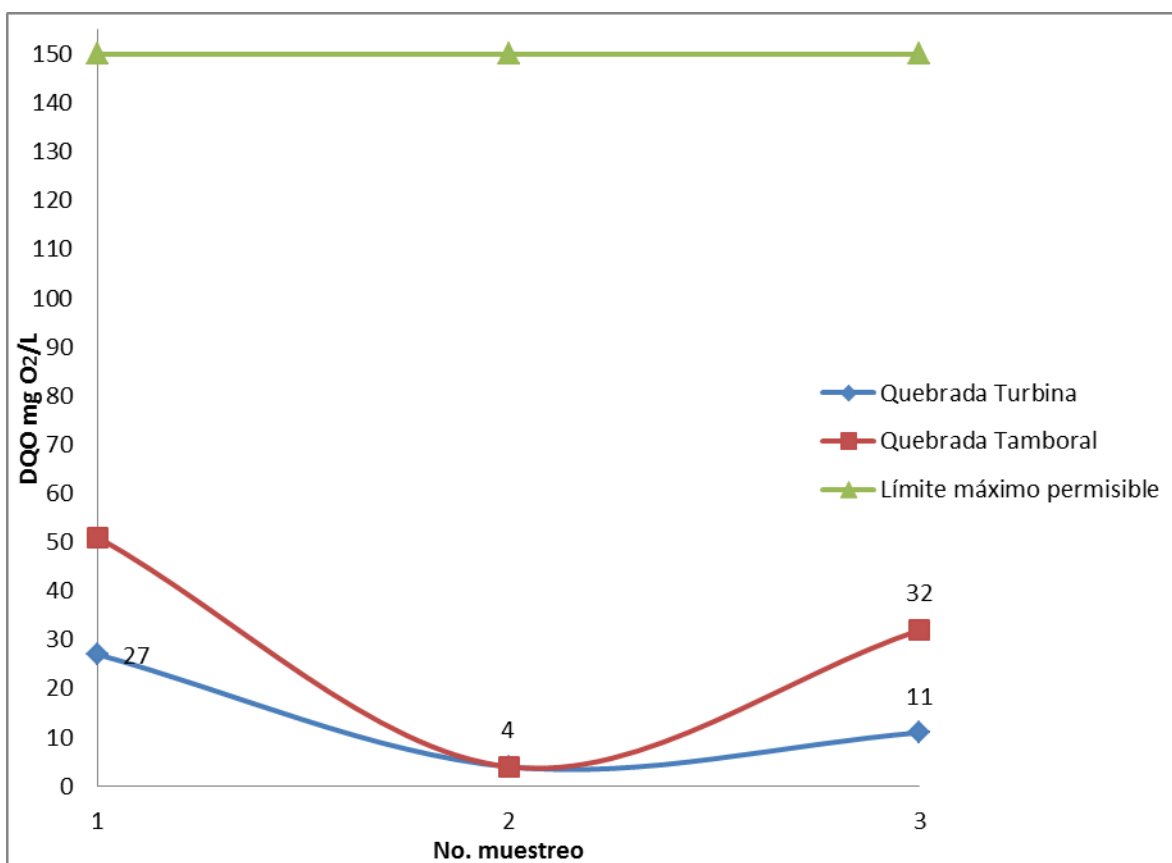
Los valores de la Quebrada Turbina, oscilan entre 50 y 160 Pt Co, mientras que los valores de la Quebrada Tamboral, registran un rango de 180 a 550 Pt Co, como se puede apreciar en la Gráfica 16. También, el pico más alto registrado en los días muestreos corresponden a la Quebrada Tamboral, y se debe a la hora del día en que se registró el parámetro, debido a que este se tomó a las 6 pm, momento en el que se produce una descarga, lo que con lleva a que el colorímetro

registre su valor máximo de detección, es decir 550 Pt Co. Aunque el color no ocasione problemas sanitarios, es importante, porque su presencia genera cierto rechazo de la comunidad debido a la estética, pues es un indicativo de donde procede el agua.

Es importante resaltar que existe una relación directamente proporcional entre los valores de Turbidez y Color, esto se hace evidente en los datos registrados para los muestreos, por ejemplo en el último muestreo se obtuvo un valor para color de 457,33 Pt Co mientras que la turbidez que fue de 224,33 NTU para la Quebrada Tamboral, en contraste con la quebrada Turbina que registró valores pico de 159,67 Pt Co y 16,83 NTU para color y turbidez, respectivamente.

4.5.12 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO- DQO

Gráfica 17. Valores de DQO



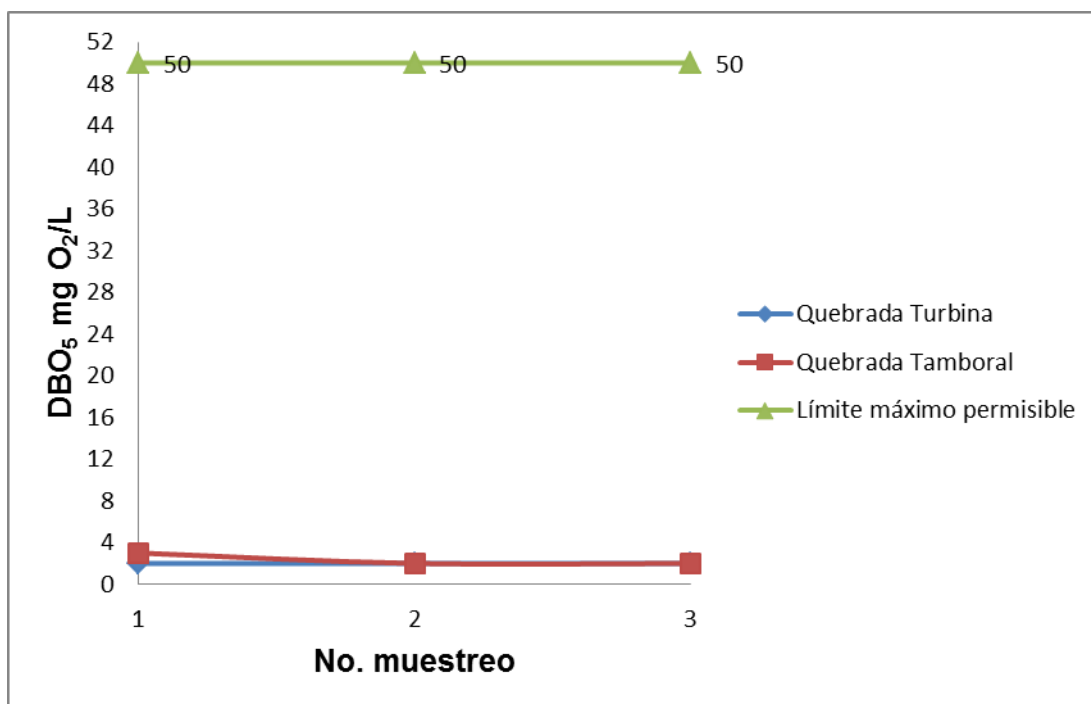
En la Gráfica 17, se presentan los valores de DQO para las quebradas Turbina y Tamboral, indicando concentraciones máximas en la Quebrada Tamboral para el primer y tercer muestreo, con valores de 51 y 32 mg/L, mientras que para el segundo muestreo, las dos quebradas obtuvieron una concentración de 4 mg/L. La Quebrada Turbina presentó una fluctuación de 27 y 11 mg/L, para el primer y tercer muestreo, respectivamente.

La demanda química de oxígeno, muestra concentraciones altas con relación a la DBO₅, esto debido a que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente y su contenido es de materia orgánica e inorgánica, como los sulfuros.

Los niveles de DQO en los cuerpos de agua en estudio, Turbina y Tamboral se encuentran por debajo del límite máximo permisible según la resolución 0631 de 2015, en la cual estipula que el valor permisible en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales de la actividad minera, debe ser inferior a 150 mg/L.

4.5.13 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO- DBO₅

Gráfica 18. Valores de DBO₅.



La demanda bioquímica de oxígeno-DBO representa la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos para llevar a cabo la descomposición de la materia orgánica.

Como se puede observar en la Gráfica 18, los valores obtenidos para los diferentes días de muestreo oscilan entre 2 y 3 mg/L O₂. A partir de ello se podría inferir que las quebradas tienen bajos contenidos de materia orgánica, esto se debe posiblemente a que estas quebradas reciben aguas residuales domésticas, además de que los vertimientos no son directos sino que se generan escorrentías superficiales, que además arrastran partículas provenientes del suelo. También es importante resaltar que dentro de los procesos que se desarrollan en las UPM, se hace uso de materia orgánica como limón y lima.

Estas bajas concentraciones también podrían estar ligadas a los sistemas acuáticos que en ocasiones pueden ser autodepurados, es decir, asimilan cargas contaminantes antes de que los efectos de la contaminación sean apreciables.

También es importante resaltar que los valores registrados no superan el límite máximo permisible exigido en la resolución 0631 de 2015, el cual se encuentra estipulado en 50 mg/L O₂.

4.6 RESULTADOS ICOMINERA- ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN MINERA

Tabla 9. Resultados ICOMINERA para las quebradas en los diferentes muestreos.

Muestreo	Punto de muestreo	Turbidez	SST	Mercurio total	Mercurio total	Valor de los subíndices			valor ICOMINERA	Grado de contaminación
		NTU	(mg/L)	mg/L	µg/L	I _{turbidez}	I _{SST}	I _{mercurio}		
3	Quebrada Turbina	16,83	60	0,003	3	0,229	0,160	0,254	0,21	Contaminación leve
	Quebrada Tamboral	224,33	764	0,003	3	1,000	1,000	0,254	0,75	Contaminación alta

Fuente: elaboración propia

La Tabla 9 presenta el grado de contaminación de acuerdo a la ICOMINERA, para realizar el cálculo se tomaron los valores registrados para el muestreo 3 debido a que estos se encuentran por encima del valor de detección. Se puede apreciar que la quebrada Turbina presenta un índice de contaminación leve y la quebrada Tamboral un índice de contaminación alto.

Esto se puede atribuir a la cantidad de UPMs que descargan sus vertimientos a dichas quebradas, pues para la Quebrada Turbina sólo hay una planta de beneficio que descarga sus vertimientos, con lo que se podría relacionar que se presentara una contaminación leve, mientras que para la Quebrada Tamboral son cinco las UPMs las que descargan sus vertimientos.

En las áreas de estudio, el grado de contaminación se hace evidente, debido a que los vertimientos mineros son indirectos. Los diques de cola se colmatan, ocasionando una escorrentía superficial, que a su vez arrastran partículas del suelo, durante este proceso se afectan los recursos naturales tales como: flora y fauna, además se genera una degradación del suelo modificando el pH de estos, así como una disminución de los nutrientes, debido al posible aporte de cantidades considerables de mercurio que además, puede ser almacenado en la vegetación de la zona de estudio; posteriormente, estas partículas llegan a las quebradas modificando sus características, lo que se hace evidente a través de la variación de los parámetros fisicoquímicos analizados para este estudio, lo que genera preocupación debido a que se pone en riesgo el recurso hídrico y la calidad de vida de los habitantes pues el mercurio es transformado por las bacterias a metilmercurio, el cual podría ingresar a la cadena trófica alcanzando las especies acuáticas y por ende al consumidor como es el ser humano. Cabe destacar que durante el reconocimiento de campo se logró identificar que en los procesos de trituración, molienda, amalgamación, entre

otros, aportan cargas contaminantes debido al uso de cantidades considerables de agua, como también de productos químicos como el mercurio.

Es importante resaltar que para ambas quebradas se registró el mismo valor de mercurio en agua, pero la contaminación alta de la Quebrada Tamboral, está asociada a que este índice incluye también los parámetros de Turbidez y SST, los cuales son superiores al compararse con los valores de la quebrada Turbina. Indicando que el grado de contaminación encontrado se debe a los valores registrados para dichos parámetros.

La Tabla 10 expone recomendaciones basadas en la ICOMINERA, de acuerdo a los resultados del grado de contaminación obtenidos para los dos efluentes. El cual indica que los cuerpos de agua deben incluirse para vigilancia especial debido a las restricciones para su uso, se debe iniciar con los procesos sancionatorios y operativos de control de las actividades que generan esta contaminación, realizar los monitoreos de vigilancia que permitan minimizar los impactos generados por la actividad minera. Se recomienda que el ente ambiental competente, Corporación Autónoma Regional del Cauca -CRC realice un monitoreo a las fuentes hídricas cercanas a las UPMs, además se apoyen proyectos encaminados a una minería responsable y se den garantías al minero para lograr legalizarse.

Tabla 10 muestra los criterios de lectura e interpretación del Índice de Contaminación por Minería – ICOMINERA.

Tabla 10. Recomendaciones para la aplicación de la ICOMINERA.

Resultado cualitativo del Índice de contaminación minera-ICOMINERA	Observación según sector de aplicación		
	Sector ambiental	Sector salud	Indicador de color
No hay contaminación	Sin restricciones de uso, ajustar al programa de control y monitoreo del recurso hídrico	Sin restricciones de uso para consumo humano con tratamiento previo; se permita el contacto primario sin restricciones.	

Contaminación leve	Cuerpo hídrico que debe incluirse para vigilancia especial, visitas a la zona para Identificación de usuarios y actividades, solo restricciones de uso para potabilización.	Se permite el contacto con la piel en contacto primario; vigilar si la fuente es utilizada para consumo humano y verificar que se realice el tratamiento.	
Contaminación mediana		No se permite el contacto primario; revisar el comportamiento de las enfermedades asociadas al recurso hídrico en la zona; generar la primera alerta con restricciones.	
Contaminación Alta	Restricción para todos los usos, generar alertas ambientales, iniciar procesos sancionatorios y operativos de control de las actividades que generan esta contaminación, aumentar los monitoreos de vigilancia e iniciar proceso de minimización de impactos y tratamiento de efluentes	Generar alarma sanitaria; fuente hídrica no apta para consumo humano con tratamiento; iniciar programa de vigilancia del recurso hidrobiológico asociado al sitio de contaminación.	
Contaminación muy alta			

Fuente: 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 [57].

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Los niveles de mercurio en agua encontrados en los muestreos 1 y 2 en las quebradas Tamboral y Turbina fueron $<0,0008$ mg Hg/L, los cuales se encuentran por debajo del límite máximo permisible exigido por la resolución 0631 de 2015. Sin embargo en el tercer y último muestreo realizado se encontraron concentraciones de $0,003$ mg Hg/L, valor que superó el límite máximo permisible, por lo cual se concluye que existe contaminación al recurso hídrico.

Se encontró una alta disponibilidad de los niveles de mercurio en sedimentos con valores pico de $12,15$ mg Hg/Kg para la quebrada Turbina, y de $2,41$ mg Hg/Kg quebrada Tamboral; esto indica que los niveles obtenidos no superan los estándares de calidad de suelos, establecidos en el Decreto Supremo 002-2013-MINAN de Perú, que tiene como referencia el valor permisible de 24 mg/ kg para suelo de uso comercial, industrial o extractivo.

Los parámetros fisicoquímicos permitieron demostrar los estados en los cuales se encontraron las quebradas Turbina y Tamboral. En el tercer muestreo los sólidos suspendidos de la quebrada Tamboral, sobrepasaron el límite máximo permisible según la resolución 0631 de 2015, el cual es considerado de 50 mg/L, lo que demuestra que estos valores afectan las características fisicoquímicas de la quebrada.

Las unidades productoras no cuentan con un horario fijo para realizar sus descargas, de modo que en los días donde se obtuvo mayor caudal y concentración de algunos parámetros, coinciden una mayor actividad minera aguas arriba; de ahí que parámetros como el color, turbidez, sólidos suspendidos, sólidos disueltos totales, presentaron variaciones considerables.

La variación de los caudales que presentan las quebradas Turbina y Tamboral, está relacionada con los días de producción en las plantas de beneficio, así como también a la cantidad de UPMs que descargan sus vertimientos a las quebradas; en este estudio se logró observar que las quebradas pueden actuar como auto depuradoras (exceptuando al mercurio), debido a la influencia de su caudal porque estas pueden realizar dilución de la carga contaminante. De ahí que los

vertimientos a estas quebradas, no afectan de manera significativa las condiciones fisicoquímicas de estas.

De acuerdo con las inspecciones que se realizaron y a los análisis hechos a los parámetros fisicoquímicos y niveles de mercurio obtenidos, se puede concluir que los principales efectos ambientales en la zona de estudio están determinados por los diferentes procesos, que se desarrollan en los entables. Estos procesos tales como trituración, molienda, amalgamación, entre otros, aportan cargas contaminantes, debido a que los entables no cuentan con tratamientos para las aguas resultantes de las actividades mineras.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar capacitación a los propietarios y al personal que labora en las Unidades de Producción Minera-UPM, mediante campañas informativas y educativas, las cuales deben estar orientadas a evitar la problemática ambiental y de salud, ocasionada por las practicas inadecuadas que se llevan a cabo a los procesos de beneficio del mineral (oro).

Adelantar acciones que permitan implementar la salud ocupacional: como por ejemplo: gestionar la afiliación del personal minero al sistema de seguridad social, salud. Si no es posible debido al recurso económico, al menos el propietario de la planta de beneficio podría asegurarse de que su personal cuente con seguridad social subsidiada en salud.

Se recomienda el uso de elementos de protección personal –EPP: entre ellos: casco, protectores auditivos, uso de gafas para la protección de ojos, caretas o mascararas de media cara con filtros para evitar inhalar humos tóxicos, guantes de cabritilla y calzado de seguridad.

En lo referente a la seguridad industrial se recomienda, implementar la señalización de las rutas en los lugares de labor. Además, cada planta de beneficio, debe contar con los elementos apropiados para garantizar la seguridad de los trabajadores como extinguidores ubicados en lugares propicios y botiquines.

Se sugiere hacer una investigación en plantas vegetales aledañas a los lixiviados o escorrentías provenientes de las unidades productoras, como también en suelos cercanos a la actividad extractiva, para determinar la concentración de mercurio presente en estas y su nivel de afectación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Yupari, “‘ PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN SUDAMÉRICA ’ Informe elaborado para la CEPAL , el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales , BGR , y el Servicio Nacional de Geología y Minería , SERNAGEOMIN por,” pp. 1–23, 2005.
- [2] K. H. Telmer and M. M. Veiga, “World emissions of mercury from artisanal and small scale gold mining,” in *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 131–172.
- [3] J. J. G. Rojas and Z. O. Gárate, “Biorremediación de la contaminación por mercurio en minería informal,” no. November. pp. 1–7, 2015.
- [4] European Commission, *Ambient Air Pollution by Mercury (Hg) Position paper*. Luxembourg, 2002.
- [5] “OMS | El mercurio y la salud,” WHO, 2016. [Online]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>. [Accessed: 28-Sep-2016].
- [6] C. de Colombia, *Ley 1658 / 15 de Julio de 2013. Disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y otras disposiciones*. 2013, pp. 1–9.
- [7] R. H. C. Landázury and A. M. G. Sánchez, “Overview of the gold extraction economy and regional,” vol. 23, no. 4. pp. 278–311, 2015.
- [8] L. Güiza and J. D. Aristizábal, “Mercury and gold mining in colombia: A failed state,” *Univ. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 33–49, 2013.
- [9] J. Olivero, “Efectos de la minería en colombia sobre la salud humana.” pp. 1–36, 2010.
- [10] Diaz-Arriaga, “Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano,” *Rev. Salud Pública*, vol. 16, no. 6, pp. 947–957, 2014.
- [11] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, “El uso del minería del oro artesanal y en pequeña escala.” Nairobi, Kenya, p. 1,2, 2008.
- [12] V. Santana, G. Medina, and A. Torre, “El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe,” Uruguay, 2014.
- [13] P. González, “Retos de la actividad minera en Colombia,” *ADVOCATUS*, vol. 12, no. 24, pp. 141–155, 2015.
- [14] La Administración Municipal de Suárez y la Firma Consultora Ambiental GEOSIG Ltda., “Esquema de Ordenamiento Territorial de Suárez, Cauca.”

- pp. 1–54, 2006.
- [15] “Alcaldía de Suárez, Cauca.” [Online]. Available: http://suarez-cauca.gov.co/informacion_general.shtml#economia. [Accessed: 24-May-2017].
- [16] P. Africano, “Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del Cauca,” 2006.
- [17] Ministerio de Medio Ambiente de Japón, “Enseñanzas de la Enfermedad de Minamata y el Manejo del Mercurio en Japón,” Tokio, Japón, 2012.
- [18] V. Sotero-solís and M. Alva-astudillo, “Contenido de metales pesados en agua y sedimento en el bajo Nanay,” *Cienc. Amaz.*, vol. 3, no. 1, pp. 24–32, 2013.
- [19] P. Palacios, S., Alfonso, P., Yañez, J., Higuera, “La Minería Y La Geología Ambiental: Herramientas Para El Desarrollo Sostenible,” *Dep. d’Enginyeria Minera i Recur. Nat. Univ. Politècnica Catalunya*, vol. 2, no. 978–99920, pp. 241–248, 2013.
- [20] R. P. D. & R. L. W., “PRESENCIA DE MERCURIO EN LA AMAZONÍA PERUANA, RÍO NAPO,” in *Memoria, Ambiental Encuentro, Primer Ambientales, Investigadores*, 2012, vol. 2012, pp. 1–6.
- [21] R. URRUTIA, M. YEVENES, and R. BARRA, “DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES BASALES DE METALES TRAZA EN SEDIMENTOS DE TRES LAGOS ANDINOS DE CHILE: LAGOS CHUNGARÁ, LAJA Y CASTOR,” *Boletín la Soc. Chil. Química*, vol. 47, no. 4, pp. 457–467, Dec. 2002.
- [22] S. P. Marc Costa, Pura Alfonso, “Proceso de tratamiento para la recuperación de oro en el asentamiento minero artesanal de Misky, Perú,” Departament d’Enginyeria Minera i Recursos Naturals, Universitat - Politècnica de Catalunya, 2009.
- [23] Ministerio de Minas y Energía - MME, “Producción y exportaciones de metales preciosos en Colombia 2013,” Bogotá, Colombia, 2014.
- [24] Ministerio de Minas y Energía - MME, “CensoMinero.pdf.” Bogotá, Colombia, p. 14, 2012.
- [25] Á. G. García, “Evaluación de la contaminación por vertimiento de mercurio en la zona minera, Pacarní - San Luis departamento del Huila,” *J. Technol.*, vol. 12, pp. 91–98, 2013.
- [26] P. Cogua, N. H. Campos Campos, and G. Duque, “Concentración de mercurio total y metilmercurio en sedimentos y seston de la bahía de Cartagena, Caribe colombiano,” *Boletín Investig. Mar. y Costeras*, vol. 41, no. 2, pp. 267–285, 2012.
- [27] M. Veiga, “Antioquia, Colombia: the world’s most polluted place by mercury: impressions from two field trips,” vol. 2010, no. February, pp. 1–24, 2010.
- [28] J. Olivero-Verbel, F. Young-Castro, and K. Caballero-Gallardo, “Mercurio en el distrito minero de San Martín de Loba, sur de Bolívar, Colombia,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 30, no. 1, pp. 7–13, 2014.
- [29] Ministerio de Minas y Energía, “Minería, Política y Reglamentación,” 2001.
- [30] J. Manuel and P. Angel, “Proyecto Río Suratá: propuesta de manejo

- integrado del mercurio en el proceso de amalgamación en vetas y californita (departamento de Santander, Colombia),” Santander, Colombia, 2001.
- [31] Coporacion Autónoma Regional del Cauca- CRC, “Contaminación Por Mercurio Y Otros Cauca ” Apoyo a Proyectos De Producción Más Limpia En Minería Para Los Distritos Mineros Del Cauca ” Crc,” Popayán, Cauca, 2007.
- [32] CRC- Corporacion Regional del Cauca, “Aspecto minero en el municipio de Suarez, area de influencia corregimiento de Mindala y la Toma.,” no. 1. .
- [33] F. Y. y K. C. Jesús OLIVERO, “Contaminación por mercurio en aire del distrito minero de San Martín de Loba en el departamento de Bolivar, Colombia,” *Rev. Int. Contam. Ambie*, vol. 30, no. 1, pp. 43–50, 2014.
- [34] International Institute for Environment and Development, “Minería artesanal y en pequeña escala,” in *MMSD Abriendo Brecha*, vol. Capítulo 1, 2002, pp. 431–458.
- [35] Realidad Minera, “Minería artesanal y minería de pequeña escala (MAPE).” [Online]. Available: <http://www.miningfacts.org/Comunidades/Que-es-la-mineria-artesanal-y-de-pequena-escala/>.
- [36] Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente - PNUMA and Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible-MADS, “Sinopsis Nacional de la Minería Aurífera Artesanal Y De Pequeña Escala,” Bogotá, Colombia, 2012.
- [37] Ministerio de Minas y Energía, “Glosario técnico minero,” Bogotá D.C, 2015.
- [38] gracomaq.net, “molino de martillos.” [Online]. Available: http://www.gracomaq.net/index_archivos/molinomartillos.htm.
- [39] Universidad de Buenos Aires, “Molienda,” in *Industrias I - 2015*, 2015, p. 26.
- [40] P. D. E. L. Litoral, “Ingeniero de Minas,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1999.
- [41] gama-peru.org, “Bateas para oro.” [Online]. Available: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-1.htm>.
- [42] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente- PNUMA, *Guía Práctica Commission on Geoscience for Environmental Management*. 2012.
- [43] gama-peru.org, “Canaletas.” [Online]. Available: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-2.htm>.
- [44] C. A. Patiño Pallares, “Mejoramiento del control químico analítico en la extracción metalúrgica del oro y de la plata en los laboratorios del grupo de investigación en minerales biohidrometalurgia y ambiente UIS,” Universidad Industrial de Santander, 2003.
- [45] S. L. Caidedo González, “Planteamiento De Una Tecnología De Producción Más Limpia Para El Proceso De Beneficio De Oro Sin Mercurio,” Bogotá, Colombia, 2014.
- [46] eco-sitio, “Contaminación del agua a causa de la minería,” 2009. [Online]. Available: <http://www.eco-sitio.com.ar/node/1000>.
- [47] M. C. Baldo, “Impacto ambiental en áreas afectadas por minería antigua de mercurio en el concejo de Mieres (Asturias),” 2000.
- [48] “Mercurio (Hg) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente,” *Lenntech*. [Online]. Available:


<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm#ixzz4bv0U1OMg>.
[Accessed: 21-Mar-2017].


- [49] R. Martínez, "Fraccionamiento De Suelos Contaminados Con Mercurio En El Sur De La Sierra Gorda De Querétaro, México," 2015.
- [50] J. A. Martínez and A. Uribe, "El Mercurio y la contaminación por actividad extractiva," 2015.
- [51] X. Gaona Martínez, "El Mercurio como contaminante global," 2004.
- [52] F. Muñoz and J. Delgado, "Determinación del mercurio en suelos de bucaramanga, utilizando un pirolizador acoplado a un detector de mercurio basado en espectroscopía de absorción atómica diferencial," Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [53] Tecsup virtu@I-CEPIS, "conceptos de Hidrometria. Fundamentos en el tratamiento de agua." pp. 1–20, 2016.
- [54] C. N. Sawyer, P. L. McCarty, G. F. Parkin, L. Arteaga de García, and D. A. Agudelo Quigua, *Química para ingeniería ambiental*. McGraw-Hill, 2001.
- [55] L. En and E. L. Departamento, "(Recibido enero 2013, aceptado diciembre 2013)," vol. 30, no. 1, pp. 7–13, 2014.
- [56] Dr. Jaime Camargo, "Parámetros Físicoquímicos para la Caracterización de los Residuos Líquidos," Forambiente, Bucaramanga, 1997.
- [57] I. Restrepo, "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," Universidad de Manizales, 2015.
- [58] Ministerio del Medio Ambiente, *Ley 99 De 1993*, no. 41146. 1993, p. 44.
- [59] Congreso De Colombia, *Ley 685 de 2001*, vol. 2, no. agosto 15. 2002, pp. 1–109.
- [60] Ministerio de Minas y Energía-Ministerio de Medio Ambiente, *Ley 1333 de 2009*, vol. 1. 2009, p. 19.
- [61] Ministerio de Minas y Energía, *Decreto 933 de 2013*. 1997, p. 3.
- [62] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MINAMBIENTE, *Resolucion 0631 de Marzo de 2015*. 2015, pp. 1–62.
- [63] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 1258 del 19 de Mayo de 2015 "Por la cual se adoptan los lineamientos, la guía ambiental y los terminos de referencia para las actividades de formalización de minería tradicional a que se refiere el Decreto 933 de 2013 y se toman otras determinac.* 2015, p. 112.
- [64] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MINAMBIENTE, *Decreto Unico 1076 de 2015*, vol. 1, no. 53. 2015, p. 654.
- [65] L. COBALTO, "Procedimiento Para El Muestreo De Aguas Y Sedimentos Para Determinación De Metales," 2010.
- [66] IDEAM- Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, "Guía para el moniteo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas." Bogotá, Colombia, pp. 10–15, 2002.
- [67] Lady Vargas, "Análisis de los impactos generados por la minería de oro y platino a cielo abierto sobre los recursos hídricos a partir de la cuantificación

- del consumo de agua y la carga contaminante de los vertimientos Analysis of the impacts generated by the gold and,” *Bio*, vol. 9, no. 2, pp. 1–12, 2012.
- [68] L. Loaiza, “Evaluación del riesgo ambiental por metales pesados , generados por la actividad minera artesanal en los ríos Quiroz y Chira – Piura por el método de especiación secuencial,” Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2016.
- [69] I. T. Fiñana, A. G. Cejudo, and E. Fernández, “pH y amortiguadores : Tampones fisiológicos,” Campus Universitario de Rabanales, 2001.
- [70] P. García, “Caracterización del agua recirculada y optimización de la dosificación de lechada de cal en el agua residual del ingenio Risaralda S.A.,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [71] J. Orozco, Carmen; Pérez, Antonio; Gonzáles, Ma Nieves; Rodríguez, Francisco;Alfayate, *Contaminación ambiental. Una visión desde la química - 9788497321785 - MARÍA NIEVES GONZÁLEZ DELGADO, CARMEN OROZCO BARRENETXEA, ANTONIO PÉREZ SERRANO, JOSE MARCOS ALFAYATE BLANCO, FRANCISCO J. RODRIGUEZ VIDAL - Resumen y compra del libro - paraninfo.es. .*
- [72] G. Huertas, “Efluentes mineros,” 2015. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/gracemelianiehuertasjara/efluentes-mineros>. [Accessed: 24-Mar-2017].
- [73] C. Sierra, *Calidad del agua : evaluación y diagnóstico*, Ediciones. Medellín: Universidad de Medellín, 2011.
- [74] D. Moreno and N. Montenegro, “Análisis de la calidad del agua de la quebrada Limas, localidad de ciudad Bolívar,” Universidad Distrital Francisco José de Córdas, 2016.
- [75] C. H. Rodriguez, “Sólidos suspendidos totales.” p. 9, 2015.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de análisis UTP- Universidad tecnológica de Pereira- muestreo 1.

 ACREDITADO ONAC ISO/IEC 17025:2005 10-LAB-029		VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES, INNOVACIÓN Y EXTENSION INFORME DE RESULTADOS				Código: 123-LAA-F-36 Versión: 4 Fecha: 2016-02-09 Página: 4 de 5				
INFORME DE RESULTADOS No. 1324/16										
RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					926-5	Ü expa	926-6	Ü expa	926-7	Ü expa
2016-12-02	Mercurio	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / 100 g	1,215	---	0,241	---	62,58	---
<small>Ü expa = Valorizable Esperado</small>										
RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					926-8	Ü expa	XXX-XX	Ü expa	XXX-XX	Ü expa
2016-12-02	Mercurio	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / 100 g	8,192	---	---	---	---	---
<small>Ü expa = Valorizable Esperado</small>										

 ACREDITADO ONAC ISO/IEC 17025:2005 10-LAB-029		VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES, INNOVACIÓN Y EXTENSION INFORME DE RESULTADOS				Código: 123-LAA-F-36 Versión: 4 Fecha: 2016-02-09 Página: 5 de 5				
INFORME DE RESULTADOS No. 1324/16										
RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					926-1	Ü expa	926-2	Ü expa	926-3	Ü expa
2016-10-27	Sulfatos	SM: 4500-SO ₄ ²⁻ E Turbidimétrico	---	mg SO ₄ ²⁻ / L	14	±0,5	61	±1,5	18	±0,5
2016-12-02	Mercurio	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / L	0,0037	---	0,0015	---	<0,0008	---
<small>Ü expa = Valorizable Esperado</small>										
RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					926-4	Ü expa	XXX-XX	Ü expa	XXX-XX	Ü expa
2016-10-20	DQO	SM: 5220 C Titulométrico Reflujo Cerrado	---	mg O ₂ /L	51	---	---	---	---	---
	DBO ₅	SM: 5210 Test DBO ₅	---	mg O ₂ /L	3	---	---	---	---	---
2016-10-27	Sulfatos	SM: 4500-SO ₄ ²⁻ E Turbidimétrico	---	mg SO ₄ ²⁻ / L	45	±0,3	---	---	---	---
2016-12-02	Mercurio	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / L	<0,0008	---	---	---	---	---
<small>Ü expa = Valorizable Esperado</small>										

Anexo 2. Informe de resultados de análisis UTP- Universidad tecnológica de Pereira- Muestreo 2.



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES, INNOVACIÓN Y EXTENSION

INFORME DE RESULTADOS

Código	23-LAB-108
Versión	4
Fecha	2018-02-06
Página	5 de 5

SUPLEMENTO No 1 AL INFORME DE RESULTADOS No. 1382/16

RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					1175-6	U expa	1175-7	U expa	XXX-XX	U expa
2016-12-12	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / Kg	2,5	---	1,1	---	---	---

^U expa = Incertidumbre Expa
OBSERVACIONES:



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES, INNOVACIÓN Y EXTENSION

INFORME DE RESULTADOS

Código	23-LAB-108
Versión	4
Fecha	2018-02-06
Página	3 de 5

SUPLEMENTO No 1 AL INFORME DE RESULTADOS No. 1382/16

RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					1175-1	U expa	1175-2	U expa	1175-3	U expa
2016-12-08	DQO	SM: 7720 C Titulométrico Reflujo Cerrado	---	mg O ₂ / L	< 4	---	< 4	---	< 4	---
	DBOs	SM: 5210 Test DBOs	---	mg O ₂ /L	< 2	---	< 2	---	< 2	---
	Sulfatos	SM: 4500-SO ₄ ²⁻ E Turbidimétrico	---	mg SO ₄ ²⁻ / L	22	±0,6	21	±0,6	---	---
	Alcalinidad Total	SM: 2320 B. Titulométrico	---	mg CaCO ₃ /L	15	±0,11	15	±0,11	50	±0,32
	Acidez Total	SM: 2320 B. Titulométrico	---	mg CaCO ₃ /L	---	---	---	---	2,5	---
	Sólidos suspendidos totales	SM: 2540 - D Sólidos Suspendidos Totales a 103 – 105°C	---	mg / L	---	---	---	---	15	---
2016-12-12	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / L	< 0,0008	---	< 0,0008	---	< 0,0008	---

^U expa = Incertidumbre Expa

INFORME DE RESULTADOS

SUPLEMENTO No 1 AL INFORME DE RESULTADOS No. 1382/16

RESULTADOS										
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	CÓDIGO INTERNO					
					1175-4	0 expa	1175-5	0 expa	XXX XX	0 expa
2016-12-08	DQO	SM: 7720 C Titulométrico Reflujo Cerrado	---	mg O ₂ /L	< 4	---	< 4	---	---	---
	DBOs	SM: 5210 Test DBOs	---	mg O ₂ /L	< 2	---	3	---	---	---
	Sulfatos	SM: 4500-SO ₄ ²⁻ E Turbidimétrico	---	mg SO ₄ ²⁻ /L	---	---	23	±0,6	---	---
	Alcalinidad Total	SM: 2320 B. Titulométrico	---	mg CaCO ₃ /L	59	±0,37	16	±0,12	---	---
	Acidez Total	SM: 2320 B. Titulométrico	---	mg CaCO ₃ /L	2.0	---	---	---	---	---
	Sólidos suspendidos totales	SM: 2540 - D Sólidos Suspendidos Totales a 103 - 105°C	---	mg / L	44	---	---	---	---	---
2016-12-12	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / L	< 0,0008	---	< 0,0008	---	---	---

⁰0 expa = Incertidumbre Expa

Dirección: Cra 27 No 10-02 Los Álamos – Pereira-Risaralda-Colombia- Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos Edificio 8 Piso 1 y 2.
 Teléfonos: Telefax: (57) (6) 321 5750 / 313 7437 / e-mail: labaguas@utp.edu.co

Activa

Anexo 3. Informe de resultados de análisis UTP- Universidad tecnológica de Pereira- muestreo 3.



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES, INNOVACIÓN
Y EXTENSION
INFORME DE RESULTADOS

Código	123100-006
Versión	5
Fecha	2017-02-17
Página	7 de 8

INFORME DE RESULTADOS No. 182/17

RESULTADOS						CÓDIGO INTERNO					
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	098-9	Ū expa	098-10	Ū expa	098-10	Ū expa	
					2017-02-20	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / L	<0,0008	---

RESULTADOS						CÓDIGO INTERNO					
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	098-12	Ū expa	098-13	Ū expa	XXX XX	Ū expa	
					2017-02-20	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / K	0,44	---



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES, INNOVACIÓN
Y EXTENSION
INFORME DE RESULTADOS

Código	123100-006
Versión	5
Fecha	2017-02-17
Página	7 de 8

INFORME DE RESULTADOS No. 182/17

RESULTADOS						CÓDIGO INTERNO					
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	098-9	Ū expa	098-10	Ū expa	098-10	Ū expa	
					2017-02-20	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / L	<0,0008	---

RESULTADOS						CÓDIGO INTERNO					
FECHA DEL ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO UTILIZADO:	RANGO PERMITIDO:	UNIDADES	098-12	Ū expa	098-13	Ū expa	XXX XX	Ū expa	
					2017-02-20	Mercurio Total	SM: 3112 B Espectrometría de Absorción Atómica Vapor Frío	---	mg Hg / K	0,44	---

Dirección: Cra 27 No 10-02 Los Álamos – Pereira-Risaralda-Colombia- Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos Edificio 8 Piso 1 y 2. Teléfonos: Telefax: (57) (6) 321 5750 / 313 7437 / e-mail: labaguas@utp.edu.co.

Anexo 4. Trabajo de campo, parámetros fisicoquímicos in situ.



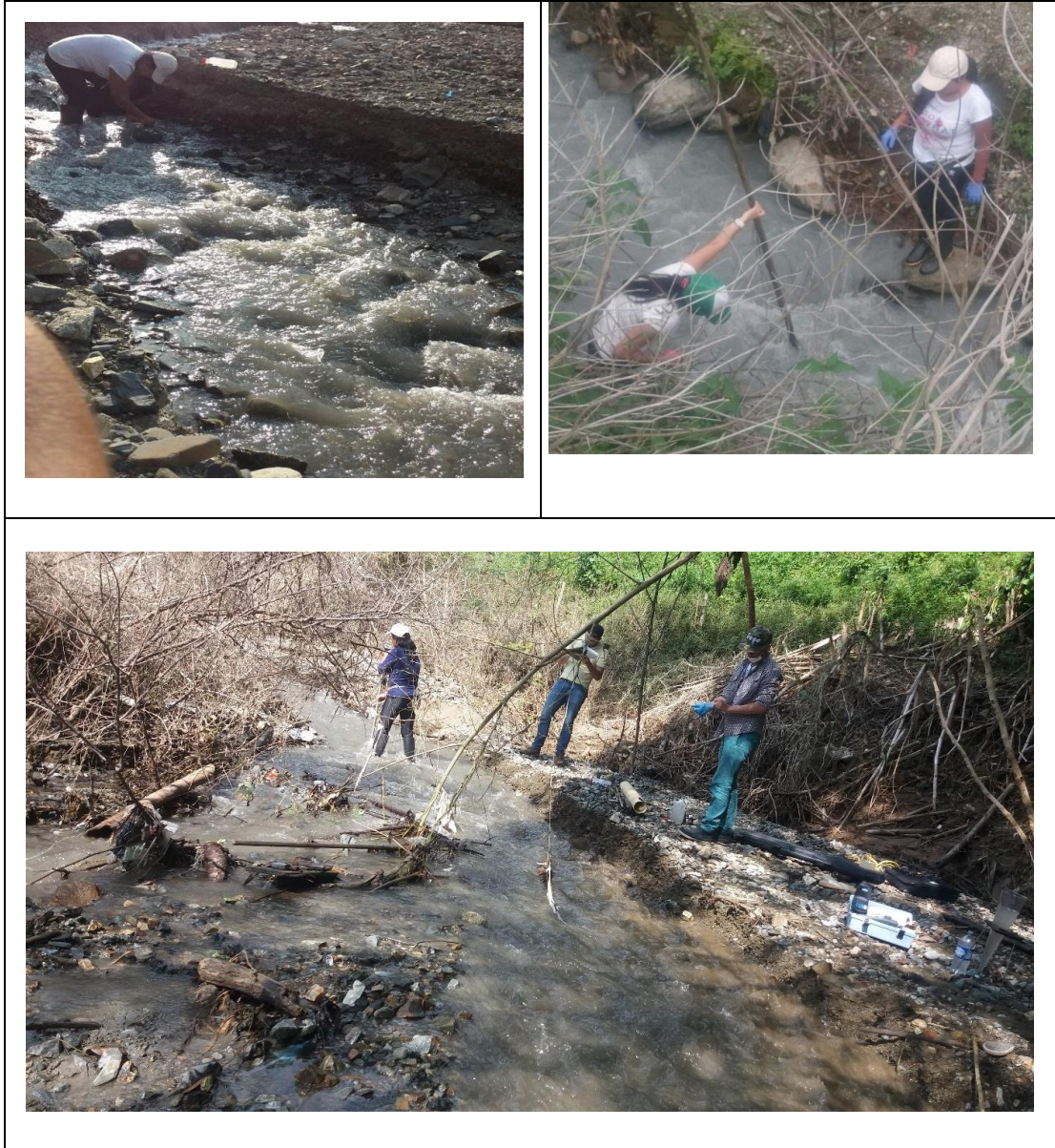
Fuente: elaboración propia.

Anexo 5. Quebrada Turbina.



Fuente: elaboración propia.

Anexo 6. Quebrada Tamboral.



Fuente: elaboración propia.

Anexo 7. Entrega de muestras UTP –Universidad Tecnológica de Pereira.



Fuente: elaboración propia.

DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE MERCURIO PRESENTE EN EL AGUA DE DOS QUEBRADAS, RECEPTORAS DE VERTIMIENTOS MINEROS QUE DESCARGAN AGUAS AL EMBALSE LA SALVAJINA, MUNICIPIO DE SUAREZ, CAUCA.

KAROL MARYELI LÓPEZ ROSERO, MELISSA ELIANA GUERRERO

Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible, Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Corporación Autónoma del Cauca.

Resumen_ El presente trabajo de investigación, tuvo como finalidad determinar los niveles de mercurio en las quebradas Turbina y Tamboral, receptoras de efluentes provenientes de la actividad minera de oro, en el municipio de Suarez Cauca. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira, para su respectivo análisis.

Se evaluaron parámetros fisicoquímicos como: pH, temperatura, turbidez conductividad, sólidos disueltos totales, color, sólidos sedimentables, caudal, DQO, DBO₅, alcalinidad total, sólidos suspendidos totales y acidez total. Se estimó la concentración de mercurio en sedimentos y en aguas para analizar la presencia del metal tóxico en el ecosistema.

Posteriormente estos resultados fueron comparados con la normatividad establecida en la Resolución 0631 de 2015, con la intención de analizar la afectación de las quebradas a causa de las descargas de las UPM- unidades productoras mineras.

En la determinación de mercurio en aguas se obtuvo unos niveles de <0,0008 mg Hg/L para los muestreos 1 y 2 en las quebradas Turbina y Tamboral, para el último muestreo se registró un valor de 0,003mg Hg/L en ambas quebradas; mientras que para

los sedimentos se obtuvo la máxima concentración de 12,15 mg Hg/Kg en la quebrada Turbina y 2,41 mg Hg/Kg en la quebrada Tamboral, lo que indica, que el mercurio presenta más afinidad de fijarse en la materia orgánica que está fija en el suelo, donde el metal se adhiere al material particulado o en suspensión, así mismo, para los sólidos suspendidos en un punto de muestreo para la quebrada Tamboral sobrepasa el límite permisible con 60 mg/L. No obstante la variación de los parámetros fisicoquímicos analizados es poco significativa para los efluentes, debido a la influencia de las quebradas, por ser caudalosas y actuar como autodepuradoras.

Palabras claves: *amalgamación, ganga, mena, mercurio, minería artesanal de pequeña escala, plantas de beneficio, relaves, vertimientos.*

Abstract_ The purpose of this research was to determine the amount of mercury in the Turbina and Tamboral streams, receiving effluents from the gold mining activity, in the municipality of Suarez Cauca. The samples were sent to the laboratory of water and food of the technological university of Pereira, for their respective analysis.

There were evaluated physicochemical parameters such as: pH, temperature, turbidity, total dissolved solids, color, sedimentable solids, flow rate, COD,

DBO₅, total alkalinity, total suspended solids and total acidity. Was estimated the concentration of mercury in sediments and in water to analyze the presence of the toxic metal in the ecosystem.

Later these results were compared with the normativity established in the resolution 0631 of 2015 with the intention of analyzing the impact of the streams to Because of the discharges of the PMU-producing mining units

In the determination of mercury in waters, levels of <0.0008 mg Hg / L were obtained for samples 1 and 2 in the Turbina and Tamboral streams, for the last sampling a value of 0.003 mg Hg / L was recorded in both streams ; While for the sediments the maximum concentration of 12.15 mg Hg / kg was obtained in the Turbine stream and 2.41 mg Hg / Kg in the Tamboral stream indicating that the mercury has more affinity to be fixed in the organic matter that is fixed in the soil, where the metal adheres to the particulate material Or in suspension, also for suspended solids at a sampling point for Tamboral stream exceeds the permissible limit with 60 mg / L. Notwithstanding the variation of the physicochemical parameters analyzed, is not very significant for the effluents, due to the influence of the streams, for being abundant and to act like purifying.

Keywords *_amalgamation, gangue, ore, mercury, small scale artisanal mining, profit plants, tailings, dumping.*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los mercados internacionales de minerales como el oro dan condiciones económicas favorables, lo que propende al incremento exponencial de la

explotación formal e informal de estos minerales en Colombia. Pero es la minería de tipo informal la que genera mayor preocupación, debido al uso descontrolado de insumos químicos.

A la minería de tipo informal se le asocia una serie de pasivos ambientales, debido a que este tipo de minería se está practicando sin estudios previos y sin los parámetros técnicos y ambientales, carentes en muchos casos de esquemas mínimos de seguridad. Estas condiciones propician el uso inadecuado de los recursos mineros, y pasivos ambientales tales como: la contaminación de las aguas, procesos erosivos, la destrucción de la fauna y flora y afectación de los ecosistemas en general [1].

La utilización de mercurio es una práctica común en la minería de oro, dada por la facilidad y rapidez que implica su aplicación [2]. El principal método de uso del mercurio en la minería informal es mediante la amalgamación, un proceso que involucra la mezcla del metal con arenas auríferas para formar un producto que es recuperado a manera de un botón metálico. Posteriormente, el “botón” de oro-mercurio es sometido a calor para vaporizar el mercurio y dejar el metal precioso en el fondo del recipiente [3].

El departamento del Cauca, es una zona que por su amplia potencialidad de recursos naturales, se ha convertido en un factor importante para el desarrollo económico, pues a través de la creciente expansión minera aurífera se brindan oportunidades de empleo, sostenimiento y crecimiento del comercio entorno a ella. El municipio de Suarez, seleccionado para este estudio y perteneciente al departamento en mención, se caracteriza por poseer actividad minera artesanal, donde se

emplean diversos métodos y técnicas para el proceso de beneficio y concentración del oro explotado, el cual presenta diferentes niveles de afectación ambiental dependiendo de la capacidad de proceso instalada.

Se debe prestar especial atención a la contaminación del recurso hídrico, ya que el mercurio termina asociado a los efluentes de los entables o plantas de beneficio y concentración, pudiendo contaminar aguas superficiales por derrames directos, escorrentía o acumulación y/o aguas subterráneas por infiltración. De modo que este trabajo tuvo como finalidad determinar la presencia de mercurio en dos quebradas, receptoras de vertimientos provenientes de la actividad minera de oro desarrollada en el Municipio de Suarez, Cauca; con la intención de contribuir en la generación de nuevo conocimiento acerca de la situación general que se desarrolla en torno a la explotación minera de oro y al uso de sustancias que ponen en riesgo la salud humana, los recursos naturales renovables y el medio ambiente.

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló a través de las siguientes etapas, con la ejecución de diferentes actividades.

Etapas 1. Revisión bibliográfica

Para el desarrollo de este proyecto, fue necesario realizar una revisión bibliográfica, a fin de determinar los niveles de mercurio en agua, de vertimientos provenientes de las UPM. Para ello la búsqueda se centró en conocer los impactos generados por la actividad minera de oro, principalmente

por el uso inadecuado de mercurio; identificando los procesos que se desarrollan dentro de las UPM; estudios previos que confirmen a nivel global, regional y local los niveles de mercurio encontrados en diferentes zonas y que ponen en riesgo el ambiente y la salud de los seres vivos.

Etapas 2. Acercamiento

Se realizó una visita previa, a fin de obtener el aval para el desarrollo del proyecto en el municipio de Suárez, Cauca, e igualmente involucrar a los propietarios de las unidades de producción minera- UPM y el personal que labora en estas.

Etapas 3. Reconocimiento de campo.

En esta etapa, se llevó a cabo una segunda visita, con el propósito de realizar el reconocimiento de las zonas a intervenir. El recorrido se desarrolló en lancha sobre el embalse de la Salvajina para identificar los dos cuerpos de agua a estudiar, donde posiblemente estos estén recibiendo vertimientos provenientes de las UPM; se visitó cada una de las quebradas con el interés de conocer la afectación producida por los vertimientos de la actividad minera de oro, además fue necesario hacer un recorrido aguas arriba del vertimiento con el objetivo de identificar las UPM que descargan sus vertimientos a los cuerpos de agua seleccionados.

Etapas 4. Recolección de muestras.

Al finalizar la tercera etapa, y con base en la información recolectada, se llevó a cabo las visitas para la recolección y toma de muestras en los dos cuerpos de

agua seleccionados. Para efectos del proyecto, se realizaron tres días de muestreo, cada uno en diferentes meses: 19 de octubre, 05 de diciembre de 2016 y 02 de febrero de 2017. Para cada muestreo se recolectaron 3 muestras de agua y una de sedimentos en cada cuerpo de agua a evaluar. En total se recolectaron 8 muestras para los efluentes estudiados; en la tabla 1, se indican los parámetros fisicoquímicos tomados in situ, y en la tabla 2, los parámetros analizados en el Laboratorio de Aguas y Alimentos perteneciente a la Universidad Tecnológica de Pereira-UTP, la zona de influencia fue aguas abajo de las quebradas en el punto de descarga al embalse la Salvajina.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos in situ.

Equipos	Parámetro a medir
GPS Garmin Modelo Etrex 30	Coordenadas- altitud
Peachímetro Medidor De pH Resistente Al Agua / Schott 850	pH
Turbidímetro 2100Q	Turbiedad
Sonda paramétrica. Medidor portátil multiparamétrico de calidad de agua. HQD HACH	Conductividad TDS Temperatura
Espectrofotómetro DR 2700	Color
Cono imhoff (gravimétrico)	Sólidos sedimentables

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros analizados en el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la UTP.

Método	Parámetro
Espectrofotometría de absorción atómica vapor frío	Mercurio en agua
Espectrofotometría de absorción atómica vapor frío	Mercurio en sedimentos
SM: 7720C Titulométrico reflujo cerrado	DQO
SM: 5210 Test DBO ₅	DBO ₅
SM: 2320 B. Titulométrico	Alcalinidad
SM: 2320 B. Titulométrico	Acidez
SM: 2540 – D SST a 103 – 105 °C	Sólidos suspendidos

Fuente: elaboración propia.

Todas las muestras se recolectaron en recipientes plásticos de 1 L, excepto la de mercurio en sedimentos. Las muestras de sedimentos se recolectaron en bolsas de sellado hermético, este procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a lo estipulado en la guía del IDEAM para metales pesados en agua y sedimentos [4].

Las muestras de mercurio en agua se preservaron con una solución de ácido nítrico (HNO₃) al 65% hasta pH 2 y se refrigeró a una temperatura de 4°C.

Finalmente, la recolección de los datos se realizó a través de tablas que fueron elaborados de acuerdo a las necesidades del proyecto. También, cada punto de muestreo fue georreferenciado, con la ayuda de un GPS.

Etapas 5. Análisis y resultados.

Una vez obtenidos los resultados, la información fue tabulada y registrada. Se realizó la cartografía de la zona de estudio, para ello se implementó el programa SIG- Sistema de Información Geográfico; este permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica.

Los resultados de parámetros fisicoquímicos obtenidos fueron comparados con los valores permisibles estipulados en el decreto 0631 de 2015 y el Decreto Supremo 002-2013-MINAN de Perú para los niveles de mercurio en sedimentos.

Etapas 6. Entrega de resultados.

Finalmente, con la información ya organizada, se elaboró el informe final de trabajo de grado y se realizó la socialización de los resultados con los actores mineros involucrados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados y los análisis de los parámetros fisicoquímicos recolectados en los cuerpos de agua objeto de estudio. Es importante destacar, que los parámetros fisicoquímicos y los niveles de mercurio en agua fueron comparados con base a la Resolución 0631 de 2015, también se utilizó el Decreto Supremo 002-2013 de Perú, para comparar con los niveles de mercurio en sedimentos.

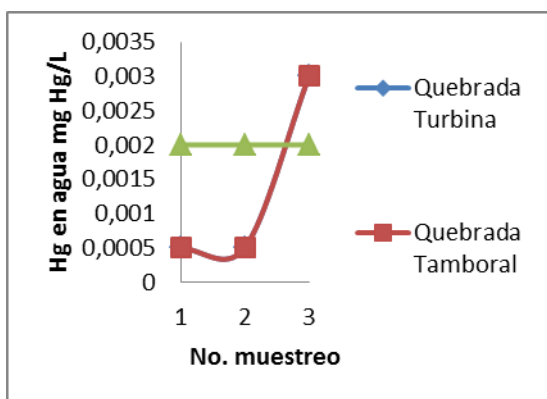
En la tabla 3 se registran los resultados obtenidos para los parámetros evaluados en esta investigación

Tabla 3. Resultados de los parámetros analizados en las Quebradas Turbina y Tamboral.

		PRIMER MUESTREO		SEGUNDO MUESTREO		TERCER MUESTREO	
FECHA DE MUESTREO (DD/MM/AAAA)		19/10/2016		05/12/2016		02/02/2017	
NOMBRE PUNTO DE MUESTREO		Quebrada Turbina	Quebrada Tamboral	Quebrada Turbina	Quebrada Tamboral	Quebrada Turbina	Quebrada Tamboral
DEPARTAMENTO:							
MUNICIPIO:							
ÁREA OPERATIVA:							
Cauca							
Suarez							
Embalse Salvajina							
PARÁMETROS A MEDIR EN CAMPO		PROMEDIO					
PARÁMETRO	UNIDADES						
pH	unidades	8,34	7,08	8,24	7,58	8,56	7,73
Temperatura	°C	23,93	21,50	20,37	19,07	21,60	19,40
Turbidez	NTU	9,09	2,95	7,45	31,23	16,83	224,33
Conductividad	µs/cm	203,67	314,00	156,90	174,33	172,80	130,63
SDT	mg/L	137,15	221,87	111,80	128,27	120,03	115,35
Color	Pt Co	51,33	fuera rango	81,33	180,67	159,67	457,33
Sólidos sedimentables	mg/L	0,50	0,60	<0,10	1,00	<0,10	1,0
Caudal	m³/seg	0,003	0,005	0,113	0,446	0,035	0,254
PARÁMETROS: LABORATORIO UTP							
Hg en agua	mg Hg/L	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	0,003	0,003
Hg en sedimentos	mg Hg/ kg	12,15	2,41	1,1	2,1	0,32	0,44
DQO	mgO ₂ /L	27	51	<4	<4	11	32
DBO ₅	mgO ₂ /L	<2,0	3	<2	<2	<2,0	<2,0
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	60	80	50	59	60	59
SST	mg/L	-	-	15	44	60	764
Acidez total	mg CaCO ₃ /L	-	-	2,5	2	2	2,7

Fuente: elaboración propia.

Análisis de mercurio en agua



Gráfica. 1 Valores de mercurio en agua.

A través de la gráfica 1, expuesta anteriormente, se puede indicar que a pesar de que en ambas quebradas se presentan niveles de mercurio inferiores a lo que estipula la resolución 0631 de 2015, en los muestreos uno y dos; estas presentan una importante variabilidad en el muestreo tres debido a que después de encontrarse en $<0,0008$ mg/L, logra superar el límite máximo permisible de 0,002 mg/L, hasta llegar a una concentración de 0,003 mg/L.

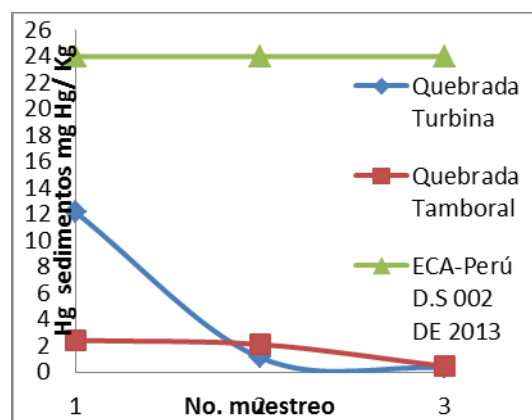
Las bajas concentraciones de mercurio en la columna de agua de los efluentes, se podría asociar a que en ocasiones las velocidades del agua en las quebradas es bastante notable, y por ende se genera un arrastre del material permitiendo la no permanencia del metal durante extensos periodos de tiempo.

En los muestreos uno y dos los valores son menores a cero y esto puede deberse a que probablemente

se presentó una precipitación de este metal debido a la presencia de sulfuros, los cuales están presentes en la materia prima, esto basado en estudios de la CRC de la composición mineralógica de la mena, en el municipio de Suarez, donde se encontró, que gran parte de la roca presenta compuestos de pirita, esfarelita, calcopirita, arsenopirita y pirrotina [16].

Igualmente puede argumentarse que debido a que en los muestreos uno y dos no se evidencio un aumento importante de caudal originado por vertimientos propios del beneficio de oro, esto podría repercutir en el bajo nivel de mercurio, que difiere del muestreo tres debido a que en este si se presenció una descarga considerablemente alta por efectos de vertimientos líquidos mineros.

Análisis de mercurio en sedimentos.



Gráfica 2. Valores de mercurio en sedimentos.

Con base a la Gráfica 5 anteriormente expuesta, se evidencia que existe una variación de los valores de Hg en sedimentos, que

puede estar ligada a la movilidad que presenta este metal en los ecosistemas a los cuales ingresa, debido a que la mayor parte del mercurio que se incorpora a las quebradas objeto de estudio, se moviliza en el material suspendido y es arrastrado por las corrientes del cauce; posteriormente, este se sedimenta porque el mercurio no es soluble en agua.

Debido a que en Colombia no existe actualmente una norma que estipule los niveles máximos permisibles de mercurio en suelo, originado por actividades mineras, se consideró una norma internacional que fue el Decreto supremo No. 002-2013-MINAN de Perú; el periodo de eliminación del mercurio en Perú no es tan antiguo como en países como EE.UU y por ende los niveles son más considerados para una nación como Colombia, que solo en poco tiempo inicia la erradicación de uso de este metal en minería.

A partir de este decreto se tiene como referencia el valor permisible de 24 mg/ kg para suelo de uso comercial, industrial o extractivo, y en este estudio se constata que los valores de mercurio en sedimentos de las quebradas Tamboral y Turbina no superan los estándares de calidad ambiental para el uso del suelo.

Al encontrar niveles de mercurio en los sedimentos de las quebradas objeto de estudio, se demuestra que los sedimentos pueden actuar como portadores de fuentes de contaminación, puesto que los metales pesados pueden ser

liberados a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales [68]. Esta situación genera preocupación pues indica que hay una afectación al ecosistema y por ende puede traer consecuencias negativas para la biota acuática y la vida de las personas.

Análisis de los parámetros físicoquímicos

Con base a la tabla 3, se puede apreciar que los valores obtenidos para pH, presentan variabilidad, debido a las diferencias en la actividad productiva de las plantas de beneficio y los valores de caudal. Esto se rectifica en el hecho de que la quebrada más caudalosa tiene una capacidad de dilución mayor, porque al comparar la Quebrada Tamboral con la Quebrada Turbina, en la primera se evidencian menores unidades de pH. Teniendo en cuenta los valores de pH expuestos en la tabla 3 y los valores máximos permisibles que menciona la Resolución 0631 de 2015, se observó que los resultados están dentro del rango que estipula la norma. Para la Quebrada Turbina los valores oscilan entre 8 y 8,5 unidades, mientras que para la Quebrada Tamboral los valores se encuentran entre 7 y 7,7, esto indica que las dos Quebradas cumplen con el criterio de la normatividad.

Los resultados de la investigación, de temperatura para ambas Quebradas se encuentran dentro del valor límite máximo permisible (40°C) establecido en la resolución 0631 de 2015. Además se puede apreciar que

los valores de temperatura para las Quebradas fluctúan debido a las variables, tales como: época del año, caudal, la espesura o boscosidad en que se encuentra la zona de estudio. Se podría decir entonces, que las condiciones físicas de temperatura de los efluentes mencionados, no se está alterando con el proceso que se lleva a cabo en la actividad minera, pues al estar dentro del rango permisible, no afecta las condiciones y hacen que sean aptas para la supervivencia de la biota acuática.

En relación con los valores de sólidos obtenidos en este estudio, se encontró que la conductividad eléctrica está estrechamente relacionada con los sólidos disueltos totales SDT, pues cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad; es decir una relación directamente proporcional. Lo anterior se hace evidente en los valores registrados para este estudio, pues de acuerdo con la tabla 3 para la Quebrada Turbina el valor más alto de conductividad fue de 203,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los SDT fueron de 137,15 mg/L; así mismo, para la Quebrada Tamboral el valor de conductividad corresponde a 314 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los SDT registrados fueron de 221,87 mg/L. Mientras tanto los valores registrados para los sólidos sedimentables para la quebrada Tamboral fueron de 0,60 mg/L, 1,00 mg/L, y 1,00mg/L, los cuales fueron mayores a la quebrada Turbina; esto se debe a que en este sector de la vereda Tamboral hay un mayor número de entables mineros, por ende se presenta una mayor producción, y a su vez mayor número

de puntos de vertimientos de agua residual.

No obstante, para para el segundo muestreo, los valores obtenidos para sólidos suspendidos fueron de 15 mg/L para la quebrada Turbina y 44 mg/L para la quebrada Tamboral. En el tercer muestreo, los valores registrados fueron de 60 y 764 mg/L para la quebrada Turbina y Tamboral, respectivamente. Es de apreciar que los valores obtenidos para el segundo muestreo, no sobrepasan el límite máximo permisible establecido por la resolución 0631 de 2015, en contraste con los registrados para el tercer muestreo, que sí superan el límite máximo.

Por otra parte en la tabla 3, se puede apreciar los valores obtenidos para caudal, en el primer muestreo los valores para las dos quebradas se encuentran en un rango de 0,000 a 0,010 m^3/seg , esto se relaciona con las características del clima de la zona, pues las condiciones encontradas coinciden con una época de verano, en el segundo muestreo los valores registrados se encuentran 0,100 a 0,450 m^3/seg , que al compararlos con respecto al primer muestreo se aprecia un aumento en los valores de caudal de las quebradas, esto se podría asociar al aporte de caudal generado por los vertimientos de las UPM, así como también, posiblemente a un aumento de las precipitaciones. Por último en el tercer muestreo, los valores tienden a disminuir, pero siguen siendo altos con respecto al primer muestreo; para la Quebrada Turbina el valor es de 0,035 m^3/seg y para la

Quebrada Tamboral es de 0,254 m³/seg. Las variaciones de caudal están relacionadas directamente con los períodos de producción dentro de las plantas de beneficio ubicadas aguas arriba de las Quebradas Turbina y Tamboral, así como también, con la cantidad de UPM-unidades productoras mineras que descargan sus vertimientos a las quebradas.

4. CONCLUSIONES

Los niveles de mercurio en agua encontrados en los muestreos 1 y 2 en las quebradas Tamboral y Turbina fueron <0,0008 mg Hg/L, los cuales se encuentra por debajo del límite máximo permisible exigido por la resolución 0631 de 2015. Sin embargo en el tercer y último muestreo realizado se encontraron concentraciones de 0,003 mg Hg/L, valor que superó el límite máximo permisible, por lo cual se concluye que existe contaminación al recurso hídrico.

Se encontró una alta disponibilidad de los niveles de mercurio en sedimentos con valores pico de 12,15 mg Hg/Kg para la quebrada Turbina, y de 2,41 mg Hg/Kg quebrada Tamboral; esto indica que los niveles obtenidos no superan los estándares de calidad de suelos, establecidos en el Decreto Supremo 002-2013-MINAN de Perú, que tiene como referencia el valor permisible de 24 mg/ kg para suelo de uso comercial, industrial o extractivo.

Los parámetros fisicoquímicos permitieron demostrar los estados en

los cuales se encontraron las quebradas Turbina y Tamboral. En el tercer muestreo los sólidos suspendidos de la quebrada Tamboral, sobrepasaron el límite máximo permisible según la resolución 0631 de 2015, el cual es considerado de 50 mg/L, lo que demuestra que estos valores afectan las características fisicoquímicas de la quebrada.

Las unidades productoras no cuentan con un horario fijo para realizar sus descargas, de modo que en los días donde se obtuvo mayor caudal y concentración de algunos parámetros, coinciden una mayor actividad minera aguas arriba; de ahí que parámetros como el color, turbidez, sólidos suspendidos, sólidos disueltos totales, presentaron variaciones considerables.

La variación de los caudales que presentan las quebradas Turbina y Tamboral, está relacionada con los días de producción en las plantas de beneficio, así como también a la cantidad de UPMs que descargan sus vertimientos a las quebradas; en este estudio se logró observar que las quebradas pueden actuar como auto depuradoras (exceptuando al mercurio), debido a la influencia de su caudal porque estas pueden realizar dilución de la carga contaminante. De ahí que los vertimientos a estas quebradas, no afectan de manera significativa las condiciones fisicoquímicas de estas.

De acuerdo con las inspecciones que se realizaron y a los análisis hechos a los parámetros fisicoquímicos y

niveles de mercurio obtenidos, se puede concluir que los principales efectos ambientales en la zona de estudio están determinados por los diferentes procesos, que se desarrollan en los entables. Estos procesos tales como trituración, molienda, amalgamación, entre otros, aportan cargas contaminantes, debido a que los entables no cuentan con tratamientos para las aguas resultantes de las actividades mineras.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Yupari, “ PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN SUDAMÉRICA ’ Informe elaborado para la CEPAL , el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales , BGR , y el Servicio Nacional de Geología y Minería , SERNAGEOMIN por,” pp. 1–23, 2005.
- [2] K. H. Telmer and M. M. Veiga, “World emissions of mercury from artisanal and small scale gold mining,” in *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 131–172.
- [3] J. J. G. Rojas and Z. O. Gárate, “Biorremediación de la contaminación por mercurio en minería informal,” no. November. pp. 1–7, 2015.
- [4] European Commission, *Ambient Air Pollution by Mercury (Hg) Position paper*. Luxembourg, 2002.
- [5] P. Africano, “Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del Cauca,” 2006.
- [6] L. Loaiza, “Evaluación del riesgo ambiental por metales pesados , generados por la actividad minera artesanal en los ríos Quiroz y Chira – Piura por el método de especiación secuencial,” Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2016.

