



Alternativas de mejoramiento en el tratamiento del vertimiento minero a partir de la revisión de información de variables físico - químicas en la mina El Silencio, empresa Aris Mining, Segovia, 2019-2022.

Sirley Johana Serna Betancur

Trabajo de grado para optar al título de Administrador Ambiental y Sanitario.

Asesores

Margarita Maria Pérez Osorno

Fernando León Guzmán Duque

Universidad de Antioquia

Facultad Nacional de Salud Pública

Administración Ambiental y Sanitaria

Distrito Minero Segovia-Remedios

2023

---

Cita	Serna Betancur (1)
<b>Referencia</b>	(1) Serna Betancur SJ. Alternativas de mejoramiento en el tratamiento del vertimiento minero a partir de la revisión de información de variables físico - químicas en la mina El Silencio, empresa Aris Mining, Segovia, 2019-2022. [Pregrado]. Distrito Minero Segovia - Remedios Universidad de Antioquia; 2023.
<b>Estilo Vancouver/ICMJE (2018)</b>	

---



Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/director:** José Pablo Escobar Vasco/Diana Marcela Soto Castrillón.

**Jefe departamento:** Mónica Lucía Jaramillo Gallego

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

A Dios, por guiarme y brindarme la fortaleza para alcanzar este importante logro en mi vida académica, profesional y personal.

A mi familia y amigos, por su inquebrantable apoyo y aliento incondicional en cada etapa de este emocionante camino. Sus palabras de aliento fueron mi motor y motivación constante.

A la empresa Aris Mining Segovia, por confiar en mí y brindarme la invaluable oportunidad de llevar a cabo este proyecto en la mina El Silencio. Su apoyo y recursos fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de esta investigación.

A mis asesores de trabajo de grados, Margarita María Pérez y Fernando León Guzmán, por su valioso aporte, orientación y acompañamiento durante todo el proceso. Su sabiduría y experiencia fueron claves para una exitosa culminación.

Agradezco de manera especial a los evaluadores, Santiago Erazo y Jose Jairo Barrera, por dedicar su tiempo y conocimientos en la revisión de este proyecto. Sus comentarios constructivos y sugerencias contribuyeron significativamente a mejorar la calidad y relevancia de esta investigación.

Y por último extender mi gratitud a todos aquellos que, de una u otra manera, estuvieron presentes en mi vida durante todo este proceso. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi formación académica y profesional.

## **Dedicatoria**

Dedico este logro a Dios por no soltar mi mano y brindarme las fuerzas necesarias para avanzar y culminar de manera satisfactoria este emocionante camino que he recorrido. Su guía y protección han sido fundamentales en cada paso que he dado

A mis amados padres Rodrigo Serna y Luz Dari Betancur y hermanos Elizabeth Serna y John Fredy Serna por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y motivación constante; han sido mi mayor fortaleza. Sin importar los desafíos que se presentaron en el camino, siempre estuvieron allí para levantarme cuando tropecé y celebraron mis triunfos con orgullo. No podría haber llegado hasta aquí sin su aliento y compañía.

Gracias por ser parte de este viaje, su presencia ha hecho que cada momento sea significativo y especial. ¡Este logro también es de ustedes!



## Tabla de contenido

Lista de tablas .....	8
Lista de figuras .....	9
Abreviaturas .....	11
Resumen .....	12
1. Introducción .....	14
2. Planteamiento del problema .....	16
2.1. Antecedentes .....	16
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	16
2.1.2. Antecedentes Nacionales .....	18
2.1.3. Antecedentes Locales.....	20
2.2. Descripción del problema .....	22
2.3. Pregunta de investigación. ....	23
3. Justificación .....	24
4. Objetivos .....	26
4.1. Objetivo general .....	26
4.2. Objetivos específicos.....	26
5. Hipótesis .....	27
6. Marcos de referencia .....	28
6.1. Marco teórico conceptual .....	28
6.2. Marco legal.....	31
6.3. Marco geográfico o territorial .....	32

---

6.4. Marco Institucional.....	35
7. Aspectos éticos.....	37
8. Metodología .....	38
8.1. Tipo de estudio.....	38
8.2. Universo .....	38
8.3. Muestreo .....	38
8.4. Muestra .....	38
8.5. Criterios de inclusión y/o exclusión.....	39
8.6. Técnicas e instrumentos para la recolección de información .....	39
8.7. Operacionalización de las variables .....	42
8.8. Procedimiento para el logro de los objetivos .....	43
9. Resultados .....	45
9.1. Objetivo #1. ....	45
9.1.1. Procesos mineros .....	45
9.1.2. Tratamiento implementado en la mina El Silencio en el proceso de exploración y extracción.....	50
9.2. Objetivo #2. ....	56
9.2.1. Información externa mina El Silencio.....	57
9.2.2. Información interna Mina El Silencio.....	77
9.3. Objetivo #3 .....	83
9.3.1. Precipitación química.....	86
9.3.2. Neutralización de pH.....	88
9.3.3. Tratamiento con coagulante y floculante. ....	89
9.3.4. Tratamiento con zeolitas.....	91
9.3.5. Tratamiento con ósmosis inversa .....	95

10.	Análisis de resultados y Discusión.....	97
11.	Conclusiones .....	105
12.	Recomendaciones .....	108
13.	Referencias bibliográficas.....	110
14.	Anexos.....	118

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Normatividad ambiental.....	31
<b>Tabla 2.</b> Técnicas de la línea estratégica 2 del Plan de Desarrollo Municipio de Segovia 2020-2023. ....	34
<b>Tabla 3.</b> Formato de descripción de fases del tratamiento.....	39
<b>Tabla 4.</b> Guía de recolección de datos externos para análisis de información.....	40
<b>Tabla 5.</b> Guía de recolección de datos internos .....	41
<b>Tabla 6.</b> Variables y método para análisis de resultados .....	42
<b>Tabla 7.</b> Información del sistema de bombeo.....	53
<b>Tabla 8.</b> Cronograma limpieza de depósitos de agua de la mina El Silencio .....	54
<b>Tabla 9.</b> Datos externos consolidados. ....	58
<b>Tabla 10.</b> Datos internos consolidados .....	78
<b>Tabla 11.</b> Resumen resultados análisis internos pH y SST .....	79
<b>Tabla 12.</b> Resultados análisis muestras puntuales en tanques interior mina .....	82
<b>Tabla 13.</b> Solubilidad de metales en agua. ....	84

---

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> Mapa del municipio de Segovia Antioquia .....	34
<b>Figura 2.</b> Título Minero AMS, RPP 140 ÑemeÑeme .....	36
<b>Figura 3.</b> Flujograma de proceso de recolección y entrega de proyecto. ....	44
<b>Figura 4.</b> Esquema proceso de exploración.....	47
<b>Figura 5.</b> Esquema proceso de extracción.....	48
<b>Figura 6.</b> Esquema de proceso de beneficio.....	49
<b>Figura 7.</b> Unifilar mina El Silencio .....	55
<b>Figura 8.</b> Potencial de Hidrógeno (pH) – Análisis externo. ....	59
<b>Figura 9.</b> Demanda Química de Oxígeno .....	60
<b>Figura 10.</b> Demanda Bioquímica de Oxígeno .....	60
<b>Figura 11.</b> Sólidos Suspendidos Totales – Análisis externo .....	61
<b>Figura 12.</b> Sólidos Sedimentables – Análisis externo. ....	62
<b>Figura 13.</b> Grasas y Aceites.....	63
<b>Figura 14.</b> Fenoles Totales .....	64
<b>Figura 15.</b> Cloruros .....	66
<b>Figura 16.</b> Sulfatos.....	67
<b>Figura 17.</b> Sulfuros .....	67
<b>Figura 18.</b> Arsénico.....	68
<b>Figura 19.</b> Cadmio .....	69
<b>Figura 20.</b> Cinc .....	70
<b>Figura 21.</b> Cobre.....	71
<b>Figura 22.</b> Cromo.....	71
<b>Figura 23.</b> Hierro.....	72
<b>Figura 24.</b> Níquel .....	73
<b>Figura 25.</b> Plomo .....	74
<b>Figura 26.</b> Acidez Total y Alcalinidad Total.....	75
<b>Figura 27.</b> Dureza Cálcica y Dureza Total .....	76
<b>Figura 28.</b> Potencial de Hidrógeno (pH) – Análisis interno. ....	80
<b>Figura 29.</b> Sólidos Suspendidos Totales – Análisis interno .....	80

<b>Figura 30.</b> Proceso de precipitación química .....	87
<b>Figura 31.</b> proceso de neutralización.....	89
<b>Figura 32.</b> Proceso de tratamiento con coagulante y floculante .....	91
<b>Figura 33.</b> Proceso de tratamiento con zeolitas.....	94
<b>Figura 34.</b> Proceso físico químico con zeolitas.....	94
<b>Figura 35.</b> Proceso de tratamiento con ósmosis inversa .....	96
<b>Figura 36.</b> Acuerdo de confidencialidad.....	118
<b>Figura 37.</b> Registro fotográfico - Reconocimiento sistema de tratamiento de ARnD mina El Silencio.....	122

### **Abreviaturas**

- **LMP:** Límite Máximo Permisible
- **ARnD:** Aguas Residuales no Domésticas
- **DMSR:** Distrito Minero Segovia – Remedios
- **RPP:** Registro de Propiedad Privada
- **SST:** Sólidos Suspendidos Totales
- **SSED:** Sólidos sedimentables.
- **pH:** Potencial de Hidrógeno
- **AMS:** Aris Mining Segovia
- **GPM ó g/m:** Galones Por Minuto
- **HP:** Horsepower (caballos de fuerza)
- **KW:** Kilovatios
- **m s.n.m:** metros sobre el nivel del mar
- **Analquim:** Laboratorio, Análisis químico.
- **PDT:** Posdata

## Resumen

Este proyecto se llevó a cabo con objetivo de presentar alternativas para mejorar el sistema de tratamiento de ARnD generado en los procesos de exploración y extracción en la Mina El Silencio, perteneciente a la empresa Aris Mining Segovia. La investigación se dividió en tres etapas. En primer lugar, se realizó un recorrido para identificar las fases del tratamiento actualmente implementado en la mina, encontrando diferentes falencias como la construcción no planificada de los mismos. En segundo lugar, se revisó y consolidó la información de los resultados de los monitoreos internos y externos realizados durante el período 2019-2022 en el efluente minero para comprender sus características. En la tercera etapa se compararon estos resultados fisicoquímicos con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 10 de la Resolución 0631 de 2015, evidenciándose problemas de acidez, alcalinidad, presencia de sólidos en suspensión, sólidos sedimentables, grasas y aceites, y metales pesados como Cadmio, Cinc, Hierro y Plomo.

Se sugieren cinco alternativas para el tratamiento de los vertimientos de las aguas residuales no domésticas de la mina El Silencio, tomando en consideración las condiciones en las que descargan estas aguas; estos son: la precipitación química, la neutralización, la coagulación y floculación, el uso de zeolitas y la ósmosis inversa. Cada una de estas opciones ofrece beneficios potenciales para mejorar la calidad del agua y reducir los impactos ambientales negativos.

En conclusión, este proyecto proporciona recomendaciones viables para mejorar el sistema de prácticas de tratamiento de ARnD en la mina El Silencio, con el objetivo de asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

**Palabras claves:** Exploración, extracción, tratamiento, monitoreos, alternativas.

### **Abstract**

This project was carried out with the objective of presenting alternatives to improve the non-domestic wastewater treatment system generated in the exploration and extraction processes at the El Silencio mine, belonging to Aris Mining Segovia. The research was divided into three stages. First, a tour was conducted to identify the treatment phases currently implemented at the mine, finding various shortcomings such as the unplanned construction of the treatment plants. Secondly, the information from the results of internal and external monitoring carried out during the period 2019-2022 on the mining effluent was reviewed and consolidated to understand its characteristics. In the third stage, these physicochemical results were compared with the maximum permissible limits established in Article 10 of Resolution 0631 of 2015, evidencing problems of acidity, alkalinity, presence of suspended solids, settleable solids, fats and oils, and heavy metals such as cadmium, zinc, iron and lead.

Five alternatives are suggested for the treatment of non-domestic wastewater discharges from the El Silencio mine, taking into consideration the conditions under which these waters are discharged; these are: chemical precipitation, neutralization, coagulation and flocculation, the use of zeolites and inverse osmosis. Each of these options offers potential benefits for improving water quality and reducing negative environmental impacts.

In conclusion, this project provides viable recommendations for improving the non-domestic wastewater treatment system practices at the El Silencio mine to ensure compliance with water quality standards.

**Keywords:** Exploration, extraction, treatment, monitoring, alternatives.

## 1. Introducción

La actividad minera se ha venido desarrollando en el nordeste antioqueño desde la época colonial y es una práctica que se mantiene y posiblemente continuará siendo importante durante muchos años más en la región. Sin embargo, esta actividad ha generado el incremento de la producción ilegal, desencadenado una serie de conflictos socioambientales. Esto ha llevado a que las administraciones locales y regionales tengan en cuenta en sus programas de gobierno y planes de desarrollo, diferentes estrategias que coadyuven a efectuar una minería sostenible.

Una de las multinacionales ubicadas en el Distrito Minero Segovia Remedios (DMSR), es la compañía Aris Mining, antes llamada Gran Colombia Gold, donde en el 2010, se hizo poseedora del título minero RPP-140, de aproximadamente 2.871 hectáreas y por el que pagó más de 400 mil millones de pesos (1); dentro de este título se encuentra la mina El Silencio, la cual es la mina más antigua de dicha compañía con más de 170 años de actividad, actualmente cuenta con 49 niveles y más de 300 trabajadores distribuidos en los 3 turnos de operación (diurno, tarde y nocturno), operando 24 horas los 7 días de la semana.

Según un informe del 2017, realizado por el periodista Igor Eduardo Torrico, comenta que El Silencio, es la mina más insondable de Colombia con 1 kilómetro de profundidad y más de 900 kilómetros de galería (2), contando con aproximadamente 70 frentes de trabajo donde se realizan los procesos de exploración y extracción de material aurífero, actividades que generan vertimientos de aguas que para ser evacuadas hacia superficie por sistema de bombeo, requieren ser tratadas previamente, garantizando una descarga en buenas condiciones, sin afectar la fuente receptora y evitando daños ambientales de gran magnitud.

Por lo anterior, se lleva a cabo un análisis del tratamiento de las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) generadas durante los procesos de exploración y extracción de mineral en la mina El Silencio, asimismo, se revisa la Base de Datos de los resultados obtenidos en los monitoreos internos y externos ejecutados durante los años 2019 a

2022, donde se obtienen diferentes alarmas que dieron lugar a establecer estrategias que permitan mejorar la calidad del vertimiento industrial y por ende, la sostenibilidad ambiental.

Este documento se encuentra dividido en 14 capítulos. En el primero, la parte introductoria, problemática y el tema desarrollado. El segundo, el planteamiento del problema, que describe los antecedentes internacionales, nacionales y locales que se han desarrollado de manera similar. El tercero, justifica la importancia y el beneficio que trajo la realización del proyecto. El cuarto, describe el objetivo general y los específicos. El quinto, la hipótesis tanto nula como alternativa. El sexto, los marcos de referencia (conceptual, legal y geográfico), dando un enfoque central al proyecto. El séptimo y octavo, los aspectos éticos y la metodología implementada. El noveno, resultados y las alternativas de mejora para el tratamiento del vertimiento de las ARnD de la mina El Silencio. El décimo el análisis de los resultados y discusiones y en los últimos cuatro capítulos, las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

## **2. Planteamiento del problema**

### **2.1. Antecedentes**

Debido a la preocupación por la conservación y cuidado del medio ambiente, se han venido desarrollando diferentes estudios y propuestas sostenibles que han coadyuvado a la optimización de los procesos realizados en la actividad minera, minimizando y/o evitando la generación de impactos ambientales negativos, como son los vertimientos mineros no controlados, donde existen estrategias que permiten el mejoramiento del tratamiento, por lo que se hace importante, relacionar a continuación, algunos antecedentes internacionales, nacionales y locales enfocados en las técnicas de mejoramiento para la disposición de las ARnD provenientes de la extracción mineral.

#### **2.1.1. Antecedentes Internacionales**

En 2014, la Universidad Politécnica de Madrid realiza un proyecto “Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería” en Perú. Propone una serie de tecnologías de bajo costo y fácil aplicación para el tratamiento de aguas contaminadas por actividades de minería en zonas con bajo índice de desarrollo humano. Este proyecto surgió de la necesidad de estudiar los impactos que causaba la minería a las fuentes hídricas que, por ende, conlleva un considerable riesgo para la salud de la población; algunas de las propuestas dadas de acuerdo con lo encontrado en la investigación fueron: pretratamiento con un sistema de rejillas y un tratamiento primario, basado en sedimentación primaria, filtración en lecho ascendente y aireación en cascada, además, también propuso la coagulación y floculación con sulfato de hierro o aluminio seguida de decantación, para eliminar los compuestos de arsénico, manganeso y mercurio y adicional para los metales, también recomendó un tratamiento que consistió en una fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$ , con ella se oxida el arsénico (III) a arsénico (V) con intención de facilitar su posterior eliminación y oxidar el manganeso (II) a manganeso (IV) para que precipite. (3)

En 2018, Adán Rodríguez y Julia Calderón, realizaron un proyecto titulado “Optimización del sistema de tratamiento y gestión sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase III, provenientes de la bocamina del nivel 250 (EF 03) al río San José – Perú”; donde estas descargas presentaban valores en cuanto a acidez y sólidos fuera de lo exigido por la normatividad, por tanto, se gestionaron la implementación de estándares, procedimientos y requerimientos legales que permitieron alcanzar de manera satisfactoria los resultados esperados, permitiendo mejorar la calidad del vertimiento. El tratamiento fue basado en la dosificación y adición de cal en la salida del túnel para la neutralización del pH, alcanzando un rango de 8.2 unidades y en cuanto a sólidos se construyó una poza adicional para la sedimentación con capacidad de 600 l/s, incrementado los tiempos de reposo de sólidos en suspensión, logrando un mayor porcentaje de remoción. (4)

En 2020, Mijael Caballón Quispe, estudiante de la universidad Continental, por medio de una investigación deductiva, de tipo aplicada y de diseño pre-experimental, realizó un estudio para determinar la relación de la turbidez y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociado a la optimización del tratamiento de las aguas residuales industriales generadas en el proceso de explotación minera subterránea (nivel 10) de la Compañía Minera Casapalca S.A. – U.E.A. Americana en el año 2017, encontrando algunas respuestas halladas por métodos como la prueba de jarras, llegando a diferentes conclusiones, entre ellas estuvo que, la aplicación de un método basado en la dosificación adecuada de los reactivos MT-Floculante y Superpac estimada en función de la prueba de jarras y la caracterización del efluente estableció una relación significativa entre la turbidez y los SST ( $r^2 = 0.9602$ ) permitiendo mejorar el vertimiento industrial generado en el proceso de explotación minera subterránea; asimismo, se optimizó el costo de inversión de los reactivos al alcanzar valores que se encontraron por debajo de los Límites Máximos Permisibles.

Entre las recomendaciones entregadas por Caballón Quispe está la de realizar investigaciones posteriores donde se tengan en cuenta los pasivos ambientales presentes al interior de la mina, de modo que se mida su grado de relación respecto a escenarios de contaminación con el fin de intervención. (5)

En 2021, Jorge Álava, estudiante de Maestría de Ingeniería de Tecnologías Mineras de Oviedo, realizó un proyecto con el fin de diseñar por medio del programa informático GPS-X una estación de depuración de aguas contaminadas, donde menciona no ser posible tomar muestras, lo que hizo que revisara datos de biografías anteriores, para simular muestras y poder ejecutar los ensayos.

De acuerdo con los ensayos, determina el tipo de coagulante (cloruro de hierro) y floculante (floculante neutro) óptimo para la decantación de sólidos, además, con GPS-X que es una herramienta muy avanzada para el modelo matemático, diseña una estación que permite que el agua contaminada sea depurada e ingresada nuevamente al proceso.  
(6)

En 2022, Aguilar y Navarro, estudiantes de ingeniería ambiental de Perú, realizan un proyecto con el fin de determinar la influencia del diseño de un sistema de tratamiento con floculante para reusar aguas residuales industriales generadas por la actividad minera en la cantera Encanto Blanco, donde según los resultados se observó que al aplicar floculante industrial (CT-3561), aumenta la rapidez de sedimentación ya que el agua solo se utiliza para fines de lavado de material; este resultado se comparó con el Límites Máximos Permisible (LMP) establecidos en el D.S. N. 010-2010 MINAM y se observó completo cumplimiento.

Los autores proponen que, para mejores resultados al reusar las aguas residuales, se debe realizar la construcción de dos sedimentadores que funcionen alternamente; donde estos reciban el agua del lavado del mineral, se aplique la dosificación de floculante establecida en la prueba de jarra y el agua clarificada se recircule al proceso.  
(7)

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

En 2010, se hizo un análisis documental del efecto de vertimientos domésticos y mineros a la fuente receptora llamada Río Condoto del departamento del Chocó, donde se encuentran diferentes impactos, como aportes de sólidos, aceites y mercurio que

ocasionan daños a la salud pública; después de evidenciar esta situación, proponen diferentes alternativas de solución para las mejoras correspondientes; una de esas estrategias fue la solicitud de que las actividades mineras que vierten en el Río en mención, realicen el diseño de piscinas o lagos de sedimentación para la retención de sólidos y de mercurio de las aguas provenientes del lavado del mineral en los procesos de extracción de oro por amalgamación, disminuyendo así, un alto porcentaje de los contaminantes que llegan a Condoto. (8)

En 2017, David Álvarez, estudiante de Ingeniería Química de la Universidad de Pamplona, plantea y evalúa alternativas para tratar los vertimientos producto de la actividad minera enfocado en la pequeña minería, para lo cual primero realiza un diagnóstico y evaluación de los vertimientos que son descargados en la fuente receptora, Quebrada La Baja, ubicada en el distrito de California-Vetas Santander, encontrando mediante análisis de laboratorio, que existe la presencia de metales como el mercurio y el anión cianuro, y sus niveles de pH están por fuera de los valores máximos establecidos; además asiente que los análisis de vertimientos de los pequeños mineros al ser comparados con la Resolución 0631 de 2015, no cumplen en su mayoría con los valores máximos exigidos. Como propuesta del autor entrega un diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales para la remoción de las altas concentraciones de parámetros como DBO, SST, SSED, mercurio y metales como cobre, hierro, y pesados como cinc. (9)

En 2018, Viky González, estudiante de Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales, se centró en evaluar el impacto ambiental de los vertimientos de los procesos de extracción de mineral aurífero sobre la Quebrada Bemango (Buriticá- Antioquia); para lograr este objetivo, la autora tomó muestras en tres puntos de la quebrada teniendo en cuenta la ubicación de la mayor concentración de descargas y antes de una confluencia presentada con la Quebrada La Clara (el primero, aguas arriba de la quebrada Guaté a 300 metros de distancia de los vertimientos; el segundo, en cercanías al Corregimiento Llanos de Uruarco a 1568 metros de distancia del primer punto; y el tercero, en la zona baja del cuerpo de agua, antes de la confluencia y a una distancia de 2084 metros del segundo punto). Realizó un análisis físico, químico

y microbiológico de la calidad del agua y la relación con los vertimientos mineros, donde menciona que según resultados, el segundo punto fue el que mayor concentración de contaminantes presentó afectando las dinámicas del ecosistema; por tanto, entrega diferentes recomendaciones, una de ellas es que la autoridad ambiental genere acciones no solo encaminadas en la legalización y sanción sino en el desarrollo de instrumentos de planificación y protección de los recursos, ya que no solo se observa afectación en el agua, sino también en otros componentes, como el suelo y el aire. (10)

Miguel Ángel López, estudiante de la Especialización en Gestión Ambiental de la Fundación Universidad de América. En 2021, realiza una investigación sobre algunas técnicas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales con elevada concentración de metales pesados en la industria minera colombiana, esto, con el fin de realizar la selección de una técnica óptima para la remoción de metales pesados. Después de analizar 14 formas de tratamiento de aguas residuales convencionales y 6 no convencionales, teniendo en cuenta tanto matrices comparativas como encuestas realizadas a personas involucradas en el ámbito minero, concluyó que la técnica más eficiente para la remoción de metales pesados es la adsorción con desechos industriales o agrícolas. (11)

### **2.1.3. Antecedentes Locales**

La minería aurífera es desarrollada en los municipios de Segovia y Remedios de manera muy representativa, donde una de las preocupaciones son los vertimientos mineros, pues el daño que representa verter sin previo tratamiento a una fuente receptora es alarmante; sin embargo se realiza una búsqueda a nivel local de investigaciones o estudios sobre los tratamientos realizados a los vertimientos mineros para evitar impactos negativos y solo se obtiene un resultado; es importante mencionar que, en la empresa Aris Mining Segovia, en una de las minas que se encuentra dentro de su título minero, se implementó una medida para el control de sólidos, el cual también se describe a continuación.

En 2022, Oscar Muñoz Aguirre, realizó una investigación para analizar las concentraciones de Cadmio asociado a la extracción aurífera en el Distrito Minero Segovia Remedios (DMSR) determinando si las corrientes de agua superficiales estaban siendo contaminadas por Cadmio y así establecer una línea base que permitiera tratar el problema con nuevas investigaciones enfocadas en remediarlo y prevenirlo; para esto, realizó tomas de muestra en las quebradas Marmajón y La Cianurada, analizándolas en el Laboratorio certificado de Diagnóstico y Control de Contaminación de la Universidad de Antioquia, mediante absorción atómica.

Según resultados, para la quebrada Cianurada el valor máximo de Cadmio fue de 1.34 mg/L y para la quebrada Marmajón de 0.56 mg/L, con valores promedio de 0.08 mg/L y de 0.02 mg/L respectivamente, con valores mínimos de 0.02 mg/L para ambos drenajes; comparándolos con la Resolución 0631 de 2015 (valor máximo permisible: 0.05 mg/L), se denota contaminación por Cadmio en ambas quebradas, donde los puntos con mayores concentraciones se ubicaron en sectores donde predominan plantas de tratamiento mineral y los de menor valor hacia los nacimientos de las microcuencas. En una de las conclusiones del autor, comenta que, se hace necesario considerar la revisión de las bases científicas, jurídicas, ambientales y económicas, respecto a los límites máximos permisibles para vertimientos de aguas residuales provenientes de minería, con el fin del cuidado y protección de las fuentes hídricas. (12)

La Mina Carla, está ubicada en el municipio de Remedios Antioquia y es una de las minas de propiedad de la multinacional Aris Mining Segovia, la cual con respecto al Silencio, Providencia y Sandra K, es la que menos tiempo de operación tiene en el territorio; cuenta con 5 niveles, ejecutando proceso de exploración y extracción en los niveles 1, 3 y 5, dando lugar a vertimientos de ARnD con presencia de contaminantes, esto, por motivo a que el tratamiento implementado no era suficiente para el control, por tanto, Aris Mining decidió mejorar sus procesos y construyó un tanque sedimentador adicional e inició con la aplicación de productos coagulante y floculante, empezando con pruebas desde el 2021, logrando establecer una dosis óptima para 2022. Luego de contar con los resultados esperados, realizan la contratación con diferentes laboratorios

certificados para análisis fisicoquímicos, donde han obtenido el cumplimiento del 100% de los valores de referencia establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

## **2.2. Descripción del problema**

Aris Mining cuenta con 4 minas subterráneas, con sus nombres El Silencio, Providencia, Sandra K y Carla, realizando operación 24 horas los 7 días de la semana, donde aparte de la minería tecnificada, en las minas El Silencio y Providencia, también se realiza minado selectivo altamente cíclico.

En estas minas se están desarrollando diversas exploraciones con el fin de identificar nuevos recursos que aumenten la producción, y poder realizar la extracción de los mismo; por lo que en la realización de estos procesos se generan numerosos impactos a los factores agua, suelo y aire.

En cuanto al factor agua, los impactos más representativos que puede generar la extracción de mineral son la presencia de sólidos suspendidos y sedimentables, turbidez, metales pesados, grasas y aceites y alteración del potencial de Hidrógeno, entre otros; por tanto, se hace esencial la implementación de sistemas de tratamiento suficientes para el mejoramiento o control de estos contaminantes y de tal manera contribuir al cumplimiento de lo exigido por la Resolución 0631 de 2015, sobre los límites permisibles para vertimientos industriales mineros y/o lo exigido por la autoridad ambiental competente de la región (CORANTIOQUIA), la cual también tiene la potestad para plasmar los límites de vertimientos.

Por lo anterior, el análisis del tratamiento de ARnD se enfocó en la mina El Silencio, la cual se encuentra dentro del RPP de Aris Mining y es la mina más antigua en operación en el municipio de Segovia, con más de 170 años y 49 niveles, lo que hizo aún más interesante querer conocer su sistema de tratamiento, ya que, por su profundidad y operatividad, requiere de un método suficiente que esté enfocado en lograr una sostenibilidad ambiental.

La importancia de que el tratamiento de las ARnD en la mina sea el adecuado, que permita controlar todos los contaminantes generados durante el proceso de extracción, es debido a que estos dan paso a las pérdidas de biodiversidad y destrucción de los ecosistemas acuáticos; un ejemplo, es cuando se cuenta ya sea con un alto o bajo pH causa condiciones tóxicas que no solo afectan a los organismos que se encuentran en la fuente receptora, sino también a la salud de las personas que se beneficien aguas abajo de este recurso; al igual que los sólidos, estos no permiten el ingreso de la luz, por lo que le impide el desarrollo de la biota acuática.

### **2.3. Pregunta de investigación.**

¿Qué alternativas se podrían implementar para mejorar el tratamiento de las ARnD provenientes de los procesos de exploración y extracción de la mina El Silencio de Aris Mining, Segovia, considerando la revisión de información de variables físico - químicas durante los periodos 2019-2022?

### 3. Justificación

En el municipio de Segovia Antioquia se viene realizando hace más de II siglos el proceso de exploración y extracción de material aurífero, donde en sus inicios esta actividad se estuvo ejecutando solo por los pequeños mineros ancestrales pero con el pasar de los años, se ha ido tecnificando, donde ahora también es implementado por la multinacional Canadiense llamada Aris Mining, la cual desde el 2010 con su adquisición del título minero RPP 140\_Ñemeñeme cuenta con el poder de implementar dicha actividad en los municipios de Segovia y Remedios; donde en uno de estos municipios se encuentra ubicada la mina El Silencio, la cual es la mina más antigua de la región con más de 170 años de operación.

Por tanto, se hace importante realizar esta investigación, pues fue con el fin de conocer el sistema implementado en la mina El Silencio para el tratamiento de las aguas residuales no domésticas generadas en el proceso minero, las cuales son descargadas en una fuente hídrica del municipio que recibe el nombre de quebrada Peñitas, lo que hizo necesario, realizar un acercamiento con la empresa Aris Mining (implicada y/o beneficiaria) para la autorización de visitas en campo que permitiera identificar las características del vertimiento a través de los análisis físicos químicos que la misma empresa ha realizado, su sistema de tratamiento y demás estrategias que implementan en pro del cumplimiento de los parámetros límites permisibles establecidos en normatividad aplicable; con el propósito de entregar alternativas de solución que permitan mejorar el proceso de tratamiento y evitar impactos negativos en el medio ambiente.

Se menciona que, cuando existen descargas puntuales directas o indirectas al recurso hídrico y estas no cumplen con los límites máximos permisibles exigidos por la normativa aplicable (en este caso, el Art.10 de la Resolución 0631 de 2015), da lugar al cobro de la Tasa Retributiva, que es un instrumento económico que se aplica para la contaminación de fuentes de agua en términos de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO); por lo tanto, el valor a pagar por incumplimiento de la Tasa Retributiva podrá ser invertido para el tratamiento de los sólidos generados en

la operación, cumpliendo así con los requisitos ambientales y contribuyendo al cuidado y protección del medio ambiente.

En general, las violaciones a los términos, condiciones, obligaciones y requisitos establecidos en el Plan de Manejo Ambiental pueden dar lugar a investigaciones por parte de la misma autoridad ambiental que lo otorgó o por parte del Ministerio de Ambiente, quienes tienen derecho a tomar las medidas que correspondan.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo general**

- Presentar alternativas para el mejoramiento del sistema de tratamiento de ARnD generadas en la mina El Silencio de Aris Mining, Segovia, por los procesos de exploración y extracción; a partir de la revisión de información de variables físico - químicas en los periodos 2019-2022.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Describir las fases del tratamiento realizado a las ARnD generadas en el proceso de exploración y extracción del mineral en la mina el Silencio.
- Analizar los resultados de la información de los monitoreos internos y externos realizados al vertimiento de ARnD de la mina El Silencio, durante el periodo 2019-2022.
- Presentar estrategias que permitan mejorar el tratamiento del vertimiento de las ARnD de la mina el Silencio.

## 5. Hipótesis

**Hipótesis nula:** el vertimiento de Aguas Residuales no Domésticas de la Mina El Silencio cumple con los valores de referencia establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

**Hipótesis alternativa:** el vertimiento de Aguas Residuales no Domésticas de la mina El Silencio no cumple con los valores de referencia establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

Esta hipótesis alternativa sugiere que el vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio, no cumple con los estándares establecidos por la legislación ambiental, lo que podría tener implicaciones importantes en términos de protección del medio ambiente y la salud pública; para probar esta hipótesis, se analizarán los resultados de monitoreos internos y externos realizado por el titular de la Mina El Silencio, además de un recorrido de reconocimiento en el sistema de tratamiento del efluente minero con el que cuentan actualmente, con el fin de conocer si es suficiente para la retención de los sólidos, generados en los procesos de exploración y extracción.

Después del análisis, se compara los resultados obtenidos con los valores límite establecidos por la legislación ambiental y se determina si existe evidencia suficiente para aceptar o rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa. Si se encuentra una alternativa suficiente para aceptar la hipótesis, se podría concluir que el vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio, no cumple con los parámetros presentados por la legislación ambiental.

## **6. Marcos de referencia**

### **6.1. Marco teórico conceptual**

La minería es una actividad económica enfocada en la extracción de minerales para su procesamiento y comercialización, (13) donde esta labor se ha venido realizando desde la antigüedad, permitiendo un gran aporte de ingresos monetarios y desarrollo de la sociedad; sin embargo, no es un secreto que, así como aporta beneficios, también genera diferentes aspectos e impactos negativos directos o indirectos, tanto en el ambiente como en la salud de las personas.

#### **Tipos de minería**

Existen diferentes formas de obtención de minerales, entre ellos está la minería de aluvión, tanto manual como mecanizada, la primera consiste en la extracción y procesamiento de arenas y gravillas de las playas y ríos con ayuda de herramientas manuales como barra, bateas, palas y de agua a presión; la mecanizada o a cielo abierto, donde se emplean maquinaria amarilla y motobombas; causando impactos ambientales y visuales muy representativos; (14) y la minería de veta o subterránea, que se dedica a la explotación de recursos debajo de la superficie de la tierra, donde también se puede realizar tanto manual como mecanizada (15) y los impactos se ven reflejados de una u otra manera, en superficie.

Con el pasar de los años y el avance tecnológico, ha dado paso a la minería moderna, buscando mejorar la productividad mediante el uso de equipos que permita ser más eficiente y eficaz a la hora de la realización de trabajos, además minimizando los impactos generados en el medio ambiente. (16)

No obstante, todo proceso minero genera contaminación de los recursos agua, suelo y aire, por medio de vertimientos, degradaciones o subsidencia de terrenos y emisiones atmosféricas, por tanto, se requiere de la implementación de medidas que

vayan en pro de la prevención, mitigación, control y compensación de impactos con el fin de lograr un equilibrio ambiental.

### **ARnD y su impacto ambiental por no tratamiento**

Como el proyecto está enfocado en vertimientos mineros, se hace necesario profundizar en que estas ARnD provienen de los procesos de exploración y extracción y descargan finalmente a un cuerpo receptor, para lo cual, deben contar con las características ambientales para poder verter; siendo significativo resaltar que un vertimiento que incumple la norma, no solo genera un impacto negativo, sino que también, se requiere considerar el caudal para así establecer la carga contaminante a entregar y determinar la capacidad de la fuente receptora para asimilar o no dicha carga, (17) por tanto, antes de realizar una descarga se debe hacer una caracterización del agua generada en el proceso, la cual consiste en evaluar e identificar las sustancias contaminantes que un proyecto o usuario determinado están vertiendo al recurso hídrico (18) y posteriormente, al ya contar con los contaminantes del agua estudiada, se debe pasar por un sistema de tratamiento, refiriéndose al conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas residuales. (19)

También cabe mencionar que, el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, que establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales, no garantiza que la fuente receptora no sea afectada, ya que como se mencionó anteriormente, el caudal vertido es un punto clave, pues si la fuente receptora cuenta con un caudal muy pequeño, este no alcanza a asimilar la cantidad del vertimiento, generando un deterioro en la calidad de la fuente hídrica debido a los cambios en sus características.

Por todo lo anterior, eliminar los contaminantes del agua generada en el proceso de extracción para poder realizar la descarga a la fuente receptora, es muy importante, debido a que, de tal manera, los beneficiarios de esta fuente podrían darle uso o aprovechamiento, además se evitarían los daños a la salud de las personas, los impactos

paisajísticos, la pérdida de ecosistemas acuáticos, la alteración de la acidez o basicidad del agua, entre otros.

### **Tasa retributiva**

Si no se realiza un tratamiento correcto y se vierte en condiciones fuera de lo exigido por la normatividad, generando un impacto ambiental, existe un instrumento económico aplicable, llamado Tasa Retributiva, la cual, según el Decreto 2667 de 2012, es aquella que cobra la autoridad ambiental competente a los usuarios por la utilización directa e indirecta del recurso hídrico como receptor de vertimientos puntuales directos o indirectos y sus consecuencias nocivas, originados en actividades antrópicas o propiciadas por el hombre y actividades económicas o de servicios, sean o no lucrativas.

En el Decreto en mención, se expresa la importancia del factor regional en el cálculo de la tasa retributiva, ya que busca considerar las particularidades y características propias de cada región en relación con los recursos naturales y el impacto ambiental. Este factor tiene en cuenta aspectos como la disponibilidad y la calidad de los recursos naturales, la vulnerabilidad del ecosistema local, la densidad de población y otros factores relevantes para determinar la tasa retributiva que corresponde a una empresa en una región específica.

Adicional a lo anterior, este factor regional también es un mecanismo para incentivar el cumplimiento de las normativas ambientales y sancionar a las empresas que no respetan los estándares establecidos en sus Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), promoviendo así una gestión ambiental más responsable y sostenible, donde se menciona que, estos ajustes por incumplimiento se acumulan a lo largo del quinquenio sin que sobrepase el límite del factor regional de 5.50.

El cobro de la tasa retributiva por vertimientos puntuales se hace de forma anual, donde las autoridades ambientales determinan las cargas contaminantes expresadas en kilogramos/año de DBO<sub>5</sub> y SST vertidas, dicha cantidad es multiplicada por un valor establecido en pesos colombianos y genera la facturación; es relevante mencionar que

los monitoreos donde se establecen este valor deben ser realizados por laboratorios certificados por el IDEAM. (20)

## 6.2. Marco legal

A continuación, se presentan Leyes, Decretos y Resoluciones relevantes que engloban el marco normativo, sin embargo, se resalta que, para este proyecto, se estará haciendo relevancia y aplicación, solo a la Resolución 0631 de 2015.

**Tabla 1.** Normatividad ambiental

Objeto	Norma	Alcance
Licenciamiento Ambiental	Ley 685 de 2001	Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones
Licenciamiento Ambiental	Decreto 2041 de 2014	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
Licenciamiento Ambiental	Resolución 1562 de 2005	Por el cual se adoptan los manuales para evaluación de Estudios Ambientales y de seguimiento ambiental de Proyecto y se toman otras determinaciones"
Recursos Naturales	Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
Vertimiento	Resolución 0631 de 2015.	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones
Vertimiento	Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
Vertimiento	Decreto 1886 de 2015	Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas
Residuos	Ley 9 de 1979	Por la cual se dictan Medidas Sanitarias
Residuos	Resolución 1407 de 2018	Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones

Objeto	Norma	Alcance
Residuos	Decreto 4741 de 2005	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
Residuos de material estéril	Resolución 541 de 1994.	Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.
Ambiental	Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible
Tasa Retributiva	Decreto 2667 de 2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.

Fuente: elaboración propia

### 6.3. Marco geográfico o territorial

Esta investigación se realiza en el municipio de Segovia de la subregión del nordeste antioqueño del departamento de Antioquia, donde este municipio limita por el norte con los municipios de Zaragoza y El Bagre, por el este con el departamento de Bolívar, por el sur con el municipio de Remedios, y por el oeste con los municipios de Amalfi y Anorí.

El territorio que hoy ocupa Segovia fue descubierto por el Capitán Francisco Núñez Pedroso, cuando al mando de una expedición exploraba las regiones que bañan los ríos la Miel y Guarinó. Antes de la llegada de los colonos, el territorio segoviano estaba poblado por las tribus indígenas Tahamíes y Yamecíes.

En 1852 se estableció en Segovia la Frontino Gold Mines, la cual trajo máquinas de vapor, telégrafo, correo y molino californiano, y además instaló rieles en las minas, trayendo así un mejor manejo de la explotación minera.

En los años 1860, los exploradores llegaron a Segovia, y habiendo encontrado minas de oro se quedaron para no irse. A partir de ese momento, fueron muchas las

expediciones que llegaron a Segovia en busca del preciado metal. La fiebre del oro acaparaba la atención de todos los que llegaban.

Este municipio, se encuentra a una distancia por carretera a Medellín de 190,6 Kilómetros, la vía es pavimentada y en buenas condiciones; en Segovia se encuentra asentados los indígenas de la etnia Embera que representan el grupo demográficamente más numeroso del departamento; además, cuenta con una extensión total de 1231 km<sup>2</sup>, donde 5,6 km<sup>2</sup> pertenece a la zona urbana y 1225.4 km<sup>2</sup> a la zona rural; tiene 1 corregimiento, Fraguas (Machuca), y 32 veredas, entre ellas Campo Alegre, El Aporreado, Laureles, San Miguel, La Po, El Cenizo, y Puerto Calavera; donde el total de la población segoviana es de 39376 habitantes, de los cuales 6983 Hab (17.73%) corresponde a la zona rural.

Su principal actividad económica se concentra en la exploración y explotación del material aurífero (el municipio produce el 39,4% del total de la región en oro y el 6,66% de la producción nacional), aunque también realiza actividades como la agricultura, donde los productos más representativos son la yuca, el plátano, el maíz, el café y el arroz.

Otra de sus actividades representativas es el comercio, el cual gira en torno a la minería con entables, las compras de oro, la provisión de víveres, la venta de licores, y almacenes de misceláneas. (21)

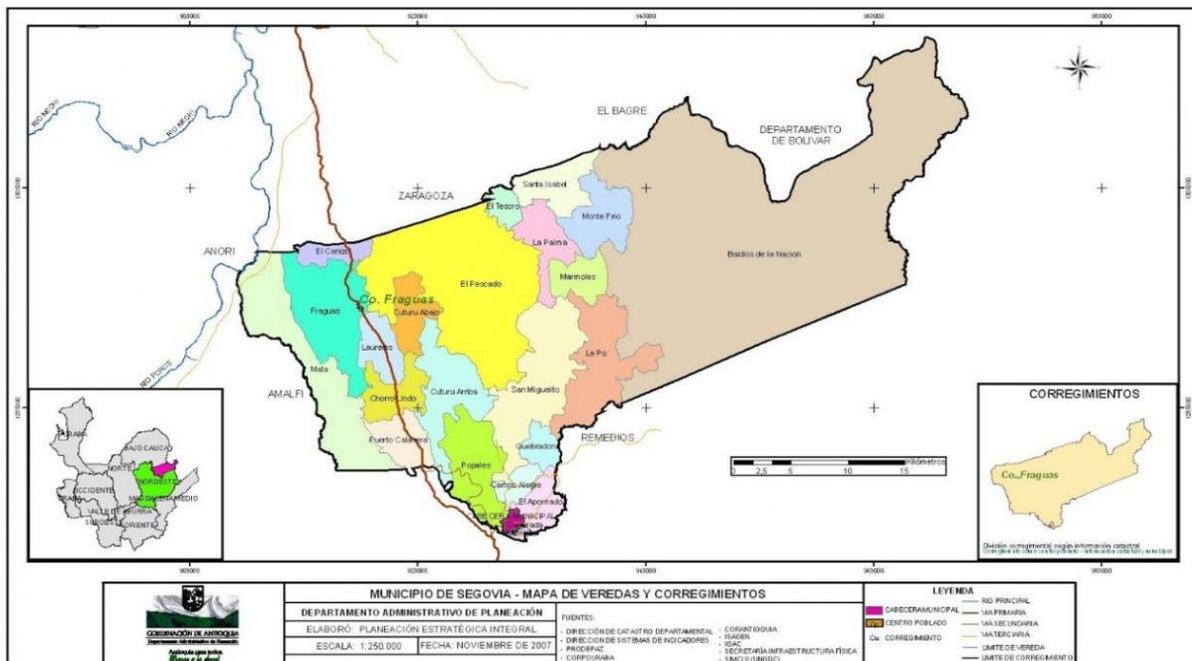
Teniendo en cuenta la tradición minera de la región y las problemáticas socio ambientales causadas por la misma, los gobiernos regionales han implementado dentro de sus planes de gobierno y planes de desarrollo diferentes estrategias que permitan alcanzar una minería sostenible. Como es el caso del Plan de Desarrollo Municipal 2020 - 2023 “SOMOS SEGOVIA GENERANDO CONFIANZA” en su línea estratégica # 2, se establecen algunos programas para la minería, medio ambiente y desarrollo económico y social, los cuales se relacionan a continuación: (22)

**Tabla 2.** Técnicas de la línea estratégica 2 del Plan de Desarrollo Municipio de Segovia 2020-2023.

Algunas técnicas Línea Estratégica #2		
Programa	Producto	Indicador
Protección y cuidado del medio ambiente	Adelantar acciones para disminuir el uso del mercurio y fomentar las tecnologías limpias	Porcentaje de reducción de uso de mercurio y uso de tecnologías limpias.
Minería responsable como fuente de ingreso	Propiciar la realización de mesas de trabajo entre titulares mineros y mineros ancestrales y tradicionales para la firma de acuerdos	Número de actas de sesiones de mesas de concertación
Minería responsable como fuente de ingresos	Realizar el acompañamiento a la pequeña minería	Número de unidades productivas asistidas técnicamente
Minería responsable como fuente de ingresos	Establecer, de acuerdo con el PBOT, las Zonas Industriales Mineras (ZIMAS)	Número de Zonas Industriales Mineras (ZIMAS) definidas y adoptadas

Fuente: elaboración propia

**Figura 1.** Mapa del municipio de Segovia Antioquia



Fuente: tomado de: <https://www.arcoiris.com.co/wp-content/uploads/2017/06/Segovia.jpg>

#### **6.4. Marco Institucional**

Aris Mining Segovia (AMS) es una compañía canadiense, que cotiza en la bolsa de Toronto desde el 2010, año en el que obtuvo su título minero RPP 140 - ÑemeÑeme, es líder en la exploración y producción de oro y plata, con operaciones enfocadas en Colombia. Se encuentra ubicada en el nordeste antioqueño, específicamente en los municipios de Segovia y Remedios, ocupando un área de 9000 hectáreas aproximadamente, cuenta con 4 minas subterráneas (El Silencio, Providencia, Sandra K y Carla), donde en el tiempo de operación han producido más de 5 millones de onzas de oro, resaltando que su actividad es desarrollada 24 horas los 7 días de la semana, donde es importante mencionar que en el tercer trimestre del año 2022, logró producir 54,630 onzas de oro. (23)

Aris Mining cuenta con operaciones en Guyana, donde se encuentra avanzando el proyecto Toroparú, uno de los proyectos de oro subterráneos sin desarrollar más grandes de las Américas; además, también es propietaria de aproximadamente el 44% de Aris Gold Corporation (TSX: ARIS), la cual es una minera de Canadá que actualmente está avanzando una expansión y modernización importante de sus operaciones mineras subterráneas en su Proyecto Marmato en Colombia. (24)

Esta compañía, cuando era llamada Gran Colombia, generó alrededor de 1840 empleos directos y 1509 indirectos, según se indica en el informe de sostenibilidad del 2020, donde el 90 % del personal es oriundo de la región, lo que demuestra su vinculación con la comunidad, demostrando además con sus optimizaciones de procesos e inversiones comunitarias, el compromiso para mejorar las vidas de los trabajadores, sus familias, los proveedores locales y así como también otras personas que no están relacionadas directamente con la minería; la empresa se maneja con transparencia y de conformidad con las mejores prácticas internacionales, y tiene confianza en que el valor creado por el desarrollo de sus operaciones en Segovia beneficiará a sus accionistas, así como al gobierno y al pueblo de Colombia. (25)

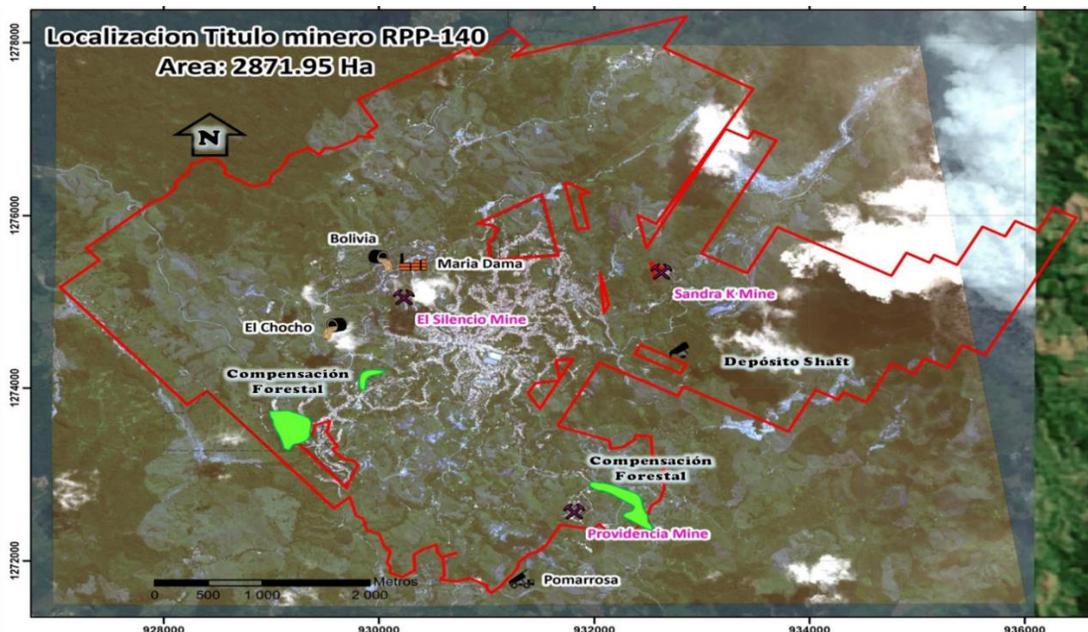
Por lo anterior, la sostenibilidad hace parte fundamental del modelo empresarial, creando en el 2013 la fundación Aris Mining, donde es una entidad sin ánimo de lucro y

trabaja con el objetivo de realizar programas, proyectos, obras y actividades que contribuyan al desarrollo económico y social en los sitios de interés para los miembros de la fundación. (26)

La gestión de AMS, está orientada a invertir en los aspectos económicos, ambientales y sociales de los entornos de operación. Generar una imagen corporativa ética y transparente a través de un direccionamiento estratégico en procesos de alto alcance social, en los que se empodera a la comunidad para trabajar de manera cohesionada con la compañía, tras la búsqueda continua de la sostenibilidad. (26)

Esta compañía cuenta con unas líneas estratégicas implementadas en Segovia y Marmato, donde realizan una serie de acciones enfocadas en el encadenamiento productivo de la pequeña minería, la educación para el desarrollo, la erradicación del trabajo infantil, mejoras en la infraestructura, contribuyen a la salud, bienestar y protección a la cultura, involucra el valor de la mujer con una línea llamada mujeres líderes y emprendedoras y trabaja en pro de la biodiversidad y agua para el futuro, donde además planifica sus actividades y se cuenta con un Plan de Manejo Ambiental que trabaja para dar su total cumplimiento. (26)

**Figura 2.** Titulo Minero AMS, RPP 140 ÑemeÑeme



Fuente: tomada de Base de Datos AMS.

## **7. Aspectos éticos**

Este proyecto se realizó conforme a criterios éticos, donde la participación de la empresa fue de manera voluntaria y se les brindó toda la información de lo que se iba a realizar, los riesgos a los que se podía estar expuesto, además de los beneficios que obtendrían con la ejecución del proyecto.

Por tanto, se garantizó que prevalecería la seguridad y dignidad de la compañía implicada, además, desde que se recibió la información documental y se realizó la indagación en campo, se tuvo un trato confidencial ético con la empresa, donde se firmó un consentimiento de entrega de información, donde ésta, no será utilizada para juzgar o en maleficencia, sino en busca de brindar estrategias que vayan en pro del mejoramiento del proceso de tratamiento de vertimientos mineros.

Estos resultados no serán publicados, debido a que son netamente con fines académicos, dándolos a conocer solo en la socialización final con los compañeros de clase y docentes, contando también con el compromiso que esta información obtenida está bien custodiada, donde ni familiares, ni personas cercanas y mucho menos empresas del sector, tendrán acceso a los resultados.

## **8. Metodología**

### **8.1. Tipo de estudio**

El presente trabajo “Alternativas de mejoramiento en el tratamiento del vertimiento minero a partir de la revisión de información de variables físico - químicas en la mina El Silencio, empresa Aris Mining, Segovia, por la modalidad, corresponde a un proyecto descriptivo mixto, debido a que involucra tanto la investigación como elementos de desarrollo, este último encaminado a presentar las alternativas para el mejoramiento del sistema de tratamiento de ARnD generadas en la mina El Silencio de Aris Mining, Segovia, por los procesos de exploración y extracción de mineral.

### **8.2. Universo**

Se tuvo la base de las empresas legales constituidas en Colombia que cuentan con sistemas de tratamiento de ARnD provenientes del proceso de extracción, antes del vertimiento a fuentes hídricas.

### **8.3. Muestreo**

Este proyecto se hizo por conveniencia en una unidad minera del municipio de Segovia Antioquia, la cual pertenece a la compañía Aris Mining y opera hace más de 170 años, por lo que se analiza a través de información recolectada y entregada por la empresa, las condiciones del vertimiento minero durante los periodos 2019-2022 y el sistema de tratamiento implementado a sus ARnD generadas para poder proponer estrategias que coadyuven al mejoramiento del proceso.

### **8.4. Muestra**

Una unidad minera de Aris Mining (Mina El Silencio).

### 8.5. Criterios de inclusión y/o exclusión

No aplica debido a que el proyecto se enfoca a una mina específica y no se tuvo en cuenta personas.

### 8.6. Técnicas e instrumentos para la recolección de información

- Documentos en Excel, Word y PDF entregados por la empresa AMS, donde se tiene consignada la información de los monitoreos y seguimiento al vertimiento ARnD de la mina El Silencio.
- Diario de campo donde se apuntaron tanto las notas que se recolectaron en el recorrido en el sistema de bombeo de la mina (cantidad de tanques sedimentadores, ubicación, capacidad, descripción general del bombeo, etc.); como también, las ideas que se fueron obteniendo para proponer el mejoramiento del tratamiento. (Ver **Tabla 3**)
- Guías de recolección de información para la comparación de los resultados de análisis entregados por AMS y lo exigido por la normatividad; externos (Ver **Tabla 4**), internos (Ver **Tabla 5**).

**Tabla 3.** Formato de descripción de fases del tratamiento.

Ítems	Ubicación del depósito	Capacidad de almacenamiento (m3)	Tiempo de llenado (minutos)	Descripción de bombeo	Periodicidad de limpieza

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.** Guía de recolección de datos externos para análisis de información.

Guía de Recolección de datos_ Monitoreos Externos											
			<b>Nombre de la empresa</b>			Aris Mining-Mina El Silencio					
			<b>Nombre del observador</b>			Sirley Johana Serna Betancur					
			<b>Giro de la empresa</b>			Empresa de minería aurífera					
<b>Obj</b>	Evaluar los resultados de los parámetros analizados en el vertimiento minero de la mina El Silencio con personal externo de la compañía, en los años del 2019 al 2022, comparándolos entre sí según años y relacionándolos con los límites permisibles exigidos por la normatividad ambiental.										
<b>N°</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Límite máximo permisible</b>	<b>Junio 2019</b>	<b>Septiembre 2019</b>	<b>Octubre 2019</b>	<b>Diciembre 2020</b>	<b>Agosto 2021</b>	<b>Noviembre 2021</b>	<b>Junio 2022</b>	<b>Diciembre 2022</b>
				<b>Analquim</b>	<b>Corantioquia</b>	<b>Corantioquia</b>	<b>Analquim</b>	<b>Analquim</b>	<b>Analquim</b>	<b>Analquim</b>	<b>Analquim</b>
1	pH min	Unidades de	6.00								
	pH máx	pH	9.00								
2	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	150.00								
3	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	50.00								
4	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50.00								
5	Sólidos Sedimentables (SSED) Mínimo	mL/L	2.00								
	Sólidos Sedimentables (SSED) Máximo										
6	Grasas y Aceites	mg/L	10.00								
7	Fenoles Totales	mg/L	0.20								
8	Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte								
9	Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10.00								
10	Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte								
11	Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte								
12	Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte								
13	Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte								
14	Nitrógeno Amoniacal (NNH <sub>3</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte								
15	Nitrógeno Total Kjeldahl (N)	mg/L	N.E								
16	Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte								
17	Cianuro Total (CN)	mg/L	1.00								
18	Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	250.00								
19	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	1200.00								
20	Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/L	1.00								
21	Aluminio (Al)	mg/L	N.E								
22	Arsénico (As)	mg/L	0.10								
23	Cadmio (Cd)	mg/L	0.05								
24	Cinc (Zn)	mg/L	3.00								
25	Cobre (Cu)	mg/L	1.00								
26	Cromo (Cr)	mg/L	0.50								
27	Hierro (Fe)	mg/L	2.00								
28	Mercurio (Hg)	mg/L	0.00								
29	Níquel (Ni)	mg/L	0.50								
30	Plata (Ag)	mg/L	0.50								
31	Plomo (Pb)	mg/L	0.20								
32	Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte								
33	Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte								
34	Dureza Cálctica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte								
35	Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte								
36	Color Real - 436 mm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte								
37	Color Real - 525 mm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte								
38	Color Real - 620 mm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte								
39	pH-Color	Unidades	N.E								

Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.** Guía de recolección de datos internos

Guía de Recolección de datos Monitoreos Internos									
Nombre de la empresa		Aris Mining-Mina El Silencio							
Nombre del observador		Sirley Johana Serna Betancur							
Giro de la empresa		Empresa de minería aurífera							
<b>obj</b> Evaluar los resultados de los parámetros analizados en el vertimiento minero de la mina El Silencio con personal interno de la compañía, en los años del 2019 al 2022, comparándolos entre sí según años y relacionándolos con los límites permisibles exigidos por la normatividad ambiental.									
Lím. Máx. Permisible según Resolución 0631 de 2015 pH (6.00 a 9.00 Unidades)					Lím. Máx. Permisible según Resolución 0631 de 2015 SST (50.00 mg/L)				
Año	Mes	pH Máximo (Unidades)	pH Mínimo (Unidades)	Cantidad de muestras de pH tomadas	Muestras dentro de rango pH (%)	SST Máximo (mg/L)	SST Mínimo (mg/L)	Cantidad de muestras de SST tomadas	Muestras dentro de rango SST (%)
2019	Enero								
	Febrero								
	Marzo								
	Abril								
	Mayo								
	Junio								
	Julio								
	Agosto								
	Septiembre								
	Octubre								
	Noviembre								
	Diciembre								
2020	Enero								
	Febrero								
	Marzo								
	Abril								
	Mayo								
	Junio								
	Julio								
	Agosto								
	Septiembre								
	Octubre								
	Noviembre								
	Diciembre								
2021	Enero								
	Febrero								
	Marzo								
	Abril								
	Mayo								
	Junio								
	Julio								
	Agosto								
	Septiembre								
	Octubre								
	Noviembre								
	Diciembre								
2022	Enero								
	Febrero								
	Marzo								
	Abril								
	Mayo								
	Junio								
	Julio								
	Agosto								
	Septiembre								
	Octubre								
	Noviembre								
	Diciembre								
<b>Total global</b>									
<b>Promedio</b>									

Fuente: elaboración propia

## 8.7. Operacionalización de las variables

Para el análisis de las condiciones del vertimiento minero de la mina El Silencio, se tuvo en cuenta algunas variables las cuales están expuestas en **Tabla 6**, además se muestra la manera en cómo se van a presentar los resultados.

**Tabla 6.** Variables y método para análisis de resultados

Variables a tener en cuenta para análisis de resultados					
N°	Parámetro	Descripción	Unidad de medida	Valores Límites permisibles	Presentación de resultado
1	pH	Potencial de Hidrógeno	Unidades de pH	6.00 a 9.00	Líneas de tendencia
2	DQO	Demanda Química de Oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	150.00	Líneas de tendencia
3	DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	50.00	Líneas de tendencia
4	SST	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	50.00	Líneas de tendencia
5	SSED	Sólidos Sedimentables	mL/L	2.00	Líneas de tendencia
6	Grasas y Aceites	-	mg/L	10.00	Líneas de tendencia
7	Fenoles Totales	-	mg/L	0.20	Líneas de tendencia
8	SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
9	HTP	Hidrocarburos Totales	mg/L	10.00	Líneas de tendencia
10	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ortofosfatos	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
11	P	Fósforo Total	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
12	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitratos	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
13	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitritos	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
14	NNH <sub>3</sub>	Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
15	N	Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	N.E	Líneas de tendencia
16	N	Nitrógeno Total	mg/L	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
17	CN <sup>-</sup>	Cianuro Total	mg/L	1.00	Líneas de tendencia
18	Cl <sup>-</sup>	Cloruros	mg/L	250.00	Líneas de tendencia
19	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfatos	mg/L	1200.00	Líneas de tendencia
20	S <sup>2-</sup>	Sulfuros	mg/L	1.00	Líneas de tendencia
21	Al	Aluminio	mg/L	N.E	Líneas de tendencia
22	As	Arsénico	mg/L	0.10	Líneas de tendencia
23	Cd	Cadmio	mg/L	0.05	Líneas de tendencia
24	Zn	Cinc	mg/L	3.00	Líneas de tendencia
25	Cu	Cobre	mg/L	1.00	Líneas de tendencia
26	Cr	Cromo	mg/L	0.50	Líneas de tendencia
27	Fe	Hierro	mg/L	2.00	Líneas de tendencia
28	Hg	Mercurio	mg/L	0.00	Líneas de tendencia
29	Ni	Níquel	mg/L	0.50	Líneas de tendencia
30	Ag	Plata	mg/L	0.50	Líneas de tendencia
31	Pb	Plomo	mg/L	0.20	Líneas de tendencia
32	Acidez Total	-	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
33	Alcalinidad Total	-	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
34	Dureza Cálctica	-	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
35	Dureza Total	-	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
36	Color Real - 436 mm	-	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
37	Color Real - 525 mm	-	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
38	Color Real - 620 mm	-	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Líneas de tendencia
39	pH-Color	-	Unidades	N.E	Líneas de tendencia

Fuente: elaboración propia

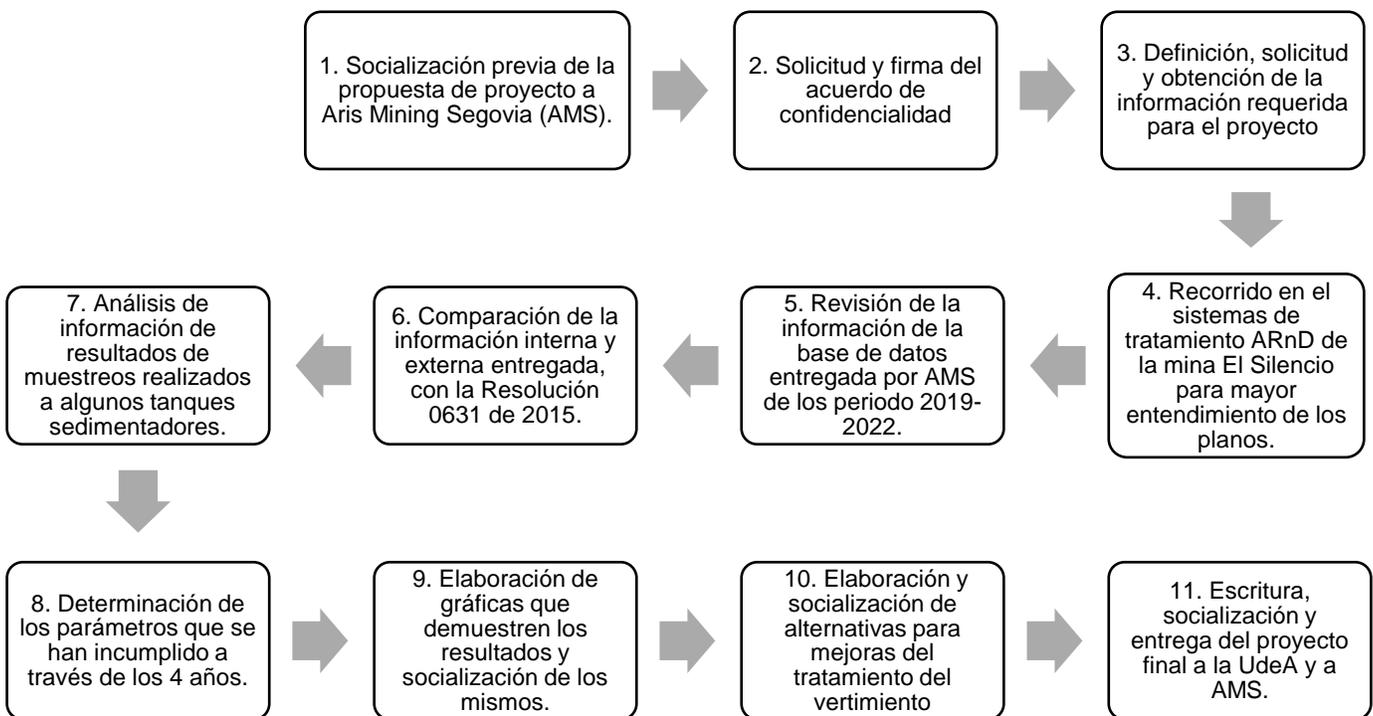
## 8.8. Procedimiento para el logro de los objetivos

- **Socialización previa:** se presenta la propuesta del proyecto a Aris Mining para su aprobación y con el consentimiento de la empresa y el acuerdo de confidencialidad, se inicia su materialización.
- **Trabajo de campo**
  - ✓ **Solicitud de información documental:** para dar cumplimiento a los objetivos específicos, se define la información que se requiere y se solicita a la empresa:
    - Base de datos de los resultados de los monitoreos y seguimientos del vertimiento de la mina El Silencio durante los años 2019 al 2022, tanto los realizados internamente como con contratistas externos.
    - Componentes actuales (2022) del sistema de bombeo de la mina el Silencio (cantidad de tanques, capacidad, ubicación).
  - ✓ **Recorrido en campo:** después de recibir la información documental, se hace un reconocimiento en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la mina (tanques sedimentadores y funcionamiento). **(Figura 37)**  
**PDT.** Es importante mencionar que, no se hizo toma de muestras y análisis, se trabajó con la información suministrada por AMS y lo que se observó durante el recorrido.
- **Análisis de datos:** al recibir la información documental y realizar los recorridos en el sistema de tratamiento de la mina, se consolida por medio de la guía de recolección de datos, se analiza, se tabula y se compara con lo exigido por la normatividad, con esto, se conocen las falencias actuales con las que cuenta la Mina El Silencio en cuanto a tratamiento e incumplimiento normativo.
- **Alternativas:** para este punto, se tiene en cuenta los parámetros fisicoquímicos que sobrepasaron los límites permisibles establecidos en el Artículo 10 de la Resolución 0631 de 2015 en el vertimiento de la Mina El Silencio, y se proponen estrategias que coadyuven al mejoramiento del sistema de tratamiento de ARnD generadas en los procesos de exploración y extracción del mineral. Es importante mencionar que, para la realización de las alternativas, se tiene asesoramiento

académico con el fin de que el direccionamiento de esta esté acorde con los objetivos de formación establecidos en el programa académico.

- **Escritura final del proyecto:** se redacta y se hace entrega del proyecto final tanto a la Universidad de Antioquia como a la Empresa Aris Mining.
- **Socialización final:** los resultados se socializan tanto a AMS como a asesores académicos, coordinadores del programa, jurados y compañeros de clase.

**Figura 3.** Flujograma de proceso de recolección y entrega de proyecto.



Fuente: elaboración propia

## **9. Resultados**

Para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos planteados en este proyecto, se tomaron diferentes acciones que se describen a continuación:

### **9.1. Objetivo #1.**

Describir las fases del tratamiento realizado a las ARnD generadas en el proceso de exploración y extracción del mineral en la mina el Silencio.

#### **9.1.1. Procesos mineros**

Para este objetivo, es necesario dar un enfoque inicial mencionando que en Aris Mining se realizan los procesos de exploración, extracción y beneficio; sin embargo, en la Mina El Silencio solo se efectúan la exploración y la extracción, por tanto, el tratamiento de ARnD está enfocado en sedimentación de sólidos y control de pH, debido a que no se emplean técnicas que impliquen el uso de metales como el cianuro porque este es utilizado en el proceso de beneficio del mineral.

A continuación, se describen las actividades realizadas en cada proceso:

##### **9.1.1.1. Proceso de exploración:**

Como lo adopta el Código de Minas Colombiano, el objetivo de este proceso es establecer y calcular técnicamente las reservas de minerales, la ubicación y características de los depósitos o yacimientos; donde Aris Mining, realiza un seguimiento continuo con el fin de permitir tener un control para que las labores realizadas durante las perforaciones de exploración se desarrollen en el marco de la normatividad ambiental vigente, contando con las acciones necesarias para

prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos ambientales adversos y el fortalecimiento de los efectos considerados como positivos.

Por tanto, el proceso se realiza en diferentes etapas las cuales se describirán a continuación:

- ✓ Selección de ubicación de la cámara (sitio o frente de trabajo que será explorada por medio de máquina perforadora): se realiza recorrido en campo con el fin de identificar puntos de interés y cumplimiento de criterios ambientales. La definición del punto se realiza en conjunto entre las áreas de exploración y ambiental.
- ✓ Construcción de la cámara: en este ítems, lo que se hace es la ampliación de los caminos existentes para el ingreso de la máquina de perforación, en caso de que sea necesario; se adecúa el sitio (nivela terreno) para que la máquina quede totalmente plana; se construye las pozas para el proceso de sedimentación, se perforan los puntos para anclar la máquina y direccionar las perforaciones; se adecúan espacios tanto para almacenamiento de insumos a utilizar, como para los costales con lodos que provendrán de los mantenimientos realizados a las pozas.
- ✓ Perforación de pozos: se realiza la construcción de hoyos en el subsuelo, inyectando fluidos para extraer las muestras de interés (roca). Durante la perforación de pozos se utilizan aditivos y combustibles que se debe almacenar correctamente e implementar sistemas para evitar los derrames y contaminación del suelo o a de las fuentes superficiales.
- ✓ Desmantelamiento y limpieza: se refiere al proceso de retirar todos los elementos, insumos y residuos sólidos generados durante la etapa operativa.
- ✓ Cierre ambiental: el espacio se deja igual a las condiciones en las que se encontraron inicialmente y/o como exija el contratante.

**Figura 4.** Esquema proceso de exploración

Fuente: elaborado en Canva.

#### 9.1.1.2. Proceso de extracción:

El objetivo de este proceso es la obtención del material rocoso que cuenta con valores económicos, por tanto, para llegar a esto se requiere de algunas actividades:

- ✓ Perforación: es la realización de hoyos cilíndricos con máquinas Jackleg en la roca, con el fin de permitir el ingreso del explosivo.
- ✓ Voladura: es la acción que se realiza de fracturar la roca por medio de explosivos.
- ✓ ABC Minero: en Aris Mining, es llamado de esta manera a las actividades de Ventilar, Regar y Desabombar, las cuales por seguridad se realizan después de la voladura; donde ventilar es ingresar aire para dispersión de gases al punto donde se realizó la voladura, permitiendo un buen sistema de climatización, además que los gases se encuentren dentro de los límites permisibles para trabajar; regar es esparcir abundante agua en la frente de trabajo en la que se realizó la voladura, esto con el fin de minimizar la presencia de gases, la fractura de rocas y tiros fallidos y en cuanto a desabombar, consiste en forzar la caída de rocas que se encuentran ligeramente desprendidas o facturadas del techo o labor minera subterránea y que pueden caer de improvisto.

- ✓ Cargue y transporte interno: por medio de equipos mecanizados, se realiza el cargue de las volquetas con el material suelto presente en la frente de trabajo y se transportan a sitios de almacenamiento interno del mineral (tolvas) para su posterior descargue en barriles y evacuación a superficie.
- ✓ Evacuación del material a superficie: se realiza por medio mecánico con una elevadora, la cual eleva el barril con el mineral hacia superficie, posteriormente se almacena en una tolva y por medio de equipos mecanizados se traslada hacia la planta de beneficio de mineral.

**Figura 5.** Esquema proceso de extracción



Fuente: elaborado en Canva.

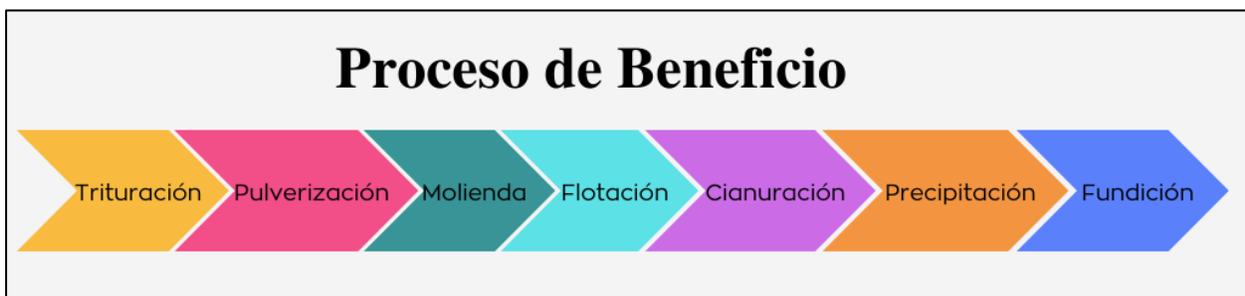
### 9.1.1.3. Proceso de beneficio:

El objetivo de este proceso es aprovechar los minerales que contiene la roca para su comercialización, para lo cual es necesario realizar:

- ✓ Trituración: es la actividad donde se reduce el tamaño de la roca a una granulometría ideal para la pulverización.
- ✓ Pulverización: consiste en reducir la roca entregada en trituración a la mitad para poder pasar por la molienda.
- ✓ Molienda: actividad donde se ingresa el agua con la roca pulverizada hacia el molino, allí, se encuentran unos cuerpos moledores (bolas de manganeso) que, cuando el molino gira, golpean el mineral haciendo que disminuya aún más su tamaño, dejando libres sulfuros y partículas de oro libre.

- ✓ Flotación: proceso fisicoquímico de separación de minerales, donde se utilizan reactivos, y por medio de agitación y aire se logra recuperar los sulfuros que hay en el mineral.
- ✓ Cianuración: el resultante de la actividad de flotación pasa a lixiviación en donde por medio de cianuro el material sufre un cambio de sólido a líquido, el cual se hace mediante la agitación, aportando oxígeno y cal, este último para controlar el pH, el cual debe estar entre 10 a 11, ya que siendo menor puede producir un gas mortal, llamado Gas Cianhídrico.
- ✓ Precipitación: se utiliza el proceso llamado Merrill Crowe, donde se aplica polvos de Cinc a la solución resultante de lixiviación, ya que el Cinc se encarga de retirar los cianuros y busca la separación de los metales nobles (oro y plata), convirtiéndolo en masa; el líquido sobrante, el cual contiene cianuro con concentraciones de cinc, pasa a un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales.
- ✓ Fundición: lo resultante de la precipitación es secado completamente en horno y se homogeniza con reactivos como el Bórax, Fundente, Nitrato de Plata y Sílice, posteriormente se almacena en canecas metálicas y se ingresa a un horno a una temperatura entre 1200 a 1500 °C, lo que hace que este material realice un proceso de licuación, evaporación, quedando como producto final un líquido que es vaciado en una lingotera, molde, donde el material comercial, oro y plata, por su peso, queda en la parte baja y en la parte alta queda la escoria, la cual es dispuesta como residuo peligroso, ya que no contiene valor económico.

**Figura 6.** Esquema de proceso de beneficio



Fuente: elaborado en Canva.

Conociendo ya los procesos mineros, a continuación, se presentará el tratamiento actual implementado en las aguas residuales no domésticas de la Mina El Silencio, las cuales son provenientes de las actividades de exploración y extracción.

### **9.1.2. Tratamiento implementado en la mina El Silencio en el proceso de exploración y extracción**

#### **9.1.2.1. Memoria descriptiva sistema de bombeo**

En la actualidad la Mina El Silencio cuenta con 17 estaciones de bombeo, compuestas por 22 bombas que trabajan algunas en serie y otras en paralelo, en una operación en la línea principal y una potencia instalada de 2963 HP/2209 kW con la cual se bombea a superficie un promedio de 1250 GPM.

Se cuenta con 15 depósitos de agua en total.

A continuación, se describe el funcionamiento desde superficie hasta los niveles de profundización, cabe resaltar que el sistema actual es un sistema ascendente de transporte de agua de los niveles inferiores hacia el Nivel 0.

El sistema principal se ubica sobre el apique 0; la primera estación de bombeo se encuentra en el Nivel 7 que evacúa el agua a superficie, está compuesta por una bomba marca Sihi de 200 HP y una bomba marca Hidromac de 150 HP que trabajan 16 horas al día y tienen un consumo de 148 kWh cada una, la estación cuenta con un tanque de almacenamiento de agua con capacidad de 91 m<sup>3</sup> que recibe la descarga de bombas del Nivel 16.

En el nivel 16 se cuenta con dos unidades Hidromac 2193 acopladas cada una a un motor de 200 HP, con un consumo de 147 kWh y que trabajan 17 horas al día cada una, cuenta con un tanque con una capacidad de 409 m<sup>3</sup>, este tanque es de vital importancia para el sistema hidráulico ya que acá se vierten aguas de filtraciones de niveles superiores, operaciones aledañas y la descarga de las bombas del Nivel 19 que

aportan un alto grado de acidez en la calidad de agua. En promedio se bombean 1077 GPM hacia el tanque del Nivel 7 por dos líneas en paralelas de Ø6".

En el Nivel 19 se tiene una bomba Sihi de 200 HP y una Hidromac 2196 de 150 HP que trabajan 19 horas al día, es una estación de paso del agua que proviene del Nivel 23, esta estación tiene un consumo de 146,5 kWh y descarga hacia el tanque del Nivel 16 en dos líneas paralelas de Ø6" y bombean aproximadamente 1076 GPM.

En el Nivel 23 se tiene un tanque de 273 m<sup>3</sup> aproximadamente y opera una bomba Sihi de 250 HP, recibe la descarga del bombeo del Nivel 28-450 y 30-0, el tiempo de operación es de 19 horas al día con un caudal de 1480 GPM y una presión de descarga de 140 psi, un consumo de 203 kWh y descarga al tanque del Nivel 19 por una línea de Ø8". Se está en proceso de instalación de una segunda bomba para contar con mayor capacidad de bombeo ya que dicho tanque es el llamado corazón del bombeo de la mina, por tanto, en la **Figura 7**, se resalta de color rojo. Es importante resaltar que, en este tanque, se cuenta con un proyecto para realización de pruebas con coagulante y floculante para el tratamiento de los sólidos.

El Nivel 30 cuenta con un tanque de 170 m<sup>3</sup>, este depósito capta aguas del apique 0 y su descarga es en el tanque del Nivel 23 con una línea de Ø4", allí funciona una bomba Durco de 200 HP y bombea un aproximado de 630 GPM con una presión de descarga de 270 psi, consume 107 kWh 5 horas al día.

El Nivel 28- 450 no tiene depósito pertenece a un circuito en serie y recibe la descarga del Nivel 31 por una línea de Ø8" opera con una bomba Sihi de 200HP con un caudal de 1250 GPM descarga al tanque del 23 con una línea de Ø8" y una presión de 190 psi, tiene un consumo de 176 kW trabajando 5 horas al día.

En el Nivel 31 tampoco cuenta con depósito, opera una bomba Sihi de 200HP que está conectada en serie con la del Nivel 28-450 trabaja las mismas 5 horas al día, con una línea de Ø8" y recibe la descarga del Nivel 34 ½ con una línea de succión de Ø8", tiene un consumo de 183 kWh con un caudal de 1250 GPM y una presión de descarga de 155 psi.

En el Nivel 34 ½ -450 se tiene un tanque con capacidad de 273 m<sup>3</sup> aproximadamente, recibe la descarga del Nivel 39, cuenta con una bomba Hidromac de 200 HP y bombea 1250 GPM m con una presión en la descarga de 150 psi por una línea de Ø8”.

En el Nivel 39-450 opera una bomba Sihi de 200 HP con una capacidad de bombeo de 1200 GPM con una presión de descarga de 130 y una línea Ø8 “, de psi cuenta con un tanque de almacenamiento de 228 m<sup>3</sup> que recibe aguas de los Niveles 42-550,40-485,45-400.

En el Nivel 40 -485 se tiene una capacidad de almacenamiento de 4,5 m<sup>3</sup> recoge las aguas del fondo del apique 485 y descarga al tanque del Nivel 39, opera una bomba Barnes de 15 HP con un caudal de 270 GPM por una línea de descarga de Ø4’ ‘, esta trabaja en promedio 1,6 horas al día.

En el fondo del apique 400 en el Nivel 43 se ubican dos bombas Durco de 150 HP cada una, con una capacidad de bombeo de 650 GPM cada una, así mismo una presión de descarga de 280 psi y un consumo promedio de 161 kWh, operando 1,64 horas al día y la otra 4, 2 y su descarga es en el tanque del Nivel 39 por una línea de Ø4”, allí se captan las aguas de los niveles inferiores, este tanque tiene una capacidad de 181 m<sup>3</sup>.

En los niveles inferiores se encuentran bombas de menor potencia que se ubican en los diferentes frentes de trabajo los cuales descargan en el tanque del Nivel 43.

En las estaciones donde se cuenta con tanque como infraestructura se realiza un procedimiento básico de sedimentación de sólidos como parte del tratamiento del agua y adicionalmente se cuenta con una estación en el Nivel 5 donde se dosifica cal y se descarga en el tanque del nivel 7 para el mejoramiento del nivel de acidez aportado por las labores superiores y aledañas.

Lo anterior se complementa con un plan anual de limpieza de tanques, el cual se relaciona en la **Tabla 8**, esto se hace con el fin de garantizar la calidad de agua.

Se relacionan registros de lo mencionado referente al bombeo de la Mina El Silencio:

En la **Tabla 7** se relaciona la información de ubicación (tanto nivel de la mina, como los m s. n. m), capacidad, tiempo de llenado, descripción y periodicidad de limpieza de cada depósito-tanque de la mina El Silencio.

**Tabla 7.** Información del sistema de bombeo

Descripción de fases del tratamiento.					
Items	Ubicación depósito-tanque (m s.n.m)	Capacidad de almacenamiento (m3)	Tiempo de llenado (minutos)	Descripción de bombeo	Periodicidad de limpieza
1	Nivel 7 (636.3 m s.n.m)	90.85	20	Recibe agua del nivel 16 por medio de dos líneas de tubería con un diámetro de 6".	1 vez al año
2	Nivel 16 (505.3 m s.n.m)	408.82	90	Recibe agua del nivel 19 por medio de dos líneas de tubería con diámetro de 6"	No es posible la limpieza
3	Nivel 19 (446.5 m s.n.m)	454.20	7	Recibe agua del nivel 23 por medio de tubería de 8"	No es posible la limpieza
4	Nivel 23 (361.1 m s.n.m)	272.55	60	Recibe el bombeo del nivel 28-450 y 30-0	1 vez al año
5	Nivel 30-0 (206.4 m s.n.m)	170.32	90	Recibe agua del apique cero y descarga al 23 por medio de tubería de 4"	1 vez al año
	Nivel 28-450 (265.3 m s.n.m)	No tiene deposito (circuito en serie)		Recibe el agua del nivel 31	
	Nivel 31-0 (178 m s.n.m)	No tiene deposito (circuito en serie)		Recibe el agua del nivel 34.	
6	Nivel 34.5 - 450 (91.4 m s.n.m)	272.55	60	Este depósito recibe agua del nivel 39.	1 vez al año
7	Nivel 39-450 (10.05 m s.n.m)	227.12	120	Este depósito recibe agua del nivel 42-550,40-485,45-400	2 veces al año
8	Apique Nivel 40-485 (-16.7 m s.n.m)	4.50	30	Recibe las aguas del nivel y descarga al punto de bombeo del nivel 39.	1 vez al año
9	42-550 (-63.7 m s.n.m)	1271.00	240	Recibe las aguas del nivel y descarga al punto de bombeo del nivel 39.	Se hace según necesidad
10	43-195 (-89.1 m s.n.m)	181.00	120	Recibe las aguas de ese nivel y descarga al 45-400	Se hace según necesidad
11	45-400	476.00	180	Capta el agua de los niveles inferiores.	1 vez al año
12	45.5- 400	2.00	15	Recibe aguas del nivel y descarga 45-400	Se hace según necesidad
13	46-400	181.00	120	Descarga las aguas al 45.5 - 400	1 vez al año
14	46.5 - 400	4.00	25	Instalada en serie con la bomba del 45.5	No es posible la limpieza
15	47-400	2.00	15	Bombea agua del fondo y la descarga en el 45-400	Se hace según necesidad

Fuente: elaboración propia

En la **Tabla 8** se relaciona el cronograma de limpieza de los depósitos de agua de la mina El Silencio, donde es importante mencionar que, según información de la mina, en el mes de diciembre no realizan limpiezas porque el personal disminuye y las labores

ejecutadas son menores, sin embargo, se encuentra expuesto en el cronograma, debido a que en caso de que, en la última semana de noviembre, la cual es la última limpieza programada del año, por temas operacionales, no puedan ejecutarlo, lo realizan en la primera semana de diciembre.

Con respecto al mes de enero del año siguiente, se tiene especificado en el cronograma porque finalizando diciembre, se define según prioridades, la fecha del primer tanque a intervenir, donde se puede programar la primera semana del año, según necesidad.

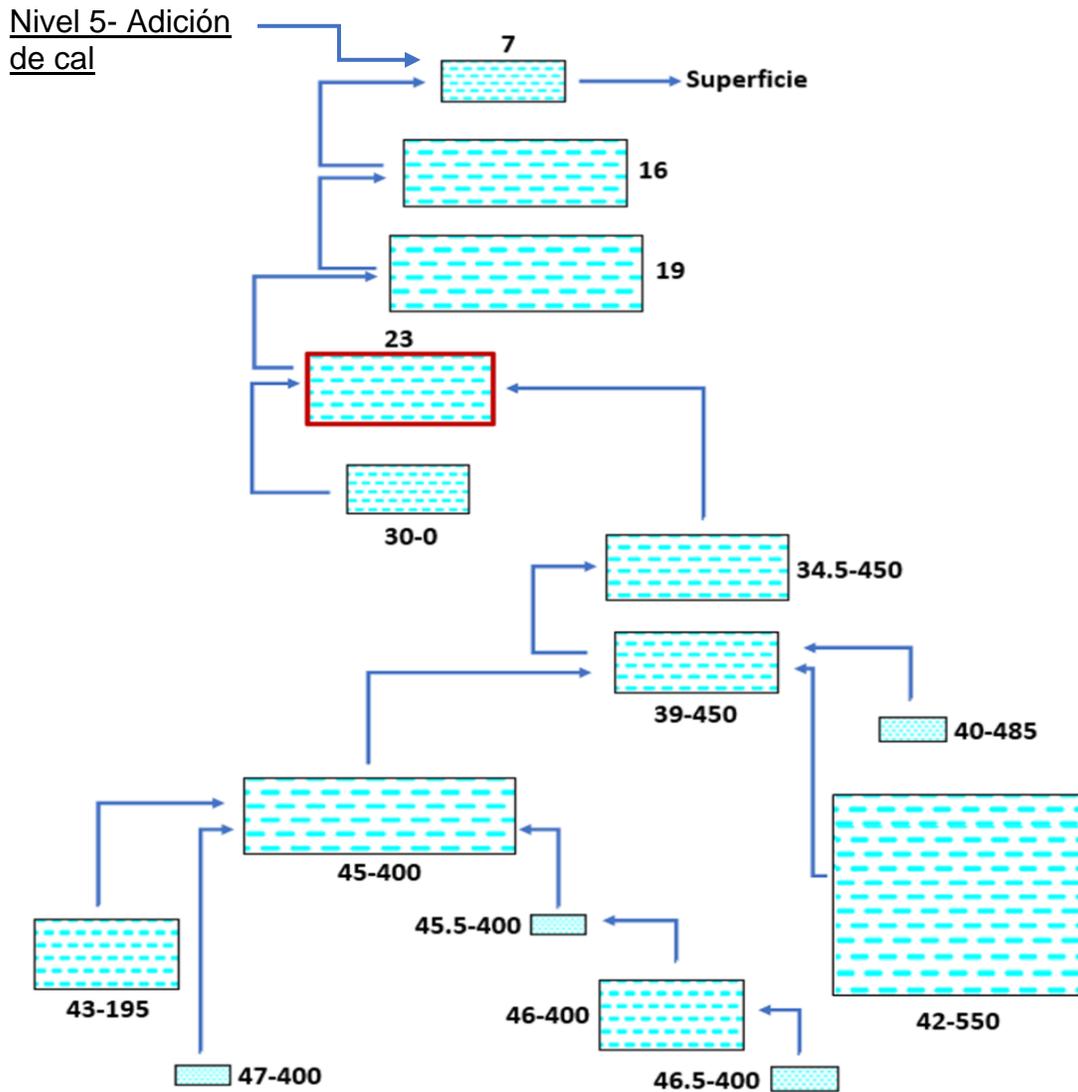
Y en lo que se refiere al total, la mina al finalizar el año realiza la sumatoria de las limpiezas ejecutadas por cada tanque y lo expresan numéricamente.

Se resalta que, el tanque del nivel 19, se interviene según necesidad, por tanto, no se tiene fecha programada para la limpieza.

**Tabla 8.** Cronograma limpieza de depósitos de agua de la mina El Silencio

TANQUE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
7-0					3 semana									
19-0														
23-0							2 semana							
30-0				4 semana										
34-450			2 semana											
39-450		4 semana							2 semana					
40-485											4 semana			
45-400						2 semana								
46-400										3 semana				
47-400	4 semana													

Fuente: elaboración propia

**Figura 7. Unifilar mina El Silencio**

Fuente: elaboración propia

Con la información expuesta anteriormente, se tiene algunas anotaciones como:

- Se cuenta con 15 depósitos de agua en la Mina El Silencio los cuales funcionan como sedimentadores de los sólidos generados en los procesos de exploración y extracción, sin embargo, la mayoría de ellos solo cuentan con 1 compartimiento, lo que no permite la mayor retención de lodos.

- Las limpiezas de los tanques y/o depósitos de agua se realiza en su mayoría 1 vez al año
- El tanque del nivel 23 es el tanque principal, llamado el “corazón del bombeo” de la mina.
- Los depósitos de los niveles 30-0, 40-485, 42-550, 43-195, 46.5 – 400 y 47-400, son independientes, almacenan agua de su mismo nivel.
- El proceso de ajuste de pH se realiza manualmente, donde en el nivel 5 se cuenta con un tanque plástico de una capacidad de 250 litros de agua; en este se prepara aproximadamente 2 kilogramos de cal hidratada cada 4 minutos, se agita y por método de gravedad y tubería de 1 pulgada, se conduce el agua dosificada al tanque que envía el agua a superficie, ubicado en el nivel 7 con el propósito de que disminuya la acidez y sea vertida dentro de los valores de referencia exigidos por la normatividad (Art.10 de la Resolución 0631 de 2015).

Es importante resaltar que, los primeros tanques que se fueron construyendo en la Mina El Silencio, fue de acuerdo a la profundidad y frentes de trabajo que se iban abandonando, ya que en estos espacios los dejaban como depósitos, para poder hacer el bombeo a superficie y también por la preocupación de las personas responsables por mejorar la calidad de agua vertida; sin embargo, antes de la Resolución 0631 de 2015, no había un valor máximo permisible específico para el vertimiento de sólidos a fuentes hídricas en Colombia, sí existían algunos requisitos ambientales generales que establecían pautas para la gestión de aguas residuales y la protección de los recursos hídricos, pero no valores de referencia, lo que dio lugar a la poca preocupación para la realización de mejores sistemas que permitieran la mayor retención de estos sólidos.

## **9.2. Objetivo #2.**

Analizar los resultados de la información de los monitoreos internos y externos realizados al vertimiento de ARnD de la mina El Silencio, durante el periodo 2019-2022.

Para el cumplimiento de este objetivo, se toman los registros entregados por la empresa y se consolidan en la guía de recolección de datos, tanto externos como internos, se comparan con respecto a la Resolución 0631 de 2015 para verificar las variaciones con el pasar de los cuatro años y se revisa si se han implementado estrategias que permitan los cambios o correcciones de los parámetros que se han estado incumpliendo.

### **9.2.1. Información externa mina El Silencio**

Para esta información externa fue necesario indagar en la base de datos que fue entregada por el área de Asuntos Ambientales de Aris Mining, encontrando que, durante los cuatro años, desde el 2019 hasta el 2022, se ejecutaron ocho monitoreos distribuidos de la siguiente manera:

- Tres en el 2019, uno contratado por el titular minero y dos como seguimiento y control por parte de la Corporación Autónoma Regional (CORANTIOQUIA); donde es importante mencionar que, la compañía minera no realizó el 2do monitoreo contratado del año por temas de Pandemia, Covid 19; los monitoreos realizados por la corporación no contaron con resultados de pH, Grasas y Aceites, Hidrocarburos, Ortofosfato, Nitrógeno, Aluminio, Acidez, Alcalinidad, pH-color.
- Al continuar la crisis sanitaria, solo fue posible realizar un monitoreo en el año 2020, el cual fue contratado en el mes de diciembre por Aris Mining.
- Para los años 2021 y 2022, se cumplió con los dos monitoreos semestrales para cada año

Por tanto, en la **Tabla 9** se ilustran los resultados obtenidos en cada monitoreo compuesto, los cuales fueron ejecutados durante 24 horas. Se resalta de color rojo los parámetros que al compararlos con la Resolución 0631 de 2015, no cumplieron con los valores de referencia establecidos, mencionando que, del 100% de los monitoreos ejecutados en los cuatro años, los parámetros que estuvieron por fuera de norma en al menos un 50% de estos, fueron: pH, SST, SSED, Grasas y Aceites, Cadmio, Cinc, Hierro y Plomo.

Tabla 9. Datos externos consolidados.

Guía de Recolección de datos_ Monitoreos Externos											
			Nombre de la empresa			Aris Mining-Mina El Silencio					
			Nombre del observador			Sirley Johana Serna Betancur					
			Giro de la empresa			Empresa de minería aurífera					
Obj	Evaluar los resultados de los parámetros analizados en el vertimiento minero de la mina El Silencio con personal externo de la compañía, en los años del 2019 al 2022, comparándolos entre sí según años y relacionándolos con los límites permisibles exigidos por la normatividad ambiental.										
N°	Parámetro	Unidades	Límite máximo permisible	Junio	Septiembre	Octubre	Diciembre	Agosto	Noviembre	Junio	Diciembre
				2019	2019	2019	2020	2021	2021	2022	2022
				Analquim	Corantioquia	Corantioquia	Analquim	Analquim	Analquim	Analquim	Analquim
1	pH min	Unidades de	6.00	4.07			4.87	4.20	5.78	6.77	5.28
	pH máx	pH	9.00	10.00			8.79	9.87	8.90	9.03	9.36
2	Demanda Química de Oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	150.00	24.00	19.90	33.10	35.00	<5.00	48.00	7.00	21.00
3	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	50.00	4.00	<2.00	<2.00	21.00	<2.00	30.00	<2.00	15.00
4	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	50.00	242.00	165.00	216.00	50.00	197.00	183.00	175.00	98.00
5	Sólidos Sedimentables Mínimo	mL/L	2.00	<0.10	24.00	32.00	14.00	0.40	4.00	5.00	<0.10
	Sólidos Sedimentables Máximo			60.00	24.00	32.00	35.00	39.00	36.00	44.00	20.00
6	Grasas y Aceites	mg/L	10.00	12.00			<6.00	14.00	12.00	8.00	<6.00
7	Fenoles Totales	mg/L	0.20	0.13	<0.05	<0.05	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07
8	Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	<0.07	<0.10	<0.10	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07
9	Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10.00	<10.00			<10.00	<10.00	<10.00	<10.00	<10.00
10	Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte	<0.03			<0.03	<0.30	<0.03	0.11	<0.03
11	Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	<0.10	0.18	0.28	<0.10	<0.05	<0.05	0.10	<0.05
12	Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte	4.10	5.27	10.90	4.30	4.60	5.20	5.60	6.40
13	Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte	0.05	<0.02	0.02	0.13	0.06	0.01	0.14	0.11
14	Nitrógeno Amoniacal (NNH <sub>3</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte	0.90	<5.00	<5.00	2.00	1.96	2.80	4.20	2.50
15	Nitrógeno Total Kjeldahl (N)	mg/L	N.E	<3.30	<5.00	<5.00					
16	Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	5.30			7.20	7.50	8.80	11.30	9.60
17	Cianuro Total (CN)	mg/L	1.00	<0.02	<0.05	<0.05	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
18	Cloruros	mg/L	250.00	15.50	12.90	15.10	14.60	18.00	20.00	23.20	16.50
19	Sulfatos	mg/L	1200.00	806.80	1070.00	872.00	259.10	320.20	694.60	539.80	295.00
20	Sulfuros	mg/L	1.00	<0.80	1.65	<1.00	<0.80	<0.80	<0.80	<0.80	<0.80
21	Aluminio (Al)	mg/L	N.E	0.16			1.06	1.12	5.97	0.08	0.66
22	Arsénico	mg/L	0.10	<0.00	0.00	0.02	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
23	Cadmio	mg/L	0.05	0.86	0.96	1.28	1.20	0.82	0.80	0.01	1.13
24	Cinc	mg/L	3.00	19.40	30.10	34.50	20.60	15.62	15.97	3.89	<0.02
25	Cobre	mg/L	1.00	0.16	0.20	0.23	0.21	0.07	<0.05	0.22	0.13
26	Cromo	mg/L	0.50	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.04	<0.04	<0.40	<0.04
27	Hierro	mg/L	2.00	2.81	2.70	6.69	2.00	1.00	0.22	2.80	2.00
28	Mercurio (Hg)	mg/L	0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
29	Níquel	mg/L	0.50	0.15	0.13	0.12	0.19	<0.05	<0.50	0.17	0.12
30	Plata (Ag)	mg/L	0.50	<0.05	<0.10	<0.10	<0.05	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
31	Plomo	mg/L	0.20	1.30	1.61	1.87	1.57	0.78	0.66	1.67	1.37
32	Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	13.00			34.00	27.00	27.00	14.00	13.00
33	Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	37.00			16.00	51.00	33.00	22.00	30.00
34	Dureza Cálctica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	685.00	684.00	739.00	607.00	871.00	257.00	802.00	548.00
35	Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	865.00	884.00	910.00	847.00	1148.00	314.00	893.00	724.00
36	Color Real - 436 mm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	0.10	0.09	0.03	1.60	0.10	0.10	0.30	0.30
37	Color Real - 525 mm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	0.00	0.07	0.03	1.60	0.00	0.00	0.20	0.20
38	Color Real - 620 mm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	0.00	0.05	0.02	1.60	0.00	0.00	0.10	0.20
39	pH-Color	Unidades	N.E	7.60			6.85	6.74	6.74	7.85	6.56

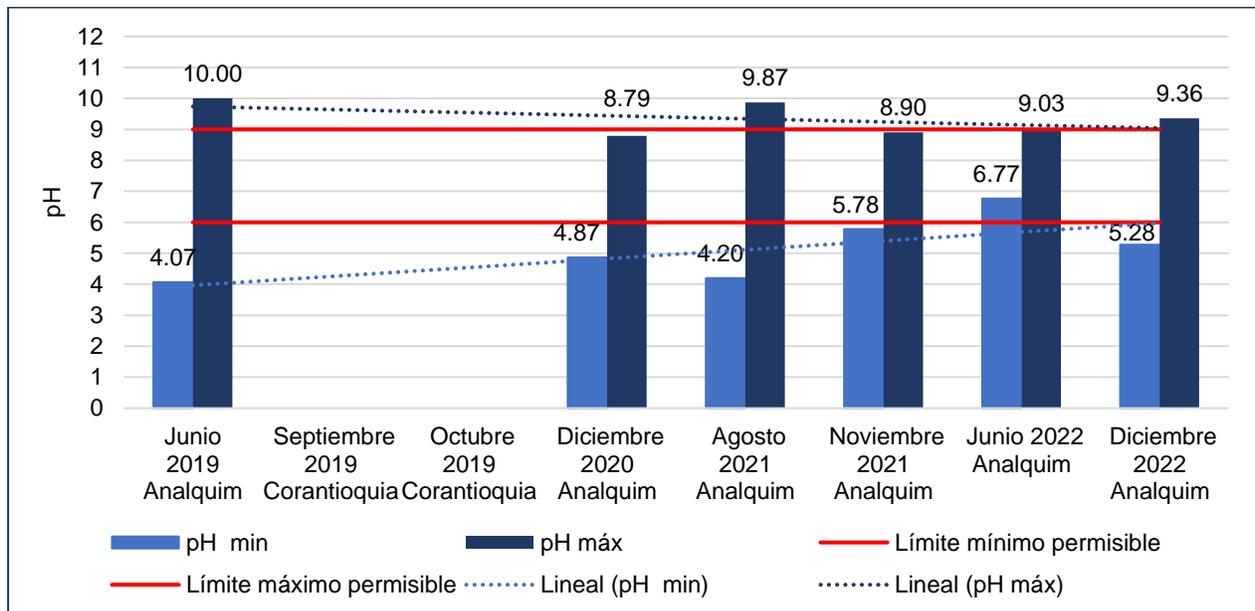
Fuente: elaboración propia

Para la interpretación de cada uno de los gráficos expuestos a continuación, es importante resaltar que las barras reflejan los resultados obtenidos en cada monitoreo, las líneas rojas expresan el límite máximo permisible establecido por la Resolución 0631 de 2015 y las líneas discontinuas, representan cómo ha sido la evolución o el comportamiento de los resultados de cada parámetro a través de los 4 años.

### 9.2.1.1. Potencial de Hidrógeno

Los valores del potencial de Hidrógeno (pH) que se obtuvieron a través de los monitoreos, indica que se encontraron por fuera de los límites permisibles establecidos en la normatividad vigente, ya que, aunque en una de las campañas de los años 2020, 2021 y 2022, se cumplió con al menos uno de los valores de referencia, para la evaluación de cumplimiento general, la autoridad ambiental tiene en cuenta son los valores que estuvieron fuera del límite y así entrega la calificación global de ese parámetro. (Ver **Figura 8**)

**Figura 8.** Potencial de Hidrógeno (pH) – Análisis externo.

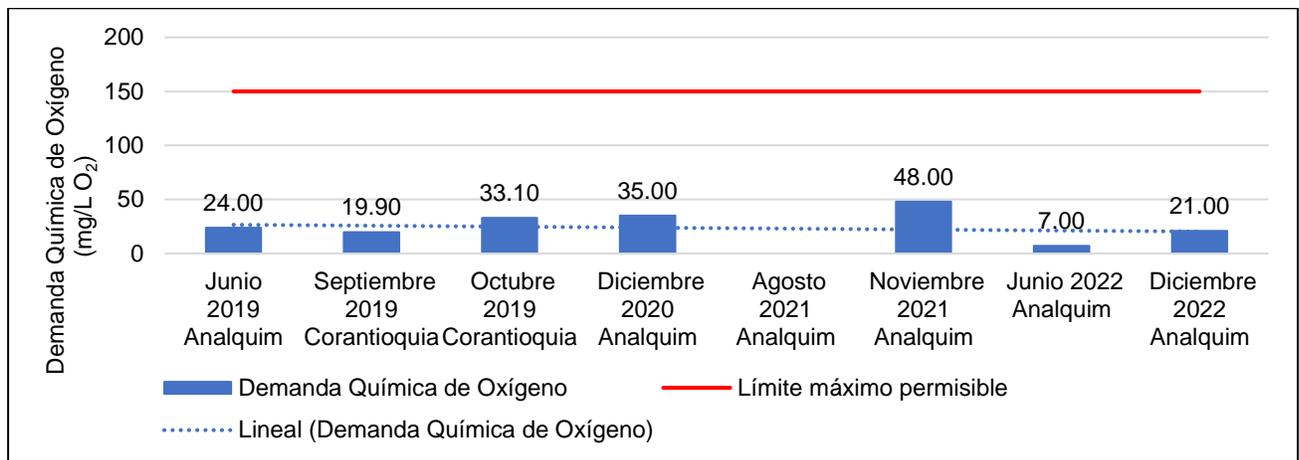


Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.2. Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno.

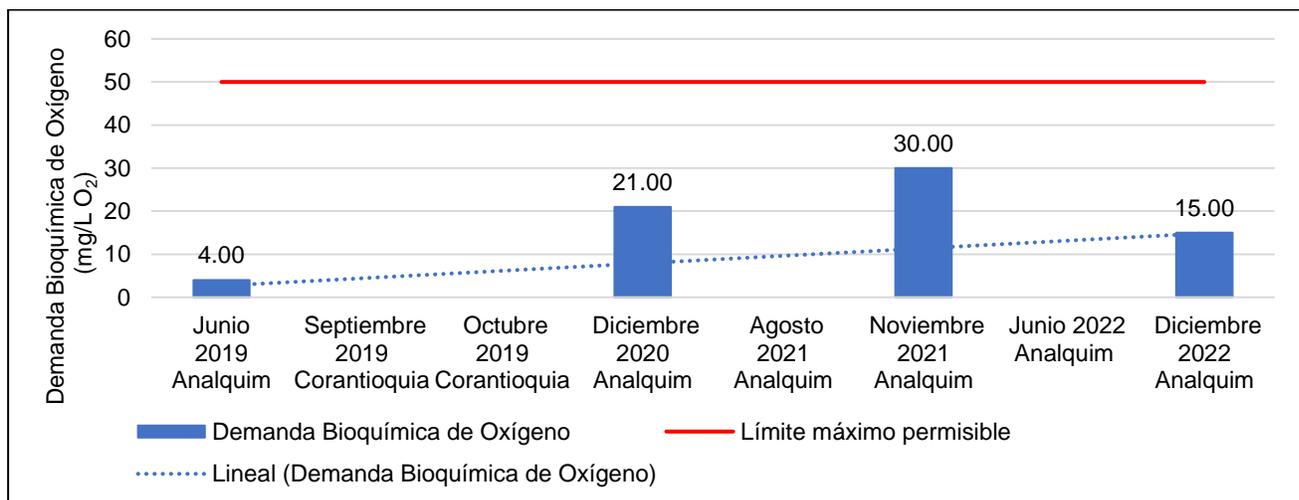
Los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (**Figura 9**) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) (**Figura 10**), indicaron que el contenido de materia orgánica proveniente del efluente minero de El Silencio no implica indicios de contaminación para la fuente receptora, ya que, a través de los cuatro años, no presentaron algún valor fuera del referenciado en la normatividad de vertimientos.

**Figura 9.** Demanda Química de Oxígeno



Fuente: elaboración propia

**Figura 10.** Demanda Bioquímica de Oxígeno



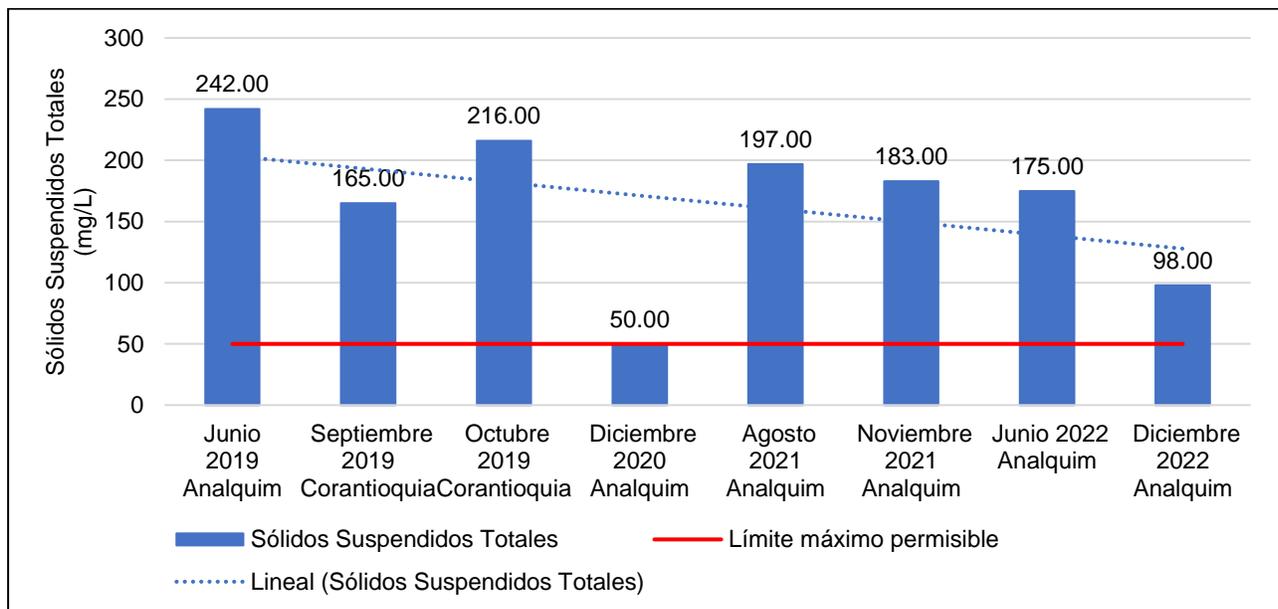
Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.3. Sólidos Suspendidos Totales

Para el año 2020, los sólidos suspendidos totales (SST) se encuentran en el límite máximo permisible, ver **Figura 11**, investigando con la empresa minera, este resultado se dio debido a que los procesos de exploración y extracción se estaban realizando aproximadamente en un 50% de lo habitual, esta situación por temas de emergencia sanitaria (Covid\_19).

Los demás resultados permitieron evidenciar el registro de concentraciones de sólidos suspendidos, superiores al valor de referencia establecido en la Resolución 0631 de 2015.

**Figura 11.** Sólidos Suspendidos Totales – Análisis externo



Fuente: elaboración propia

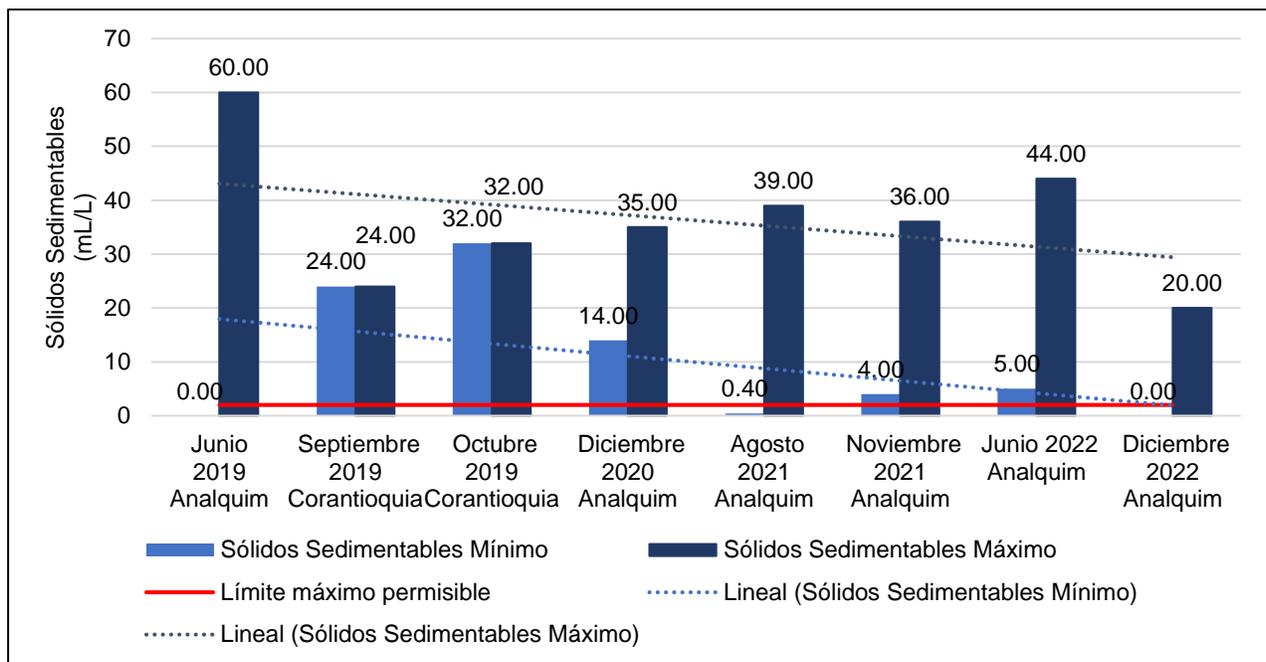
### 9.2.1.4. Sólidos Sedimentables

Al igual que el pH, los sólidos sedimentables (SSED) se analizan en campo como máximo y mínimo, sin embargo, si uno de los resultados se encuentra por fuera del límite, la autoridad ambiental toma el resultado global como

incumplimiento ya que fue una contaminación que se realizó en el momento, por lo que tampoco es pertinente ni aceptable promediarlos.

En la **Figura 12** se muestran los resultados que se obtuvieron durante los ocho monitoreos realizado en cuatro años, donde solo se observó cumplimiento en al menos un valor, en los años, 2020, 2021 y 2022.

**Figura 12.** Sólidos Sedimentables – Análisis externo.



Fuente: elaboración propia

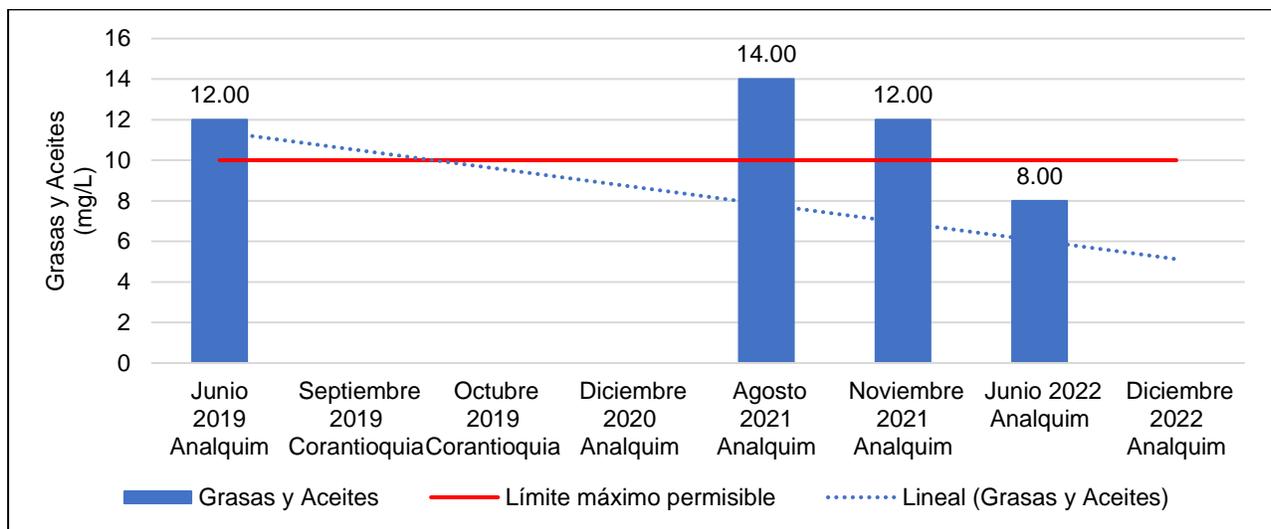
#### 9.2.1.5. Grasas y Aceites.

Como se muestra en la

**Figura 13** de los ocho monitoreos realizados en los cuatro años, seis de estos contaron con resultados de grasas y aceites, de los cuales tres de ellos se encontraron fuera del valor de referencia, uno realizado en la primera campaña de 2019 y los otros dos en las campañas del 2020.

Por lo que es necesario mencionar que la unidad minera en el interior de la mina cuenta con talleres diésel y equipos mecanizados, los cuales requieren de mantenimientos y aunque se tiene una trampa de grasa en los talleres, en ocasiones por temas de operación y fallas mecánicas, se presentan derrames de lubricantes fuera del taller, y aunque se realiza la intervención inmediata de estos incidentes, puede ser una variable que permite la presencia de este tipo de contaminantes en el vertimiento minero.

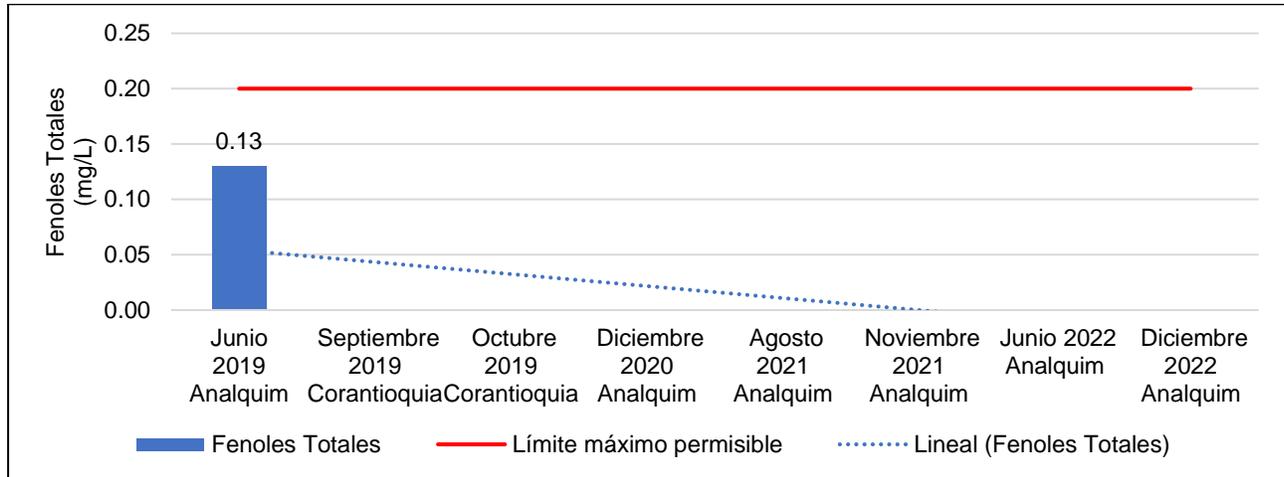
**Figura 13. Grasas y Aceites**



Fuente: elaboración propia

#### 9.2.1.6. Fenoles totales

La presencia de este compuesto orgánico en el agua puede ser perjudicial para la salud humana y causar también una afectación negativa en el medio ambiente; en la Mina El Silencio, las concentraciones de fenoles encontradas en las diferentes campañas de monitoreo no sobrepasaron los 0.20 mg/L, establecidos en la normatividad ambiental, el valor que más concentración mostró sin embargo no sobrepasó los límites, fue el de la primera campaña de 2019, con un dato de 0.13 mg/L; de las demás campañas se obtuvieron valores de 0.05 y 0.07 mg/L. (Ver **Figura 14**)

**Figura 14. Fenoles Totales**

Fuente: elaboración propia

#### 9.2.1.7. Sustancias Activas al Azul de Metileno

Las Sustancias Activas al Azul de Metileno, no cuenta con un límite establecido en la normatividad ambiental de vertimientos, cuenta con una condición de Análisis y Reporte. Sin embargo, la importancia de realizar la identificación de las concentraciones presentes de este elemento en el agua radica en que, al ser un compuesto químico, tener altas concentraciones puede presentar afectaciones en la vida acuática y los ecosistemas.

Los monitoreos realizados durante los cuatro años presentaron resultados menores a 0.10 mg/L; no se anexa gráfico debido a que, en la normatividad, no se cuenta con un número para comparar.

#### 9.2.1.8. Hidrocarburos Totales

Según normativa, los Hidrocarburos Totales presentes en el agua tienen un máximo valor de referencia de 10.00 mg/L, los resultados de los monitoreos en

cuanto a este parámetro, no sobrepasa estos los límites, todos se encuentran por debajo de 10.00 mg/L.

Esto quiere decir que no se presenta riesgos en el medio ambiente por estos compuestos orgánicos en el agua, además, que los procesos con la maquinaria y manejo de estas sustancias se está realizando de manera ambientalmente adecuada.

#### **9.2.1.9. Compuestos de Fósforo y de Nitrógeno.**

La mayoría de los compuestos de fósforo y de nitrógeno, se encuentran en las rocas; (27) (28) los procesos de exploración y extracción al contar con la actividad de perforación de la roca, da lugar a la lixiviación, permitiendo la presencia de estos en las aguas residuales no domésticas, sin embargo, la Resolución 0631 de 2015, no establece un límite de presencia en el agua, cuenta con la condición de Análisis y Reporte.

#### **9.2.1.10. Cianuro Total**

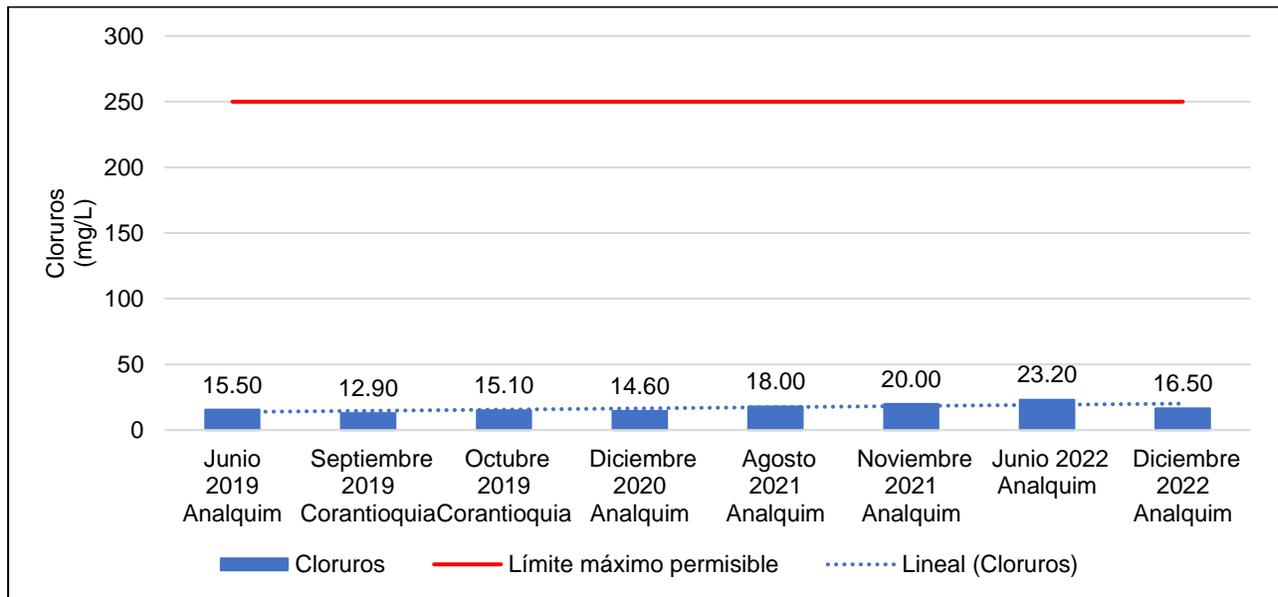
El Cianuro es utilizado en los procesos de beneficio del mineral para la separación del material aurífero de la roca, en la mina El Silencio solo se realizan las actividades de exploración y extracción, por tanto, los resultados de las campañas de monitoreos realizados en el efluente de ARnD, contaron con valores inferiores al límite de referencia (1.00 mg/L).

#### **9.2.1.11. Cloruros**

Los cloruros (Cl<sup>-</sup>) en el agua se puede presentar por diversas situaciones, por el tipo de roca, suelo y por las ARD, la presencia de estos genera diferentes impactos a la salud y al medio ambiente, causando daños en la vida acuática y de

otros organismos. En **Figura 15**, se presenta las concentraciones de Cloruro obtenidas en las campañas de monitoreo del vertimiento minero, las cuales no sobrepasan el límite de referencia.

**Figura 15. Cloruros**

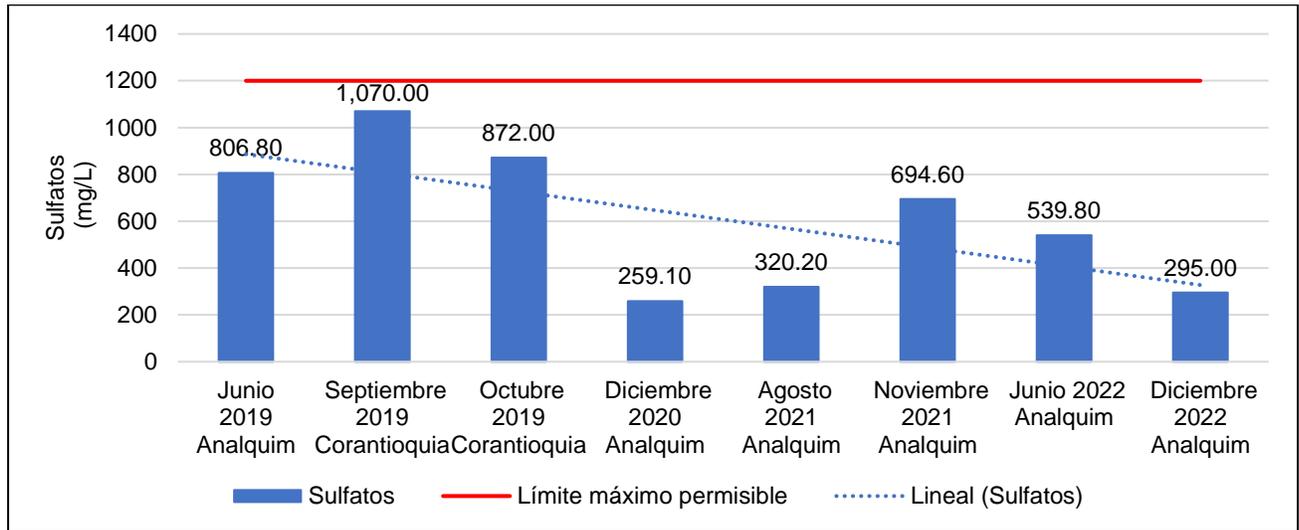


Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.12. Sulfatos

Los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), se encuentran comúnmente en el agua, sin embargo, no es conveniente exceder la concentración de este ion por encima de lo que exige la norma.

Los resultados del ion sulfato en el vertimiento de la mina, cumple con lo permitido, 1200.00 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$ , es importante mencionar que el valor máximo se obtuvo en septiembre de 2019 en un monitoreo realizado por la corporación autónoma regional del territorio, Corantioquia, este fue de 1070.00 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$  y el mínimo fue en el año 2022 en la única campaña realizada el año en mención, presentando una concentración de 259.10 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$ . Se relaciona la **Figura 16** con los resultados obtenidos.

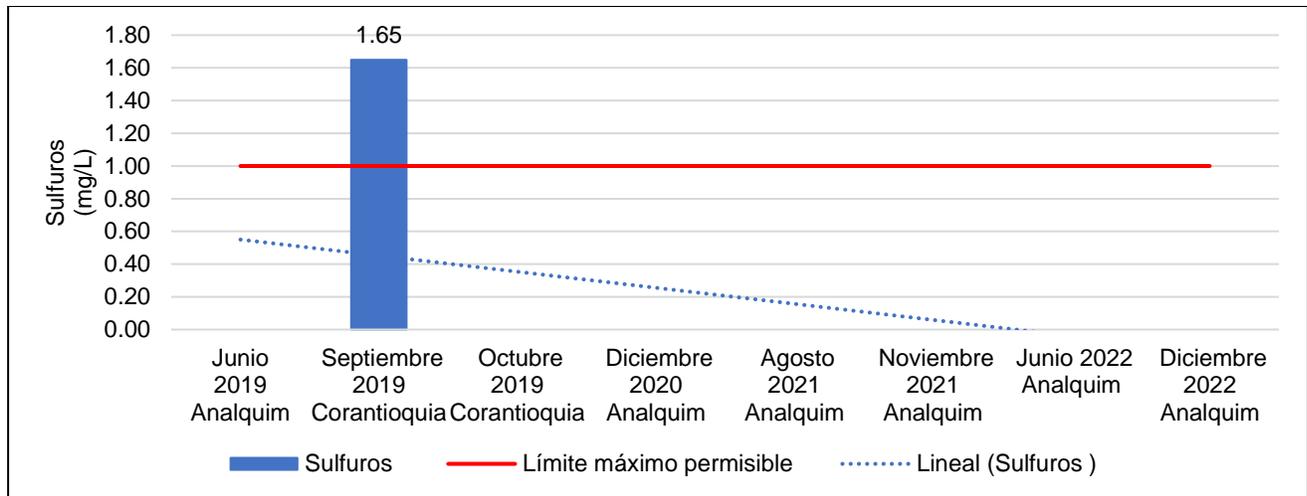
**Figura 16. Sulfatos**

Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.13. Sulfuros

Las concentraciones de sulfuro ( $S^{2-}$ ) reportados en los monitoreos estuvieron por debajo de 1.00 mg/L, en excepción de la campaña de septiembre de 2019 realizado por Corantioquia, donde se reportó un valor de 1.65 mg/L como lo expresa la

**Figura 17.****Figura 17. Sulfuros**



Fuente: elaboración propia

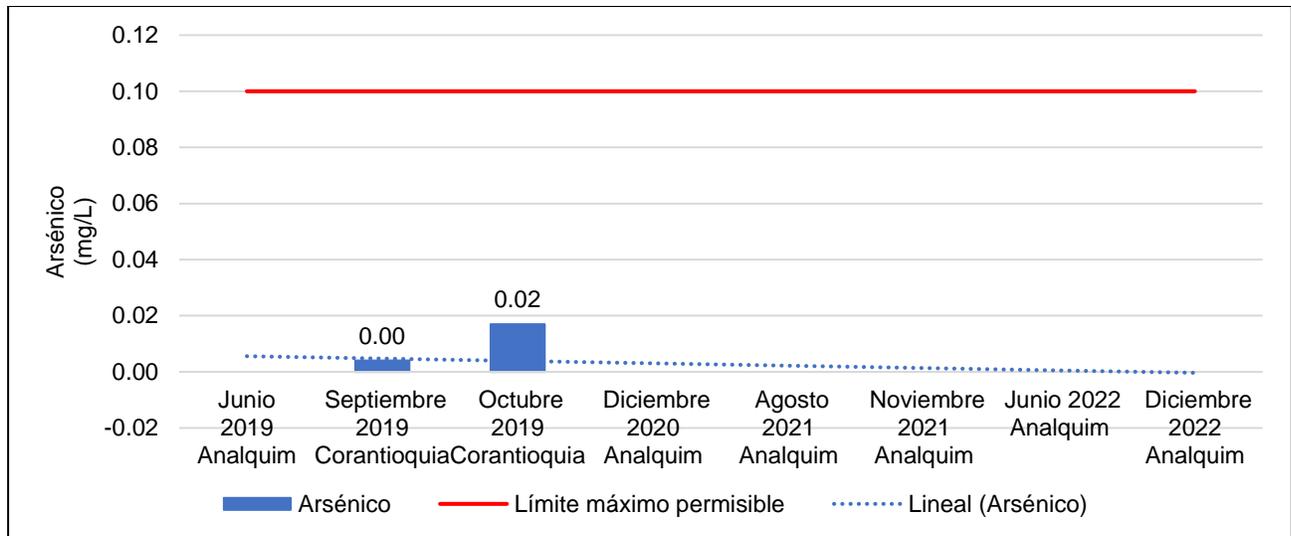
#### 9.2.1.14. Aluminio

El aluminio (Al) es un elemento químico que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre, se estima que en las aguas provenientes de mina también esté presente debido a los procesos de perforación de la roca para extracción del mineral. En la normativa de vertimientos no se encuentra establecido el valor de referencia, se debe Analizar y Reportar.

#### 9.2.1.15. Arsénico

En la **Figura 18** se relaciona la gráfica con los resultados obtenidos a lo largo de los cuatro años monitoreados en la Mina El Silencio, encontrando valores de Arsénico (As) que no presentan riesgo para la salud de las personas ni a los ecosistemas presentes en la fuente hídrica receptora, ya que el valor más alto presentó una concentración de 0.02 mg/L.

**Figura 18.** Arsénico



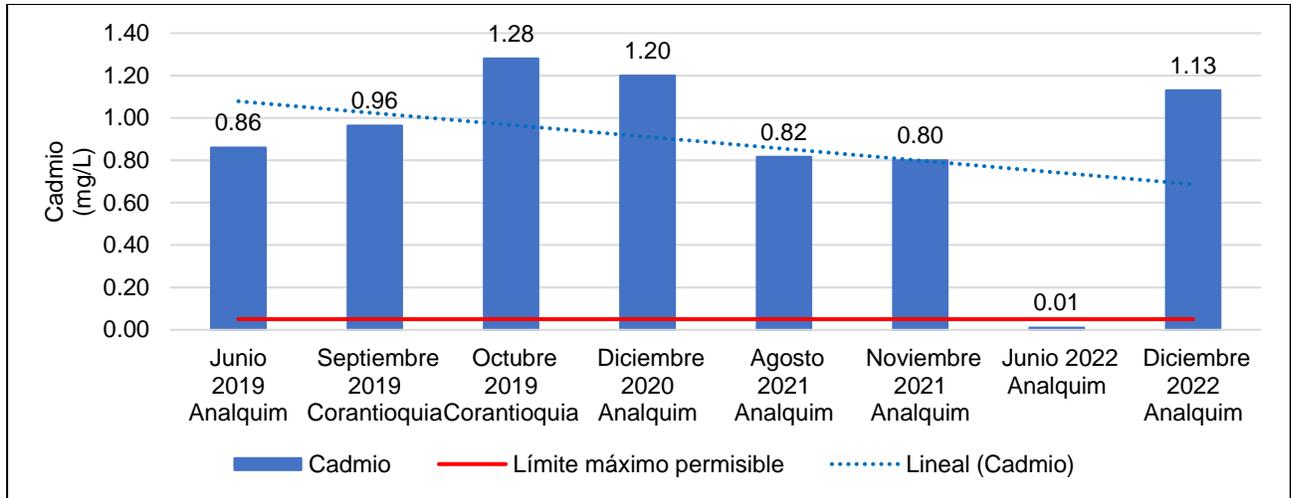
Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.16. Cadmio y Cinc

Los metales como cadmio (**Figura 19**) y Cinc (**Figura 20**) analizados en el vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio, registraron concentraciones altas al compararlos con los valores de referencia establecidos en el artículo 10 de la Resolución 0631 de 2015; ambos cumplieron en solo una campaña de monitoreo de las ocho realizadas durante cuatro años.

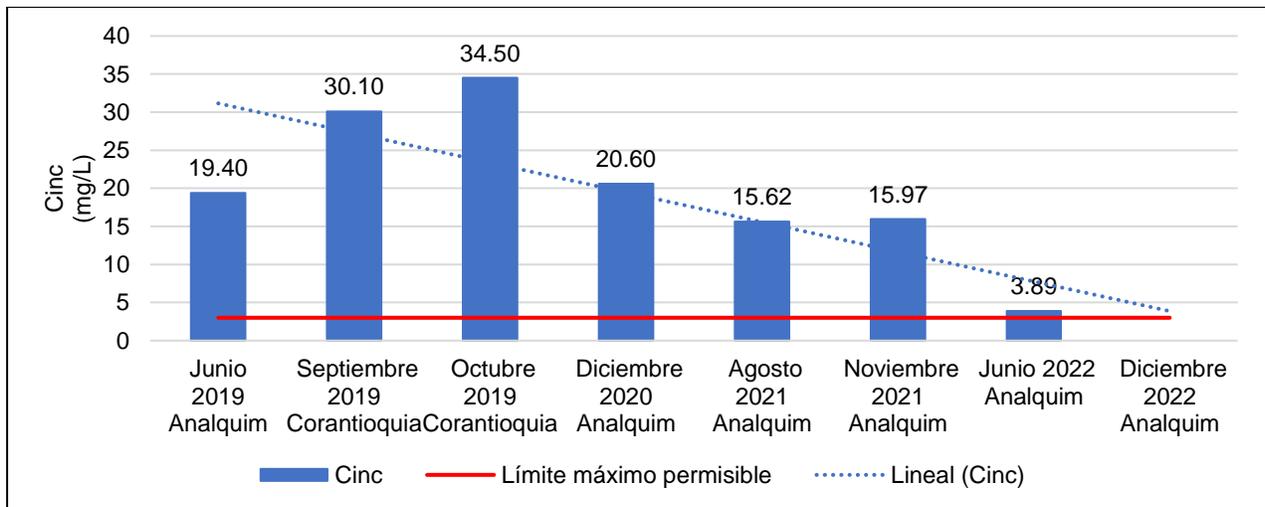
En la primera campaña de monitoreo del año 2022 realizado por el Laboratorio Analquim, la concentración de cadmio fue de 0.01 mg/L y para el cinc de <0.02 mg/L para la segunda campaña de 2022; también realizada por el mismo ente. En ambos casos se presentó cumplimiento por lo exigido en la normatividad, donde la concentración de referencia es 0.05 mg/L Cd y 3.00 mg/L Zn. Los otros resultados producto de los monitoreos de estos dos metales, se encuentran por fuera de lo permitido.

**Figura 19.** Cadmio



Fuente: elaboración propia

**Figura 20. Cinc**



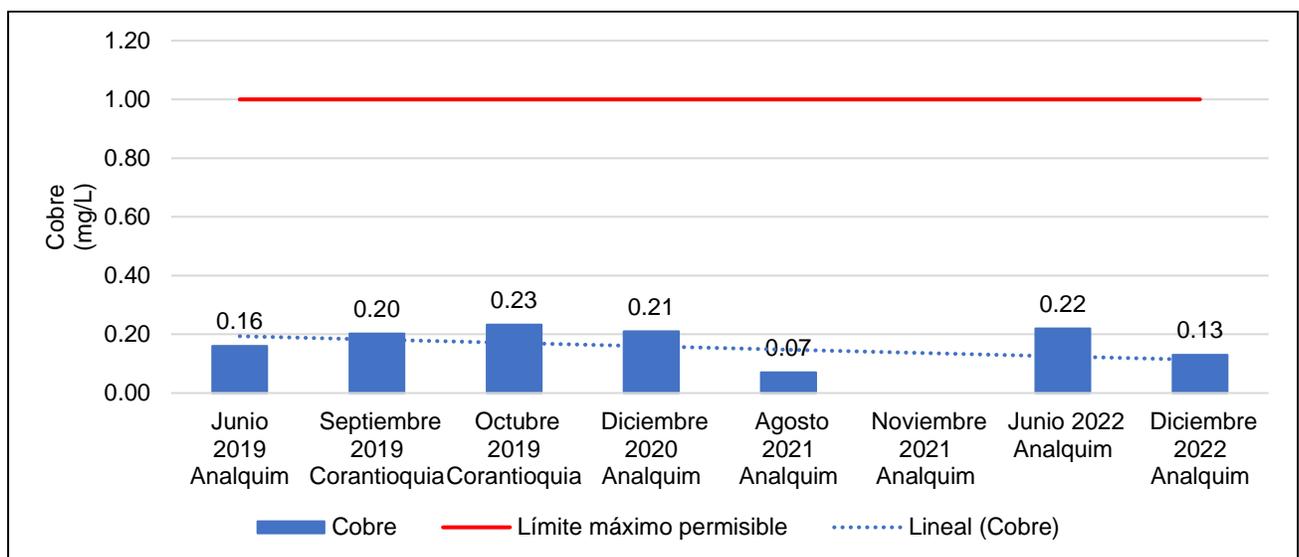
Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.17. Cobre y Cromo

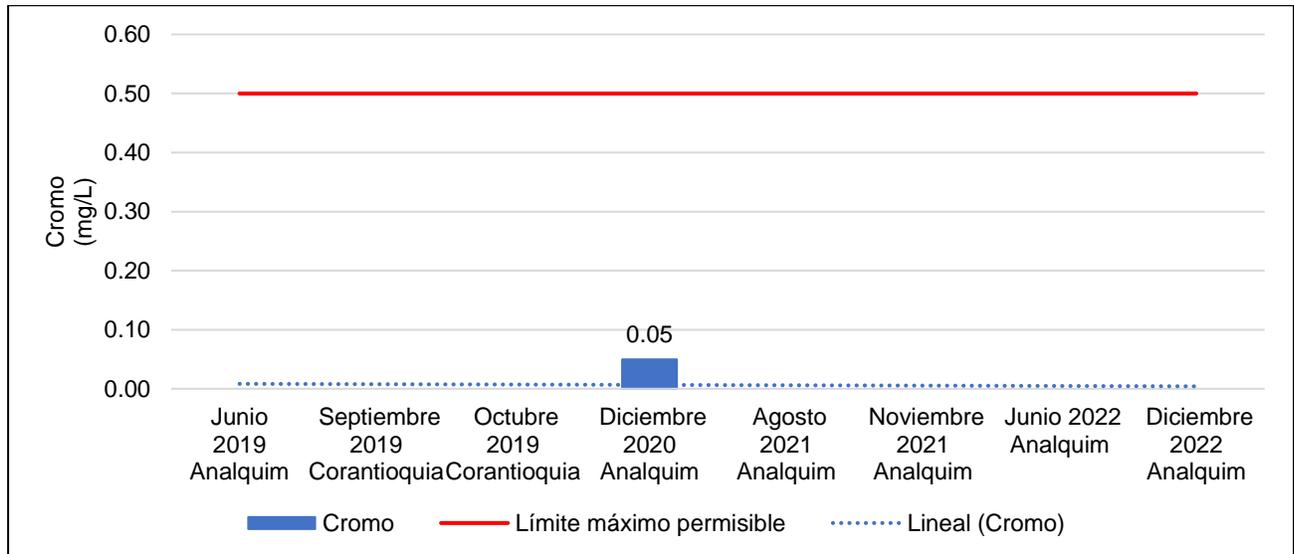
Estos dos metales, cobre (**Figura 21**) y cromo (**Figura 22**) pueden presentarse en el agua de mina de diferentes formas y concentraciones, dependiendo de varios factores, como el tipo de mineral extraído, la ejecución de las actividades de los procesos de exploración y extracción y la calidad del agua subterránea, los cuales al igual que los demás elementos químicos, cuando presentan concentraciones altas son tóxicos para la salud y los ecosistemas acuáticos.

En la **Figura 21** y **Figura 22**, se presentan los resultados obtenidos en las campañas de monitoreo realizado en el vertimiento minero, los cuales se encontraron dentro de los límites que exige la normativa ambiental por lo que no presenta riesgos ambientales.

**Figura 21. Cobre**



Fuente: elaboración propia

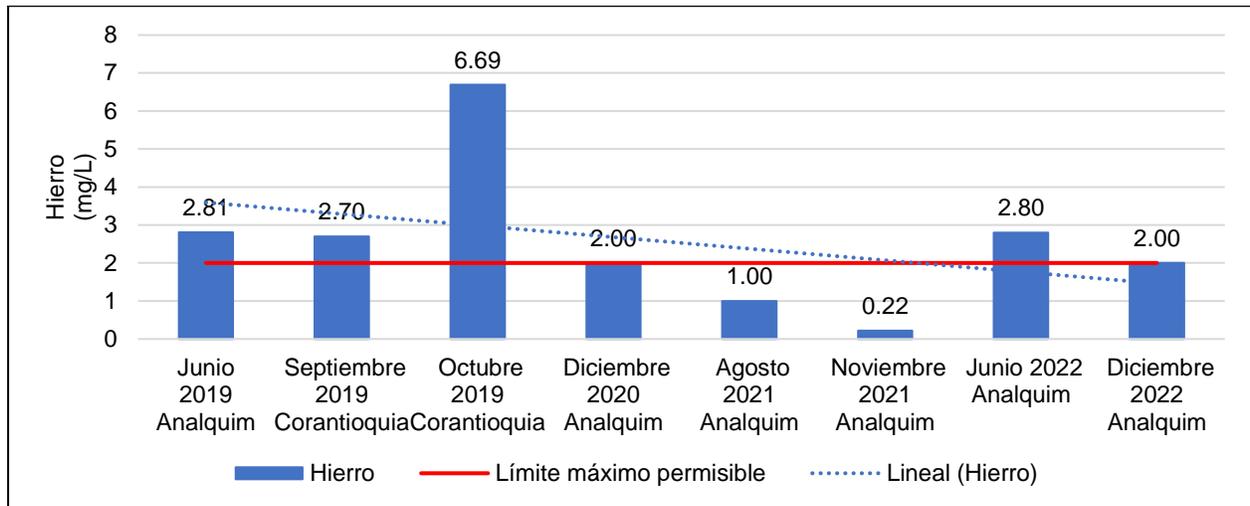
**Figura 22. Cromo**

Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.18. Hierro

Como se evidencia en la **Figura 23**, el hierro (Fe) estuvo presente en el vertimiento de la Mina El Silencio durante todos los monitoreos, algunos en concentraciones altas y otras bajas, sin embargo, en cuatro de las ocho campañas, se presentaron concentraciones por encima de lo permitido, donde es importante mencionar que, en la campaña del 2020 (única de ese año por pandemia COVID 19) y en la segunda campaña de 2022, el resultado se encontró en el rango permisible. Igualmente, en las dos campañas del 2021, la primera con 1.00 mg/L Fe y en la segunda con 0.22 mg/L Fe.

Cuando la concentración del hierro se encuentra por debajo de lo establecido por la normatividad, no suele ser un riesgo para la calidad del agua industrial, dependiendo de su uso. No obstante, en exceso puede causar impactos, como cambios en el color y el sabor, así como también problemas de corrosión y daños de equipos.

**Figura 23. Hierro**

Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.19. Mercurio y Plata.

Según los resultados de las ocho campañas de monitoreo durante los años 2019 al 2023, no se presentaron concentraciones altas de mercurio y plata, todos los valores se encontraron menor a cada límite de referencia, lo que permite concluir que por parte de la unidad minera El Silencio, no se está causando afectaciones a la fuente hídrica por este tipo de metales, resaltando que son elementos diferentes donde suele ser más tóxico el mercurio que la plata.

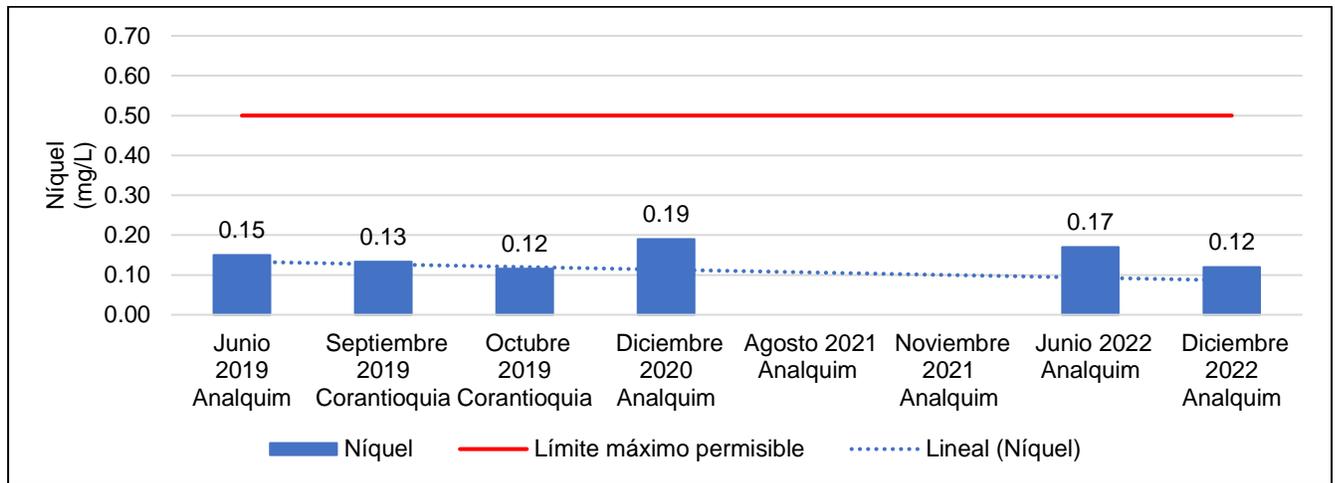
A parte de lo anterior, la Mina El Silencio no utiliza el mercurio para sus actividades mineras (exploración y extracción) y en cuanto a Aris Mining, para el proceso de beneficio, realizan uso del cianuro; y la plata encontrada en sus procesos es aprovechada y comercializada.

### 9.2.1.20. Níquel

El Níquel (Ni) es un metal, que por las actividades mineras puede estar presente en el agua, sin embargo, dependiendo de las concentraciones puede o no ocasionar riesgo a la salud humana y el medio ambiente.

En el caso de la Mina El Silencio, se observó que el vertimiento de ARnD no presenta valores por encima de lo referenciado en la norma, por lo que las cantidades vertidas de este metal no están causando efectos negativos en el ecosistema. (Ver **Figura 24**)

**Figura 24. Níquel**



Fuente: elaboración propia

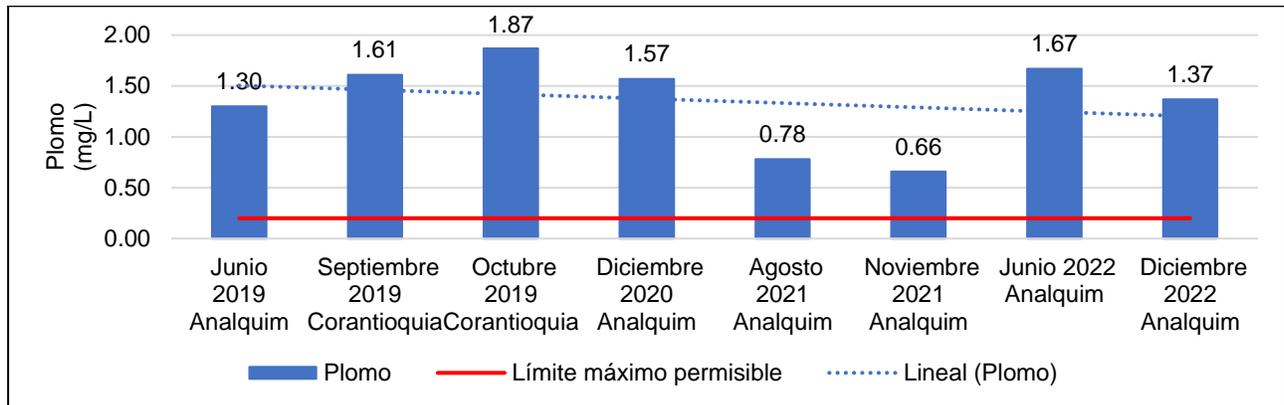
### 9.2.1.21. Plomo

En la **Figura 25** se relacionan los resultados obtenidos de plomo durante los monitoreos del vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio, lo cual demuestra que este metal ha estado presente en concentraciones mayores que las permitidas, generando un riesgo para la fuente hídrica receptora y los organismos acuáticos, a su vez también causa efectos negativos en la salud humana.

Este metal se puede generar por diversas actividades realizadas en la minería, como el uso de insumos y equipos como la soldadura, las baterías de las máquinas transportadoras del material, además también la calidad de la roca, donde se ha comprobado en otros sectores de la empresa Aris Mining que el control de los sólidos y la acidez, disminuye a la vez la presencia del plomo en el vertimiento minero, por lo que no se requiere intervenir de manera directa las

actividades que generan plomo, sino, mejorar el tratamiento de los sólidos y la acidez generados en los procesos de exploración y extracción.

**Figura 25. Plomo**



Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.22. Acidez y Alcalinidad

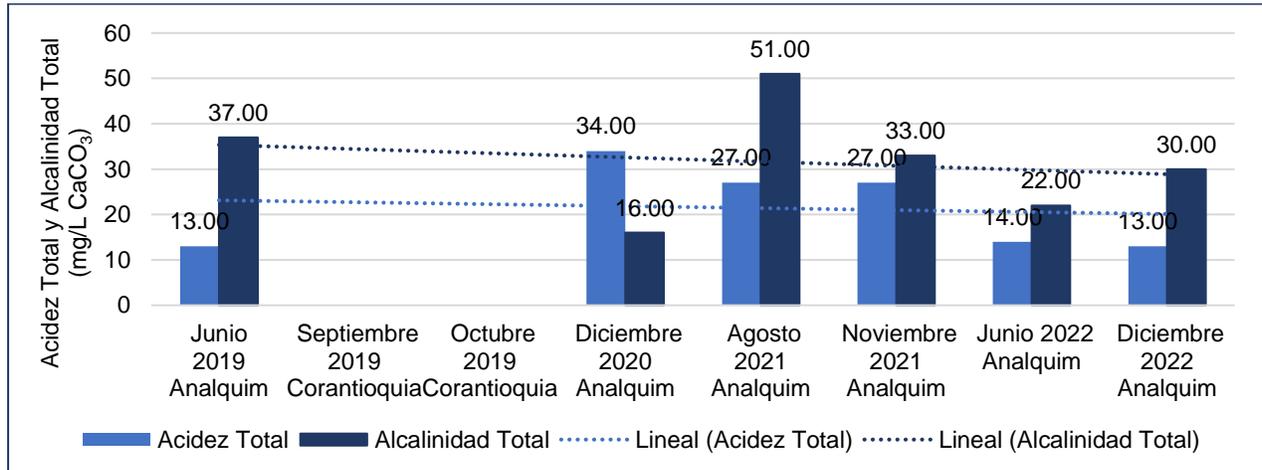
Los valores de acidez y alcalinidad en el efluente minero, como se muestra en la **Figura 26**, reportaron valores entre 13.00 mg/L CaCO<sub>3</sub> y 51.00 mg/L CaCO<sub>3</sub>, se puede observar que en las campañas que se les realizó análisis, el valor de la alcalinidad fue mayor que el de la acidez, exceptuando el monitoreo de diciembre de 2020, donde la acidez superó en casi la mitad, la alcalinidad. La normatividad solicita solo el Análisis y Reporte de estos dos parámetros, por tal motivo, no existe un valor de referencia.

Es importante considerar los niveles de acidez y alcalinidad al analizar los valores de pH en un determinado contexto. El pH es una medida que indica si una sustancia es ácida, neutra o básica. Los valores de pH están influenciados por la concentración de iones de hidronio (H<sup>+</sup>) en una solución.

La acidez se refiere a la presencia de un mayor número de iones de hidronio (H<sup>+</sup>), dando lugar a pH inferiores a 7; y la alcalinidad a un mayor número de sustancias básicas como son los iones bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>)

e hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ), lo que hace que el pH sea superior a 7. Cuando ocurre un equilibrio entre la acidez y la alcalinidad, se presenta un pH neutro que es igual a un valor de 7 unidades.

**Figura 26.** Acidez Total y Alcalinidad Total



Fuente: elaboración propia

### 9.2.1.23. Dureza Cálctica y Dureza Total

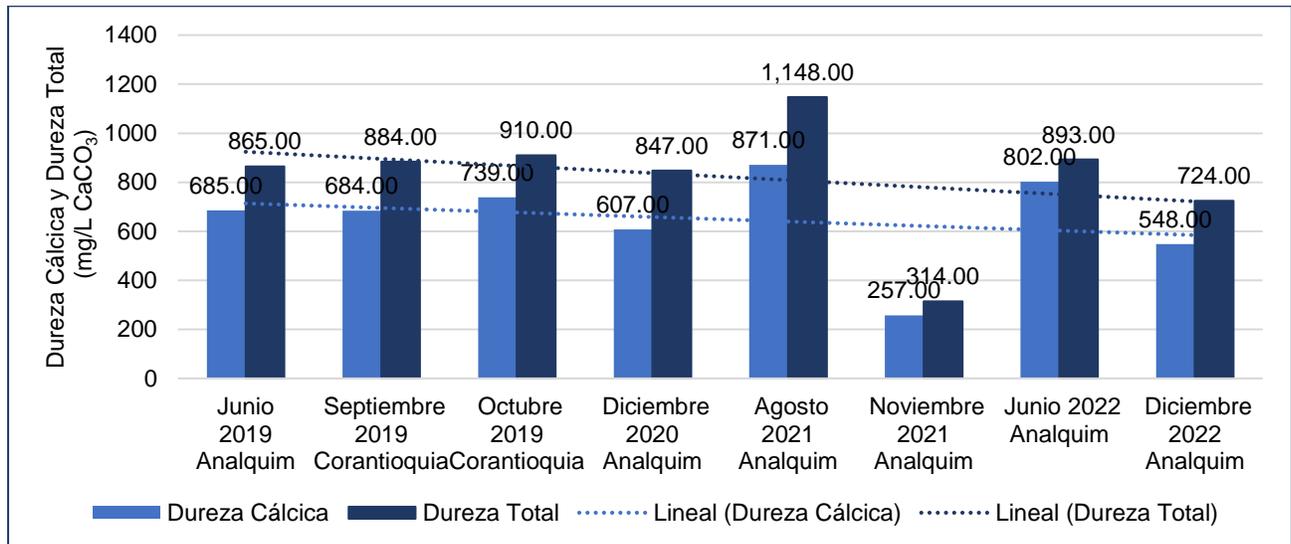
La dureza cálcica hace parte de la dureza total, ya que esta última contiene la cantidad de iones tanto de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) como de magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), por tanto, al conocer la dureza cálcica y la total sabemos qué iones pertenecen al magnesio.

Con la dureza total se puede conocer la calidad del agua del efluente minero de El Silencio, observando que el valor más alto se presentó en la primera campaña del 2021, donde se obtuvo 1148.00 mg/L  $\text{CaCO}_3$  y en este mismo año, se obtuvo también el valor menor de dureza, 314.00 mg/L  $\text{CaCO}_3$ .

Algunos de los problemas más comunes del agua dura, es que no permite generación de espuma a la hora de uso de detergentes, adicional, facilitan las formaciones de incrustaciones en equipos y tuberías metálicas, ocasionando diferentes daños; sin embargo, la Resolución 0631 de 2015, no cuenta con un valor límite de la concentración de dureza en los efluentes mineros, presentan la

condición de “Análisis y Reporte”. Se relaciona **Figura 27** con los resultados de Dureza.

**Figura 27. Dureza Cálctica y Dureza Total**



Fuente: elaboración propia

#### 9.2.1.24. Color Real

Los resultados obtenidos de color real a diferentes longitudes de onda (436 mm, 525 mm y 620 mm) fueron muy similares en cada una de las campañas de monitoreo. En diciembre de 2020 se presentó más concentración, obteniendo un valor de 1.60 m-1, los demás estuvieron inferiores a 0.50 m-1.

Respecto a la normativa ambiental no se realiza comparación debido a que se encuentra en condición de “Análisis y Reporte”.

#### 9.2.2. Información interna Mina El Silencio

Al igual que la información externa, la interna fue suministrada por el área de asuntos ambientales de Aris Mining Segovia; se tienen los siguientes resultados de medición para las ARnD de la mina El Silencio:

- Valores de pH realizados diariamente

- Valores de SST, realizados semanalmente
- En algunos tanques principales, valores de pH y SST; esto como manejo interno por parte de la persona encargada del área ambiental de la Mina El Silencio, con la finalidad de determinar el aporte de sólidos suspendidos y contribución de la acidez en estos puntos.

En la **Tabla 10**. Datos internos consolidados **Tabla 10** se relacionan los resultados de pH y SST que se analizaron en el vertimiento de la Mina El Silencio durante los años 2019 a 2022, donde se logró un total 11393 mediciones de pH, de las cuales un 90.90 % fueron muestras que se encontraron dentro de lo exigido por la normatividad, sin embargo, como se ha estado mencionando, ese 9.10% que estuvo por fuera de norma, se distribuyó en los doce meses de los cuatro años, por lo que por una muestra que se obtuvo de incumplimiento, ese es el resultado que es válido para la autoridad ambiental debido a que fue un agua ácida o básica que se vertió y es una acción que no se puede subsanar; de los cuatro años, el valor máximo de pH fue de 11.36 unidades y el mínimo 2.68 unidades, medidos en diciembre de 2019 y julio de 2020 respectivamente.

En cuanto a los SST, de 206 muestras analizadas en los cuatro años, solo el 4.90% presentó cumplimiento con respecto a los 50.00 mg/L exigidos por la normatividad, obteniendo un valor máximo de 802.00 mg/L SST en septiembre de 2022 y un mínimo de 13.60 mg/L SST en septiembre de 2020.

**Tabla 10.** Datos internos consolidados

Guía de Recolección de datos <b>Monitoreos Internos</b>									
Nombre de la empresa			Aris Mining-Mina El Silencio						
Nombre del observador			Sirley Johana Serna Betancur						
Giro de la empresa			Empresa de minería aurífera						
<b>Obj</b> Evaluar los resultados de los parámetros analizados en el vertimiento minero de la mina El Silencio con personal interno de la compañía, en los años del 2019 al 2022, comparándolos entre sí según años y relacionándolos con los límites permisibles exigidos por la normatividad ambiental.									
		Lím. Máx. Permissible según Resolución 0631 de 2015 pH (6.00 a 9.00 Unidades)				Lím. Máx. Permissible según Resolución 0631 de 2015 SST (50.00 mg/L)			
Año	Mes	pH Máximo (Unidades)	pH Mínimo (Unidades)	Cantidad de muestras de pH tomadas	Muestras dentro de rango pH (%)	Sólidos Suspendi dos Totales	Sólidos suspendi os Totales Mínimo	Cantidad de muestras de SST tomadas	Muestras dentro de rango SST (%)
2019	Enero	9.90	4.45	183	94.54	29.60	29.60	1	100.00
	Febrero	9.33	4.49	136	93.38	34.00	34.00	1	100.00
	Marzo	8.94	4.66	163	95.09	175.00	148.00	3	0.00
	Abril	10.22	5.87	159	96.86	234.00	140.00	4	0.00
	Mayo	11.10	4.51	202	92.57	214.00	30.00	4	25.00
	Junio	9.46	5.78	183	97.81	288.00	20.00	6	16.67
	Julio	9.49	4.35	258	97.67	228.00	140.00	5	0.00
	Agosto	9.12	3.97	255	98.04	256.00	106.00	4	0.00
	Septiembre	10.37	3.60	266	88.35	230.00	93.00	4	0.00
	Octubre	10.58	3.87	339	93.22	206.00	166.40	5	0.00
	Noviembre	9.11	3.39	255	92.16	426.40	219.80	5	0.00
	Diciembre	11.36	6.03	270	98.52	535.20	165.00	5	0.00
2020	Enero	9.26	3.21	279	93.55	317.60	145.00	4	0.00
	Febrero	10.00	5.00	298	88.93	225.60	33.20	4	25.00
	Marzo	10.56	3.12	303	88.12	405.20	129.20	5	0.00
	Abril	9.00	3.21	271	91.88	310.80	99.60	5	0.00
	Mayo	8.72	4.00	250	98.00	266.80	114.80	4	0.00
	Junio	11.03	3.55	311	78.78	406.40	80.00	6	0.00
	Julio	11.02	2.68	300	86.00	340.80	62.80	4	0.00
	Agosto	10.46	4.67	228	95.61	258.40	26.00	4	25.00
	Septiembre	10.60	4.32	257	96.50	198.40	13.60	6	16.67
	Octubre	10.74	3.30	315	93.33	306.00	49.60	4	25.00
	Noviembre	9.92	3.28	248	95.56	177.60	97.60	4	0.00
	Diciembre	8.92	4.11	313	98.72	175.60	57.60	4	0.00
2021	Enero	8.94	4.18	234	91.88	177.60	88.40	4	0.00
	Febrero	10.25	4.04	242	87.19	466.40	135.20	4	0.00
	Marzo	10.92	4.16	240	89.17	777.20	174.80	5	0.00
	Abril	9.69	3.85	251	89.64	294.80	44.40	4	25.00
	Mayo	9.10	4.24	236	86.86	624.80	85.60	4	0.00
	Junio	10.93	3.51	256	83.20	206.40	68.00	4	0.00
	Julio	9.13	4.52	262	93.51	653.60	153.60	4	0.00
	Agosto	9.65	4.35	239	87.87	432.80	140.00	5	0.00
	Septiembre	10.73	4.01	275	93.09	354.40	89.60	4	0.00
	Octubre	10.11	3.74	275	85.09	235.20	69.60	4	0.00
	Noviembre	9.35	4.88	248	98.79	294.00	52.80	4	0.00
	Diciembre	10.00	5.00	261	98.85	338.00	120.00	6	0.00
2022	Enero	8.94	4.30	227	94.71	446.00	78.00	5	0.00
	Febrero	11.00	5.00	166	94.58	393.60	98.40	4	0.00
	Marzo	10.00	3.00	171	91.23	346.40	98.40	5	0.00
	Abril	11.00	4.36	165	87.88	218.40	110.40	4	0.00
	Mayo	10.00	3.96	144	80.56	721.60	169.20	4	0.00
	Junio	10.00	5.00	147	81.63	229.20	56.40	5	0.00
	Julio	10.08	4.00	168	75.00	160.00	84.80	4	0.00
	Agosto	9.96	3.93	238	80.25	255.60	153.20	3	0.00
	Septiembre	9.72	3.31	224	89.29	802.00	118.80	5	0.00
	Octubre	9.12	4.89	226	93.36	532.00	134.00	4	0.00
	Noviembre	10.90	4.00	228	81.58	374.80	169.60	4	0.00
	Diciembre	9.45	4.00	228	76.75	222.80	38.80	6	16.67
<b>Total global</b>		11.36	2.68	11393	90.88	802.00	13.60	206	4.85
<b>Promedio</b>				237				4	

Fuente: elaboración propia

En la **Tabla 11** se presenta un resumen de la cantidad de muestras de pH y SST tomadas en el vertimiento de la mina por cada año y a su vez la cantidad muestras que sobrepasaron los límites permisibles de acuerdo con lo establecido en la Resolución 0631 de 2015.

En cuanto al pH, el año en que más se presentaron vertimientos ácidos y básicos con respecto a las muestras tomadas, fue el 2022, ya que, de 2332 muestras tomadas, 334 se encontraron por fuera del rango.

En cuanto a los SST, tanto en el año 2019 como en el 2020, solo cuatro muestras cumplieron con valores menores o iguales a los 50 mg/L y en 2021 y 2022, solo una muestra presentó cumplimiento de las 52 y 53 analizadas, respectivamente.

**Tabla 11.** Resumen resultados análisis internos pH y SST

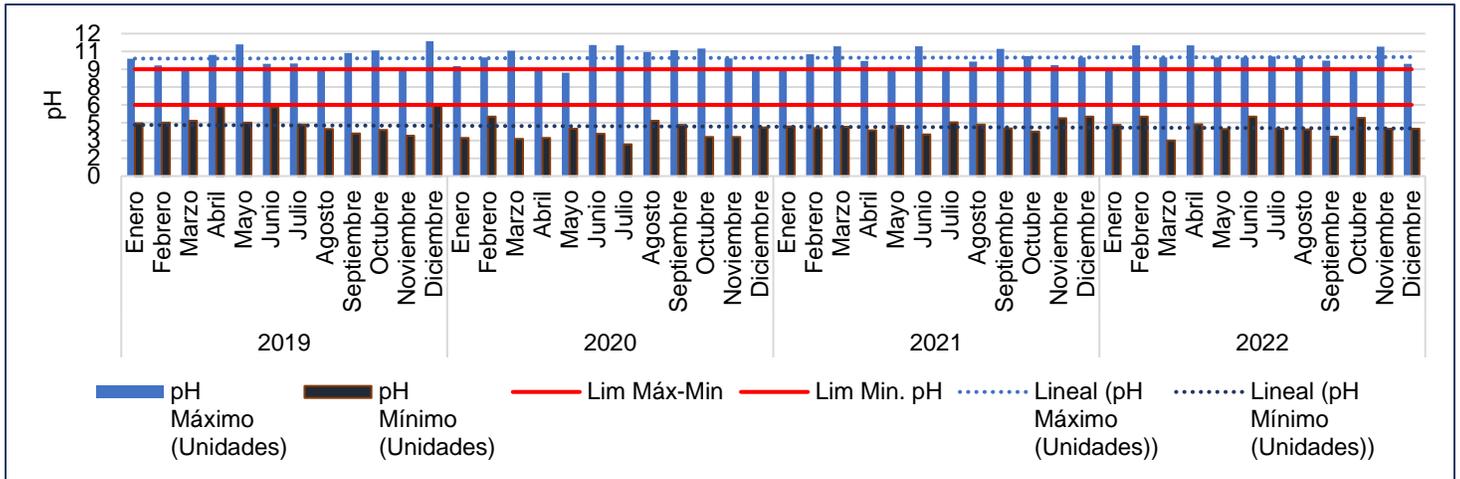
AÑO	Parámetros					
	pH			SST		
	# muestras tomadas	# muestras por fuera de norma	% cumplimiento	# muestras tomadas	# muestras por fuera de norma	% cumplimiento
2019	2669	130	95.10	47	43	8.50
2020	3373	277	91.70	54	50	7.40
2021	3019	285	90.50	52	51	1.90
2022	2332	334	85.60	53	52	1.80

Fuente: elaboración propia

### 9.2.2.1. Potencial de Hidrógeno

Los valores de pH que se obtuvieron a través de los análisis internos de las muestras del vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio, como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, de manera general, estuvieron por fuera del rango establecido en la Resolución 0631 de 2015 (6.00 unidades – 9.00 unidades), por lo que diariamente en diferentes ocasiones se realiza vertimientos ácidos o básicos a la fuente hídrica receptora, Quebrada Peñitas, poniendo en riesgo la calidad de agua y su capacidad de sostener la vida acuática.

**Figura 28.** Potencial de Hidrógeno (pH) – Análisis interno.

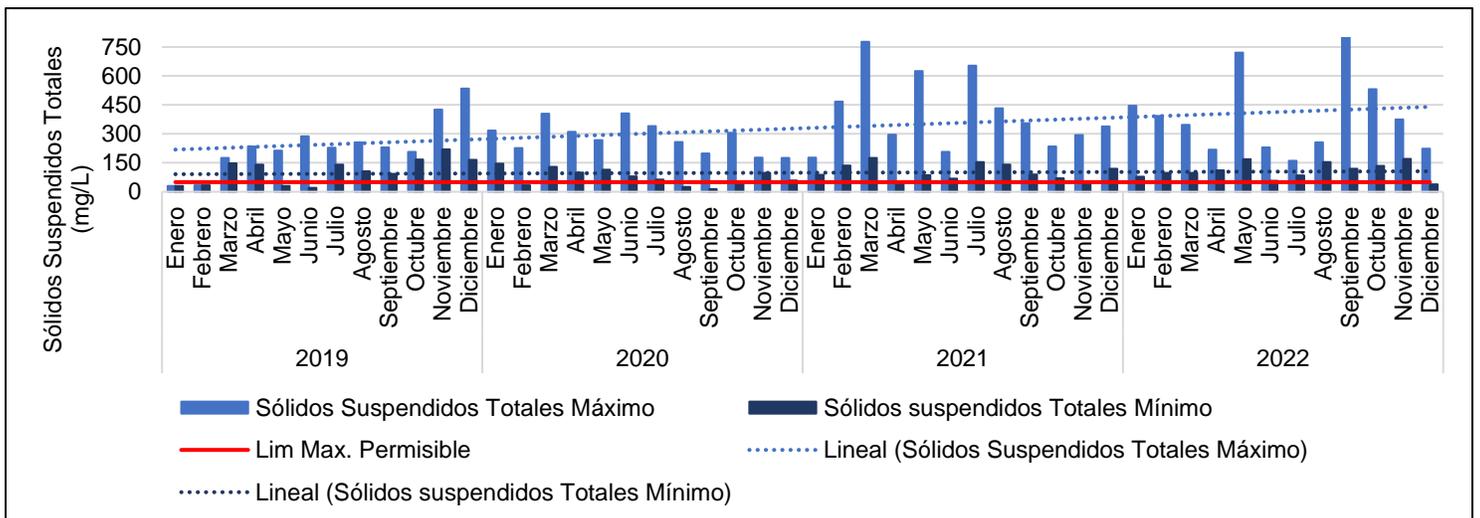


Fuente: elaboración propia

### 9.2.2.2. Sólidos Suspendidos Totales

Se puede apreciar en la , que para los años 2019 y 2020, la concentración de SST sobrepasó los límites establecidos en la Resolución 0631 de 2015, pero con valores menores en comparación con los resultados obtenidos para los años 2021 y 2022; esto se presentó porque en los dos primeros años, las actividades de exploración y extracción, no se desarrollaron al 100% por temas de emergencia sanitaria.

**Figura 29.** Sólidos Suspendidos Totales – Análisis interno



Fuente: elaboración propia

Como dato adicional, que no se encontraba en la base de datos entregada por el área ambiental de Aris Mining, se recibe información por parte del encargado ambiental de la Mina El Silencio, el cual realiza esporádicamente mediciones en el agua que sale de algunos depósitos que se encuentran en el interior de la mina y que funcionan como sedimentadores; esta actividad se realiza con el fin de conocer y monitorear más a detalle la concentración de los SST y de la acidez de las ARnD generadas en el proceso de exploración y extracción del mineral en la mina el Silencio..

Por tanto, en la **Tabla 12** se presenta el resultado de los análisis realizados a 12 de los tanques de tratamiento de sólidos de la mina, lo cual fue comparado con la Resolución 0631 de 2015 y de color rojo se resaltan los incumplimientos.

Los tanques de los niveles 30-0, 40-485, 43 -195 y 47-400, son algunos sistemas que no cuentan con aporte de aguas de otros tanques, son independientes y solo reciben las aguas generadas en el mismo nivel o infiltradas; en caso del tanque del nivel 30, recibe gran aporte tanto de sólidos como de acidez de una mina ajena a la operación, pero que descarga su vertimiento en este nivel de la mina El Silencio.

En todos los resultados de los análisis de las muestras de los tanques descritos en la **Tabla 12**, los correspondientes a los niveles 30-0, 34.5-450, 39 -450, 40-485, 43 -195 y 46-400 han presentado un pH ácido y en cuanto a sólidos, han contado con límites superiores al permitido, los tanques ubicados en los niveles 7, 34.5 -450 y 39-450, los demás han contado con al menos 1 muestra dentro de los valores de referencia.

El tanque del nivel 7, es el tanque que realiza el vertimiento final a superficie, denotando que, en cuanto al pH, ha contado con más muestras dentro de norma, esto, por el tratamiento de pH que se realiza en el nivel 5 y se descarga hacia este sistema.

El tanque ubicado en el nivel 46-400, cuenta con aguas con problemas de acidez, pero con sólidos que no superan los 9 mg/L y en el último tanque encontrado en el nivel 47 de la mina, cuenta con aguas menos ácidas que los demás; esto, quizá por las diferencias de tipos de rocas presentes en las frentes de trabajo.

**Tabla 12.** Resultados análisis muestras puntuales en tanques interior mina

Mes	Nivel																							
	7		16		19		23		30-0		34.5 - 450		39 - 450		40 - 485		43 - 195		45 - 400		46 - 400		47 - 400	
	Parámetros																							
	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST	pH	SST
Agosto-2021	6.53	100.00	6.37	118.40	6.10	92.80	7.58	259.20	5.15	257.60	4.97	288.80	5.09	488.00	5.03	53.20	4.55	76.80	4.37	49.60	3.42	2.40	5.70	72.00
Septiembre-2021	7.04	295.20	5.35	113.60	5.01	129.60	4.37	85.60	3.19	27.20	3.88	100.80	3.98	110.40	4.07	5.60	3.10	25.60	5.36	84.80	2.90	8.80	2.85	2.40
Octubre-2021	5.17	110.00	4.29	54.40	4.40	97.60	4.59	65.60	4.76	57.60	4.31	77.60	5.10	140.00	3.74	24.00	2.99	32.80	5.62	100.80	2.90	2.40	7.14	71.20
Noviembre-2021	6.32	156.00	4.37	44.00	5.23	72.00	4.70	36.00	3.71	32.00	4.50	92.00	4.47	74.00	3.71	10.00	3.44	42.00	5.61	36.00	3.14	6.00	6.65	70.00
Enero-2022	8.10	594.00	4.52	368.00	3.73	56.00	3.63	74.00	10.10	2240.00	4.04	86.00	3.92	106.00	3.65	10.00	2.58	54.00	5.63	86.00	2.55	6.00	6.04	154.00
Febrero-2022	6.26	63.60	3.89	28.80	3.70	34.00	4.04	93.40	3.62	27.20	4.04	229.30	4.19	78.80	3.82	80.80	3.45	130.80	6.32	30.40				
Abril-2022	6.23	2771.00	5.79	111.20	3.94	646.00	3.87	591.20	3.14	52.00	3.95	257.00	3.81	212.40	4.36	77.60	3.21	15.60	6.34	70.40	2.70	8.40	6.30	10.40
Junio-2022	5.98	229.20			3.10	170.00	2.75	354.40	2.76	289.20	5.87	1243.60	5.78	280.00	5.63	186.80	4.82	29.60	5.97	64.40	3.57	17.20	6.41	72.80

Fuente: elaboración propia

Después de realizar el análisis correspondiente, se encontró que los resultados obtenidos del monitoreo interno y externo de la operación minera El Silencio, así como el reconocimiento del sistema de bombeo, indican que el vertimiento de ARnD de la mina no cumple con los valores de referencia establecidos en la Resolución 0631 de 2015, lo que implica que la hipótesis nula no puede ser aceptada.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa de que el vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio no cumple con los estándares establecidos por la legislación ambiental. Esto podría tener implicaciones importantes en términos de protección del medio ambiente y la salud pública, ya que el incumplimiento de los valores límite puede afectar negativamente a la calidad del agua y a los ecosistemas acuáticos, además del pago de sanciones por la autoridad ambiental regional, como la tasa retributiva, en este caso por el vertimiento de SST fuera del límite permisible.

Es necesario tomar medidas para reducir el impacto ambiental y garantizar que los efluentes mineros cumplan con los valores de referencia establecidos por la normatividad de vertimientos. Esto podría incluir la implementación de tecnologías de tratamiento más eficientes y la revisión del sistema de tratamiento actual de la operación minera para asegurar que sea suficiente para la retención de concentración de sólidos del vertimiento, obtenidos en los procesos de exploración y extracción.

Sin embargo, es importante mencionar que las deficiencias identificadas en el tratamiento de las ARnD de la mina El Silencio no son exclusivas del lugar. Se han

registrado vertimientos con características similares en distintas partes del mundo, donde en cuanto a esto, se hace más profundidad en las discusiones de este proyecto.

No obstante, es crucial comprender que esta situación no justifica la falta de un tratamiento adecuado de las aguas residuales. En cambio, se debe enfocar en buscar formas de la mejora continua y el aprendizaje de las experiencias previas.

### 9.3. Objetivo #3

Posibles alternativas que permitirán mejorar el tratamiento del vertimiento de las ARnD de la mina el Silencio del proceso de exploración y extracción.

Con la información obtenida de los monitoreos tanto externos como internos realizados en el vertimiento de ARnD de la Mina El Silencio, se cuenta con un efluente con algunas particularidades y características que están por fuera de lo exigido por la Resolución 0631 del 2015, como:

- Alteración de pH (ver **Figuras Figura 8**;Error! No se encuentra el origen de la referencia.)
- Presencia de SST (ver **Figuras Figura 11 y**) y SSED (ver **Figura 12**)
- Grasas y Aceites (ver Figura 13)
- Presencia de metales como: Cadmio, Cinc, Hierro y Plomo. (ver **Figuras Figura 19Figura 20Figura 23Figura 25**)

Es relevante mencionar que, la solubilidad de los metales puede variar dependiendo de diversas condiciones, como el pH, la temperatura y la presencia de otros compuestos químicos en el agua. A continuación, en la **Tabla 13** se proporcionan datos aproximados de la solubilidad de estos metales en un rango de pH de 6.00 hasta 9.00 unidades.

**Tabla 13.** Solubilidad de metales en agua.

Metal	pH	Solubilidad	Comentario
Cadmio	6.0 – 9.0	Baja	A pH ligeramente ácido o neutro, la solubilidad del cadmio es baja. La mayoría del cadmio presente tiende a precipitar o formar sólidos insolubles en condiciones neutras. Sin embargo, a pH más alto, entre 8.0 y 9.0 la solubilidad aumenta ligeramente, pero sigue siendo relativamente baja.
Cinc	6.0 – 9.0	Moderada	El cinc es más soluble que el cadmio en agua. A pH ligeramente ácido o neutro, la solubilidad del cinc es moderada. A mayor valor de pH, entre 8.0 y 9.0 la solubilidad puede aumentar ligeramente, pero sigue siendo moderada.
Plomo	6.0 – 9.0	Baja	La mayoría del plomo presente tiende a precipitar o formar sólidos insolubles en este rango de pH. Sin embargo, en presencia de sustancias ácidas fuertes o a pH bajo, la solubilidad del plomo puede aumentar.
Hierro	6.0 – 9.0	Baja	La solubilidad del hierro en agua puede variar dependiendo de si se trata de hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) o férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). En general, la solubilidad del hierro ferroso es mayor que la del hierro férrico a pH ácido, el hierro ferroso se mantiene principalmente en forma de cationes solubles ( $\text{Fe}^{2+}$ ), mientras que el hierro férrico tiende a precipitar como hidróxidos o compuestos insolubles. Sin embargo, la solubilidad total del hierro puede ser baja a valores de pH de 6.0. A medida que el pH aumenta desde 7.0 hasta 9.0 y se vuelve más básico, la solubilidad total del hierro disminuye, favoreciendo la precipitación de este metal.

Fuente: adaptado del libro “Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente” (29)

Conociendo lo anterior, se dará paso a presentar las alternativas para el tratamiento del efluente minero, no sin antes realizar las siguientes recomendaciones:

1. Para disminuir la cantidad de sólidos en el vertimiento de estas ARnD es importante aumentar la frecuencia de limpieza de los depósitos de agua (ver **Tabla**

**8)** que se encuentran en socavón (ver **Figura 7**) para evitar la colmatación de los tanques y la resuspensión de sólidos, para lo cual se deben definir los tiempos para realizar mediciones de la cantidad del lodo presente en cada tanque y de acuerdo con esta inspección, programar las intervenciones. Con base a otras operaciones mineras de la misma compañía, el tiempo más prolongado en volver a realizar la limpieza de un depósito o tanque sedimentador, es de 3 meses, sin embargo, es importante aclarar que, aunque los procesos mineros son los mismos, cada una trabaja de manera autónoma e independiente.

2. Para las grasas y aceites, este es un tema muy operacional, debido a que en la actualidad existe una trampa de grasas en el nivel 20 de la Mina El Silencio y se le realiza limpieza cada 8 días. Esta, recibe todas las aguas hidrocarburadas y aceites provenientes del taller de mantenimiento de equipos diésel, por tanto, en este sentido, se requiere evaluar el proceso de limpieza, el cual se hace manual, y asegurarse de que el personal esté debidamente informado y capacitado para realizar estas tareas de manera segura y eficiente, con el fin de las mejoras continuas. Sin embargo, ocasionalmente, en las afueras del taller, pueden presentarse fugas de aceite de un equipo, para lo cual, es importante realizar un seguimiento a las áreas propensas a las fugas y establecer medidas preventivas, como, el mantenimiento regular de los equipos, la instalación de dispositivos de detección de fugas y la implementación de procedimientos de respuesta rápida para contener y remediar cualquier fuga o derrame de aceite (uso de elementos absorbentes como aserrín, tela oleofílica, contar con kit completo para atención de derrames); en caso de no ser efectiva, adicional, como alternativa, se puede también instalar otra trampa de grasa, con las mismas características de la actual pero de mayor capacidad para remover lo que no se alcanza con la trampa de grasas existente, por lo que es importante, ubicarla a la salida del efluente de la mina.

Posterior a lo anterior, se presentan cinco alternativas que consideran las particularidades antes mencionadas del vertimiento del ARnD provenientes del proceso de exploración y extracción de la Mina El Silencio:

### 9.3.1. Precipitación química

Esta técnica es ampliamente empleada en los procesos industriales debido a su facilidad de operación, su eficacia en la eliminación de metales pesados y su rentabilidad económica en el funcionamiento. Sin embargo, se han identificado algunos inconvenientes asociados, como la generación de lodos que requieren un mantenimiento costoso, así como el uso de agentes coagulantes y floculantes para separar los metales del efluente.

Algunos de los rendimientos óptimos de tratamientos por precipitación, es el uso de hidróxidos (como el hidróxido de calcio o de sodio), los cuales son ampliamente reconocidos por su eficiencia en el tratamiento mediante precipitación, debido a su capacidad para obtener resultados satisfactorios. Además, esta técnica se destaca por su asequibilidad, su capacidad para controlar fácilmente el pH y para eliminar los contaminantes a través de los procesos de floculación y sedimentación.

Otro elemento utilizado en este tratamiento son los sulfuros (como el sulfuro de sodio), aunque algunos se caracterizan por tener solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, puede lograr altos rendimientos en la eliminación de contaminantes. También se han utilizado sustancias quelantes, sin embargo, estas pueden presentar desventajas considerables, como la carencia de uniones necesarias. (11)

En la **Figura 30**, se presenta el proceso de precipitación, donde el primer paso implica la preparación de la solución de tratamiento, que generalmente se realiza ajustando el pH a un valor específico. Luego, se agrega el reactivo a la solución.

Estos precipitados se forman como partículas sólidas que pueden ser eliminadas mediante procesos de floculación y sedimentación; una vez que los flóculos se han sedimentado, el líquido sobrenadante puede ser separado de los precipitados mediante técnicas de decantación o filtración; además, dependiendo de la cantidad y la naturaleza de los contaminantes presentes, se puede requerir etapas adicionales de tratamiento para alcanzar los niveles de calidad de agua deseados. (29)

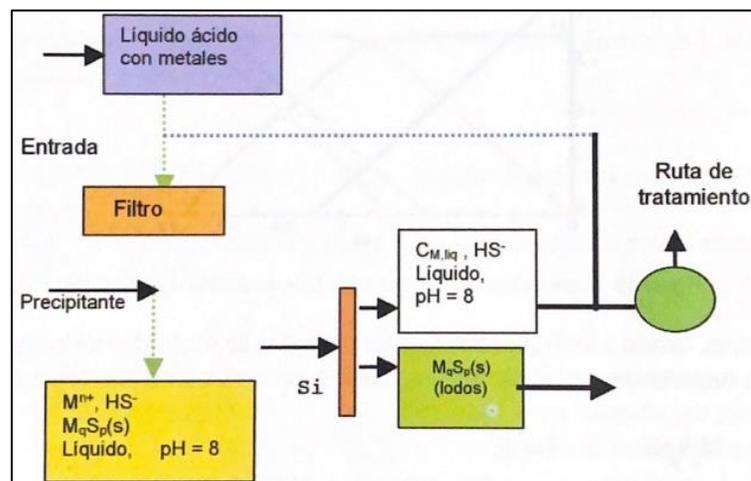
Es importante aludir que, la inclusión de un filtro antes de la adición del precipitante puede ser necesaria en ciertos casos para eliminar partículas sólidas o sólidas suspendidas antes de iniciar el proceso de precipitación química, ya que esta, es utilizada para eliminar los sólidos disueltos en el agua.

Algunas de las ventajas del proceso de precipitación con compuestos como el sulfuro, es la disminución de los volúmenes de lodos y el consumo de reactivos químicos hasta un 30 % con respecto a la precipitación con cal, además de la producción de efluentes con muy poco metal residual. (29)

No obstante, también cuenta con desventajas como la liberación de gas sulfuro de hidrógeno cuando se alcanza una zona ácida y la generación de olores ofensivos al utilizar sulfuro de sodio, mencionando que, si el proceso de precipitación ocurre rápidamente, los sulfuros resultantes pueden consistir en partículas muy finas que dificultan los procesos de separación debido a problemas de sedimentación. (29)

Es crucial destacar que la implementación de esta alternativa requiere la construcción de infraestructura como tanques de precipitación y filtración, en caso de ser necesario. Así como la gestión adecuada los lodos resultantes del proceso y la asignación de un área específica para la instalación y operación del sistema de tratamiento, subrayando así la importancia de una planificación cuidadosa y precisa.

**Figura 30.** Proceso de precipitación química



Fuente: imagen tomada de la referencia (29)

### 9.3.2. Neutralización de pH

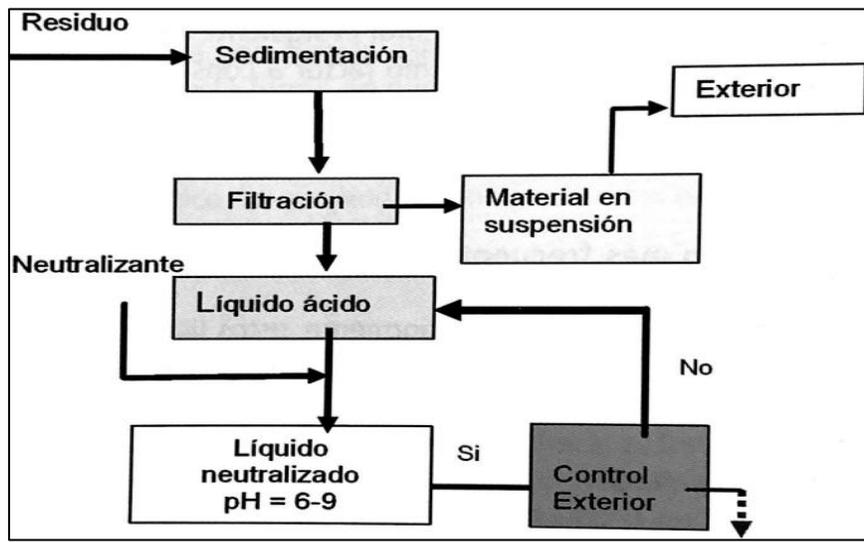
La Mina El Silencio, cuenta con aguas ácidas. Con el fin del control, se realiza un ajuste de pH en el nivel 5, sin embargo, se presentan inconsistencias y fluctuaciones, esto por el mecanismo manual que es empleado, donde se adiciona cal hidratada cada 4 minutos a un tanque con agua, este dirige esta solución al tanque que impulsa el agua hasta superficie, ubicado en el nivel 7, (ver **Figura 7**) descargándola directamente en un cuerpo receptor, con nombre, Quebrada Peñitas, por tanto, para las mejoras de esta situación, se propone implementar un dosificador automático que agregue cal de forma precisa y controlada al sistema y así lograr el objetivo de ajustar un valor de pH entre 6.00 a 9.00 unidades.

Por lo anterior, como alternativa se propone la neutralización, basada en una publicación del Instituto Geológico y Minero de España, (29) donde el proceso consiste: (ver **Figura 31**)

- Sedimentación y filtración: elimina las partículas suspendidas, presente en el agua, obteniendo un líquido homogéneo.
- Neutralización: proporciona unos valores de pH dentro de lo exigido normativamente (6.00 a 9.00 unidades). Se pueden utilizar productos como hidróxido de sodio, óxido de calcio, carbonato de calcio, etc.
- Control exterior y/o ambiental: por medio de muestreos en laboratorio y mediciones constantes de pH se determina el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015 en cuanto a vertimientos.

En caso de observar no cumplimiento durante el control ambiental, se deberá conducir nuevamente el vertimiento al proceso de neutralización, por tanto, la importancia de realizar mediciones y ensayos que permitan conocer las cantidades exactas de dosificación, además de los muestreos constantes.

Al contar con un vertimiento dentro de los valores de referencia establecidos por la norma, se podrá realizar la descarga directa en el cuerpo de agua receptor.

**Figura 31.** proceso de neutralización.

Fuente: imagen tomada de la referencia (29)

### 9.3.3. Tratamiento con coagulante y floculante.

El tratamiento de efluentes mineros es un proceso que permite minimizar el impacto ambiental y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua. El uso de coagulantes y floculantes es una técnica usada habitualmente para eliminar partículas en estado coloidal y algunas veces, algunos metales los metales disueltos que logran precipitar para luego ser removidos por sedimentación.

En el caso de la mina El Silencio, esta presenta altas concentraciones de sólidos en suspensión y sedimentables, acidez, además de metales disueltos pesados, como hierro, cinc, cobre y plomo. Estos contaminantes pueden tener un impacto negativo en los cuerpos de agua receptores si se liberan sin tratamiento adecuado.

Como el agua de la mina es ácida, es necesario realizar un tratamiento de neutralización antes de aplicar los coagulantes y floculantes. Esto se debe a que la acidez afecta la eficacia de los productos químicos utilizados, por lo que es importante que el agua esté ligeramente básica (7.5 unidades), por motivo a que el aluminio presente en los coagulantes requiere carbonatos para su eficiente acción. (30) Para la acidez, se puede utilizar un agente neutralizante, como hidróxido de sodio (NaOH) o cal (óxido de calcio, CaO), los cuales permiten elevar el pH y favorecen la alcalinidad. (31)

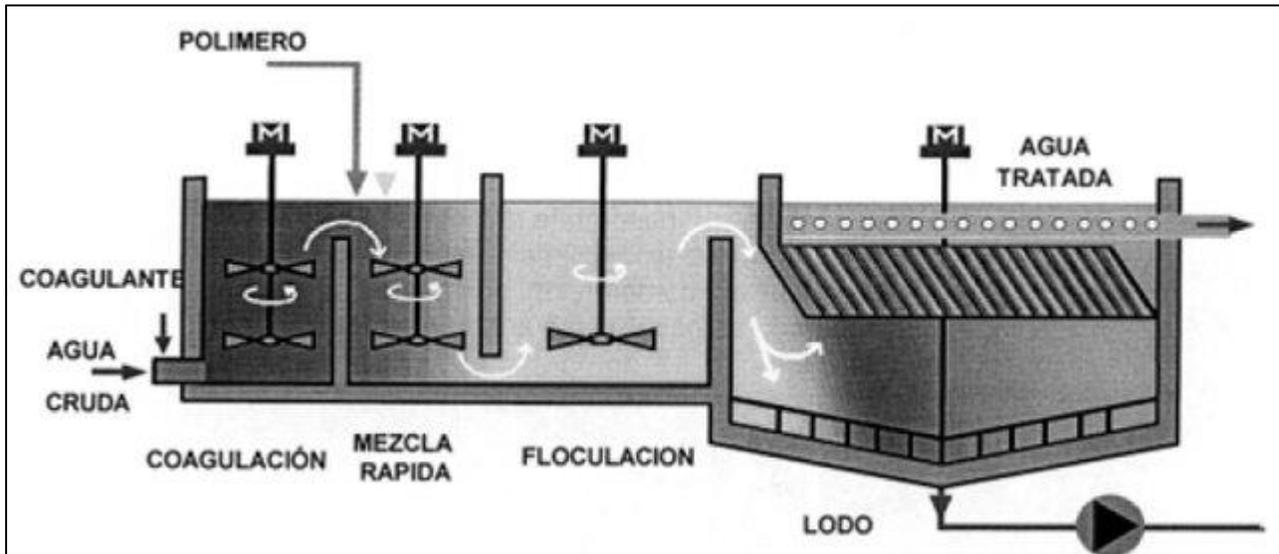
Una vez realizada la neutralización y se haya ajustado el pH adecuadamente, se puede proceder con la aplicación de los coagulantes y floculantes considerando la calidad del agua de mina.

Los coagulantes se utilizan para neutralizar las cargas eléctricas de las partículas sólidas disueltas y los coloides presentes en el agua de mina. Esto promueve la formación de flóculos más grandes y pesados, lo que facilita su sedimentación o separación por decantación y filtración. Algunos coagulantes frecuentemente utilizados en el tratamiento de aguas de mina incluyen sulfato de aluminio, cloruro férrico, hidroxiclорuro de aluminio, policloruro de aluminio y polímeros catiónicos.

Después de la coagulación, se puede emplear un floculante para favorecer que las partículas más pequeñas se aglutinen y formen flóculos más grandes y densos. Esto mejora la eficiencia del proceso de sedimentación y facilita la separación de los sólidos del agua, resaltando que, la mezcla del fluido es un aspecto clave en este proceso y por (mezcal del coagulante con el agua residual). (Ver **Figura 32**)

Para identificar las cantidades exactas de coagulante y floculante a adicionar en el agua a tratar, se requiere realizar una prueba de jarras, la cual es una técnica de laboratorio que simula las condiciones de tratamiento y permite evaluar la eficiencia de diferentes dosis de coagulantes y floculantes. Para esto, se deben tomar muestras representativas del agua de mina y se realizan ensayos con diferentes dosis de los productos químicos. A través de los resultados de pH, turbiedad y color tomados de las mejores jarras y la observación visual de la claridad del agua y la sedimentación de los flóculos, se puede determinar la dosis óptima. (32)

Es imprescindible considerar la exigencia de desarrollar infraestructuras físicas para llevar a cabo el tratamiento adecuado. Entre estas se incluyen canaletas destinadas a la aplicación del coagulante, floculadores, sedimentadores, tanques espesadores de lodos, entre otros elementos pertinentes. Asimismo, contemplar un área específica para la instalación y operación eficiente del sistema de tratamiento.

**Figura 32.** Proceso de tratamiento con coagulante y floculante

Fuente: imagen tomada de: <https://image.slidesharecdn.com/coagulacionyfloculacion-120224122002-phpapp01/85/coagulacion-y-floculacion-17-320.jpg?cb=1665692682>

#### 9.3.4. Tratamiento con zeolitas.

Las zeolitas son minerales microporosos que se forman de manera natural y poseen una estructura cristalina única. Estos minerales son conocidos por su capacidad para adsorber y catalizar reacciones químicas debido a sus poros regulares y su alta superficie específica. Su estructura microporosa les permite retener y liberar selectivamente iones y moléculas. (33)

Las aguas de la Mina El Silencio presentan una serie de problemas y desafíos en su tratamiento, ya que cuenta con acidez, metales pesados y sólidos, que son perjudiciales para los ecosistemas acuáticos y la salud humana; por lo que este método, no solo permite mejorar el vertimiento minero, sino que también ayuda en términos de eficiencia de remoción y costos operativos, siendo un método que no genera cantidades de lodos y residuos, lo que hace que sea más práctico por la operación minera.

Otra de las ventajas, es que pueden ser modificadas para ser selectivas en la adsorción de contaminantes específicos, esto se hace mediante el ajuste de su estructura y composición, se pueden crear zeolitas que tengan una afinidad mayor por determinados metales pesados o compuestos orgánicos presentes en las aguas de mina, lo que permite

una remoción más eficiente y precisa de los contaminantes objetivo, minimizando la interferencia de otros elementos presentes en el agua. (33)

Una vez que las zeolitas han adsorbido los contaminantes, es posible regenerarlas para su reutilización; lo cual se logra mediante el proceso de aplicación de calor, acidificación, lavado con solventes o con soluciones adecuadas, haciendo que libere los contaminantes adsorbidos de las zeolitas y las prepara para un nuevo ciclo de adsorción. La capacidad de regeneración de las zeolitas reduce los costos de tratamiento a largo plazo y contribuye a un enfoque más sostenible en la gestión de aguas de mina. (34)

Además de lo anterior, utilizar las zeolitas para el tratamiento de vertimientos aporta al cumplimiento de la normatividad ambiental, evitando así el pago de algunas sanciones de la autoridad competente.

Para la adsorción de metales pesados como cadmio, cinc, plomo, hierro y grasas del efluente de la mina El Silencio, se puede implementar las zeolitas chabazita y clinoptilolita, debido a que ha demostrado la eliminación de estos mediante los intercambios de iones. (35)

Es importante resaltar que, aunque las zeolitas son conocidas por su alta adsorción, su capacidad es finita y puede agotarse con el tiempo, implica que deben ser regeneradas o reemplazadas periódicamente, lo que puede requerir procesos adicionales y costosos.

Cuenta con algunas desventajas como que unas pueden adsorber no solo los contaminantes deseados, sino también otros componentes presentes en el agua, como iones esenciales o compuestos orgánicos útiles, lo que puede resultar en la pérdida de estos componentes valiosos y puede requerir tratamientos adicionales como ya los mencionados para su recuperación. Otra de las desventajas es que no modifica el pH del agua, por lo que se debe tener el proceso de neutralización obligatoriamente.

La Mina El Silencio en superficie cuenta con un espacio amplio para la instalación de una planta de tratamiento con las características pertinentes.

Por tanto, a continuación, se detalla el tren de tratamiento propuesto con el uso de zeolitas para las ARnD de la Mina El Silencio: (ver **Figura 33**)

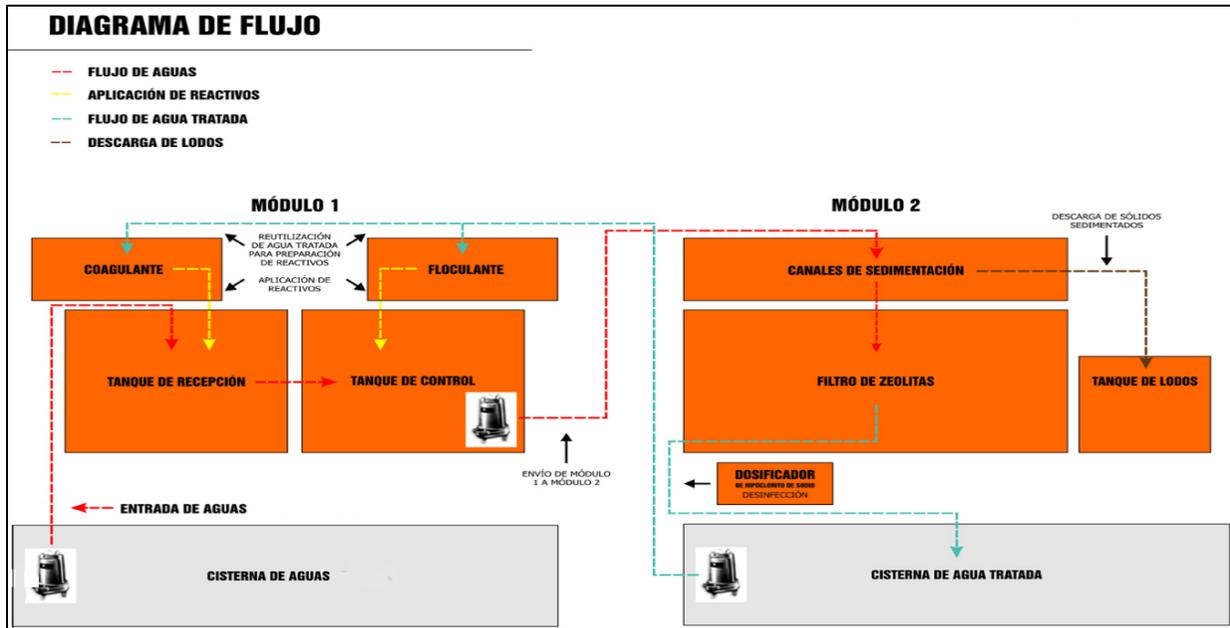
- **Sedimentación:** Se deben primero separar de los sólidos suspendidos del agua mediante sedimentación, luego las partículas en estado coloidal pueden separarse mediante la aplicación y dosificación correcta de reactivos, para lo cual, primero se realiza una prueba de jarras con diferentes coagulantes y floculantes que permitirán obtener la dosis óptima para su aplicación, lo que hace que antes de esta aplicación se neutralice el pH del agua. (Ver **Figura 34**)
- **Filtración:** En esta siguiente etapa, el agua a tratar después de pasar por sedimentación pasaría en forma de llovizna fina a través de las zeolitas necesarias, en este caso se podría aplicar la chabazita y clinoptilolita, lo que permitiría la adsorción de los metales y grasas presentes en el agua, entregado está en las condiciones exigidas por la normatividad. (Ver **Figura 34**)
- **Control de sólidos:** los sólidos y sus filtraciones, son depositados luego en un tanque de lodos que posee la misma planta, donde son deshidratados y podrán evacuarse de acuerdo con una caracterización previa sin riesgo ambiental.

El procedimiento descrito anteriormente es sencillo y práctico, existen plantas que tratan ARnD con características fisicoquímicas similares desde 15 hasta 200 metros cúbicos al día. Sin embargo, en el caso específico de la Mina El Silencio, el caudal promedio alcanza los 8743 metros cúbicos al día, lo cual exige que la planta de tratamiento cuente con la implementación de filtros necesarios para poder tratar este volumen de agua.

Como se mencionó anteriormente, las zeolitas pueden ser regeneradas, aplicando tratamientos térmicos, lavado con soluciones químicas u otros métodos específicos dependiendo de las características de las zeolitas y los contaminantes adsorbidos. Estas regeneraciones se pueden realizar 5, 10 o más veces depende de los contaminantes adsorbido; sin embargo, llegará un momento en que esta actividad no se pueda implementar más, donde se recomienda realizar un descarte controlado, esto implica gestionar adecuadamente las zeolitas usadas como residuos; pueden ser

consideradas como residuos sólidos especiales o residuos peligrosos por los metales adsorbidos, por lo que deben ser tratadas y eliminadas de acuerdo con los protocolos establecidos. Esto puede incluir su encapsulación en materiales apropiados, su disposición en vertederos controlados o su tratamiento en instalaciones de gestión de residuos autorizados. (36)

Figura 33. Proceso de tratamiento con zeolitas



Fuente: imagen extraída de zeolitas.mx y modificada por el autor.

Figura 34. Proceso físico químico con zeolitas



Fuente: imagen extraída de zeolitas.mx.

### 9.3.5. Tratamiento con ósmosis inversa

La ósmosis ha demostrado ser una solución eficiente y sostenible para tratar aguas con metales, sólidos y acidez, debido a que este es un proceso de separación que utiliza una membrana semipermeable para eliminar las impurezas del agua. Funciona mediante la aplicación de presión al agua contaminada, lo que fuerza el paso de esta a través de la membrana mientras retiene los contaminantes. (37)

Tiene la capacidad de retener y eliminar partículas sólidas disueltas en el agua, lo que incluye sólidos suspendidos y sedimentables; cuando contiene partículas como arcillas, arenas o sedimentos, actúa como una barrera física que las retiene y permite el paso únicamente del agua purificada. Esto ayuda a clarificarla y reducir su turbidez, mejorando así su calidad y haciéndola apta para diversos usos; sin embargo, por el cuidado del equipo, es importante contar con un sistema de tratamiento antes para eliminar las partículas más grandes. (38)

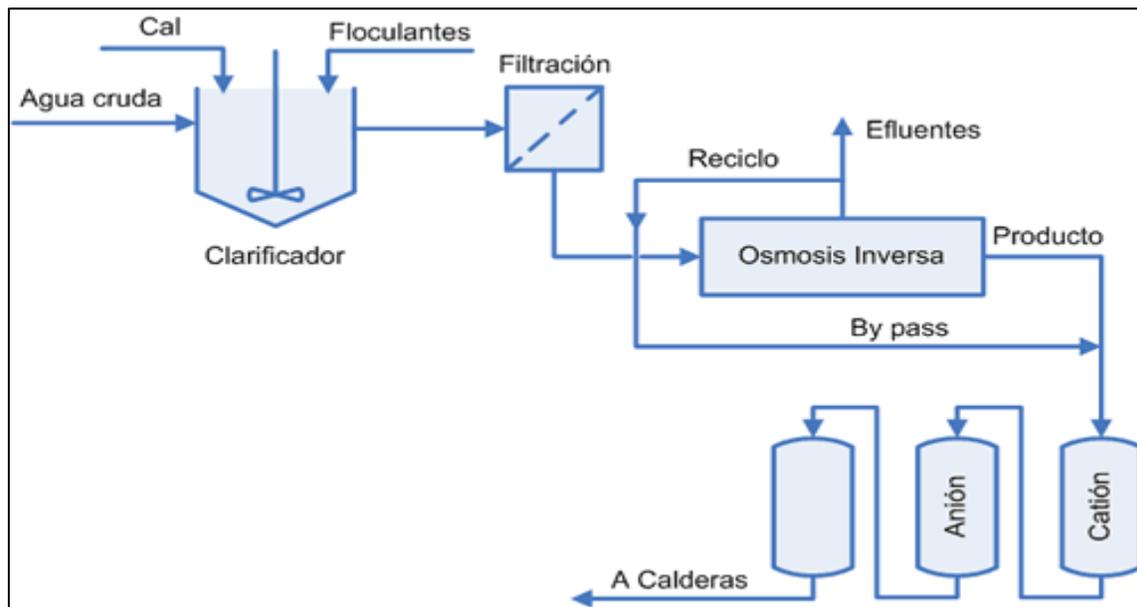
El funcionamiento básico de una planta de tratamiento de osmosis inversa implica los siguientes pasos: (ver **Figura 35**)

- **Pretratamiento:** el agua cruda, que contiene metales, sólidos suspendidos y acidez, pasa por un proceso de pretratamiento para eliminar las partículas grandes y reducir la carga de sólidos suspendidos. Esto puede involucrar, la sedimentación mediante el uso de coagulantes y/o floculantes, el ajuste de pH mediante la cal, además de la filtración y la eliminación de partículas en estado coloidal.
- **Ósmosis inversa:** el agua pretratada se presuriza y se fuerza a pasar a través de una membrana semipermeable en la etapa de osmosis inversa. Esta membrana tiene poros muy pequeños que solo permiten el paso del agua y bloquean las impurezas y los contaminantes, incluidos los metales y los iones de acidez. Como resultado, el agua se separa de los contaminantes y se obtiene agua tratada de alta calidad.
- **Recuperación y rechazo:** durante el proceso de osmosis inversa, una parte del agua se convierte en permeado, que es el agua tratada, y otra parte se convierte

en rechazo o concentrado. El rechazo contiene los contaminantes y se descarta o se trata posteriormente para su disposición adecuada.

- Post-tratamiento: el agua permeada de la osmosis inversa generalmente se somete a un proceso de post-tratamiento para ajustar su calidad y características. Esto puede implicar la remineralización para agregar minerales esenciales, la eliminación para descartar cualquier microorganismo restante y la corrección del pH para ajustarlo a los niveles adecuados. (38) (39)

**Figura 35.** Proceso de tratamiento con ósmosis inversa



Fuente: imagen extraída de:

<https://www.textoscientificos.com/quimica/osmosis/abastecimiento-agua>

Después de describir los procesos de cada alternativa, se debe destacar que las cinco presentadas no son excluyentes entre sí. Es decir, según la descripción de cada una de ellas, se requiere combinar varias opciones para lograr un vertimiento que cumpla con la normativa vigente.

## 10. Análisis de resultados y Discusión.

La minería es una actividad que puede generar una gran cantidad de desechos, incluyendo efluentes mineros líquidos, los cuales pueden contener metales pesados disueltos y otros contaminantes que son perjudiciales para la vida acuática y, en última instancia, para la salud humana. Por lo tanto, es crucial implementar medidas preventivas y correctivas para abordar estos problemas.

Los resultados obtenidos y análisis de estos, en este trabajo indican que existe un problema en el sistema de tratamiento de ARnD en la Mina El Silencio, debido a que se encontraron concentraciones de varios parámetros por fuera de la norma (Resolución 0631 del 2015) en el efluente minero de la etapa de exploración y extracción.

Estos resultados son consistentes con los monitoreos externos e internos realizados durante el período 2019-2022, lo que sugiere que el problema ha sido persistente a lo largo del tiempo. Aunque la Mina El Silencio cuenta con un número suficiente de depósitos de agua para retener los sólidos generados en los procesos de exploración y extracción, la mayoría de ellos solo cuentan con un compartimento, lo que no permite una mayor retención de sólidos; debido a que los primeros tanques construidos se ubicaron de acuerdo con la profundidad y los frentes de trabajo que se iban abandonando. Estos espacios se utilizaban como depósitos para almacenar el agua a bombear a la superficie; aunque es importante aludir que, la Mina El Silencio cuenta con más de 170 años en operación y antes de la implementación de la Resolución 0631 de 2015 en Colombia, no existía un valor máximo permisible específico para el vertimiento de sólidos a fuentes hídricas, solo se contaban con requisitos ambientales generales que establecían pautas para la gestión de aguas residuales y la protección de los recursos hídricos. Lo que condujo a una menor preocupación y falta de incentivos para desarrollar sistemas más efectivos.

Sin embargo, las limpiezas de los tanques y/o depósitos es un tema a parte y no es realizado de manera constante, en su mayoría se implementa una vez al año, (ver **Tabla**

8) lo que genera acumulaciones de sedimentos y otros contaminantes que comprometen la efectividad de retención de los sistemas y afecta la calidad del agua.

En la actualidad se efectúa un ajuste de pH, se lleva a cabo de manera manual mediante la adición de cal hidratada en un tanque de 250 litros de agua, ubicado en el nivel 5. Sin embargo, de acuerdo con lo explicado anteriormente, se puede asegurar que la dosificación no se hace adecuadamente. Como resultado, se han observado alteraciones en los niveles de acidez o basicidad del vertimiento en algunas ocasiones (ver **Figuras Figura 8**; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), lo que generara un detrimento en la calidad del agua.

La comparación de los resultados fisicoquímicos con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 revela que existen problemas en varios parámetros, incluyendo acidez, basicidad, sólidos en suspensión y sólidos totales, grasas y aceites, y metales pesados como cadmio, cinc, hierro y plomo, resultados preocupantes, debido a que las descargas de estas aguas son directamente en la Quebrada Peñitas, dando lugar a la afectación de la disponibilidad de nutrientes del agua, presentación de problemas en la cadena alimenticia, reducción de la penetración de la luz solar en el agua, esto más que todo por la presencia de sólidos, lo que afecta el crecimiento de las plantas y generación de la vida acuática, teniendo un impacto negativo en el equilibrio del sistema acuático. (40) Además de estos impactos en la biota acuática, también puede traer efecto a la salud de las personas en caso de algún contacto o ingreso al cuerpo, como es la irritación en la piel, ojos, membranas mucosas, dermatitis, daño de estómago, náuseas, daños en órganos, pérdida de memoria, etc. (41)

Por otro lado, la presencia de altas concentraciones de metales en las aguas residuales genera preocupaciones adicionales debido a su capacidad de disolverse y su potencial impacto en el medio ambiente acuático. Es importante tener en cuenta que la solubilidad en el rango de pH presentada (ver **Tabla 13**) es una aproximación y pueden variar dependiendo de las condiciones específicas del agua y la presencia de otros compuestos. Además, la solubilidad de estos no indica su toxicidad o peligro potencial, debido a que la toxicidad depende de la forma en que se encuentren el metal (estado de oxidación) y de su disponibilidad para ser absorbidos por organismos vivos.

Entre los metales mencionados, el cinc es generalmente el que tiene una menor tendencia a precipitar en forma de sólidos insolubles en comparación con el cadmio, hierro y plomo, debido a que su solubilidad es moderada en agua y puede mantenerse en forma de cationes  $Zn^{2+}$  en solución, especialmente en condiciones neutras o ligeramente ácidas. Esto significa que es menos probable que el cinc forme precipitados sólidos en comparación con el cadmio, hierro y plomo y sea más difícil su remoción en estas condiciones.

En cambio, el cadmio, el hierro y el plomo tienden a precipitar y formar compuestos insolubles en agua en mayor medida, dependiendo de las condiciones del agua, como el pH y la presencia de otros compuestos. El cadmio y el plomo, en particular, tienen una mayor tendencia a formar precipitados sólidos, especialmente en condiciones de pH más altos o alcalinos.

Es importante tener en cuenta que la solubilidad y precipitación de estos metales también dependen de la presencia de otros iones y compuestos en el agua, así como de las condiciones específicas del sistema en estudio. Por lo tanto, es necesario considerar las características del agua y los factores ambientales antes de llegar a conclusiones definitivas sobre la precipitación de estos metales.

Sin embargo, toda esta problemática presentada; no es única de la Mina El Silencio. Se han reportado problemas similares en otros sitios mineros en todo el mundo, uno de ellos fue un estudio realizado en el 2018 por Henry Pineda, denominado “Análisis de las concentraciones de Mercurio (Hg), Arsénico (As), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni) generados por la minería aurífera en el occidente y norte de Colombia, con el fin de realizar una propuesta de niveles permisibles en los sedimentos de actividades extractivas de minerales”, donde en términos generales, de los 56 lugares donde se realizaron toma de muestras puntuales, 18, presentaron concentraciones de metales en el agua que excedieron las concentraciones establecidas en la normatividad ambiental de vertimientos. (42)

Además, en cuanto a la acidez, es presentada de manera natural y también generada debido a la oxidación de minerales sulfurosos cuando entra en contacto con el aire y el

agua (43). En la Mina El Silencio existen diversas rocas mineralizadas, entre ellas la Pirita siendo esta, altamente reactiva con el oxígeno y el agua, lo que permite en su mayoría la generación del drenaje ácido de la mina. Esto, se comprueba con una tesis de maestría realizada en el año 2020, por Juan Adolfo Guillén, titulada “Vertimiento de efluentes mineros de Mina Marta en la contaminación de las aguas del Rio Tinyaccla”, en el cual menciona que, por las precipitaciones pluviales, se infiltra agua en los diferentes niveles de la operación haciendo que entren en contacto con rocas y minerales como la Pirita, lo que permite que se obtenga aguas con un pH de hasta 5.0 unidades, haciendo que requiera un tratamiento antes del vertimiento en el cuerpo receptor. (44)

Pasando al tema de los Sólidos Suspendidos Totales y Solidos Sedimentables que es otro de los parámetros que se incumplen en la mina El Silencio (ver **Figura 11**, **Figura 12**) se encuentran estudios que cuentan con la misma situación como es el caso de la tesis de grado realizada por Jose Betancurt y Álvaro Huamán, denominada “Tratamiento fisicoquímico de aguas turbias de la minera aurífera Tunquimayo Mining E.I.R.L Camanti-Quincemil”, encontrando vertimiento que sobrepasan los límites comparados con respecto a la norma legal, encontrando una alta turbidez en el agua de 3893 NTU y una concentración de Sólidos Suspendidos Totales de 2360 mg/L; (45) donde en la Mina El Silencio, el resultado más alto en cuanto a sólidos suspendidos totales en los monitoreos externos fue de 242 mg/L y en los internos de 802 mg/L, donde la Resolución 0631 de 2015, establece como máximo límite permisibles, 50 mg/L.

Después de este análisis, es evidente que el tratamiento actual de las ARnD en la Mina El Silencio, en su proceso de exploración y extracción no es suficiente. Para las posibles soluciones a esta problemática, que involucran: fluctuaciones en los resultados de pH, presencia de sólidos suspendidos totales, de sólidos sedimentables y de metales (cadmio, cinc, hierro y plomo), que se encuentran por fuera de los límites permisibles de la Resolución 0631 de 2015; es importante buscar estrategias y considerar la implementación de tecnologías de tratamiento más efectivas al igual que la mejora de las prácticas operativas, por lo que se proponen cinco alternativas que fortalecerán este sistema: la precipitación química, la neutralización, la coagulación y floculación, el uso de zeolitas y la implementación de la ósmosis inversa.

En cuanto grasas y aceites no se entrega una alternativa detalladamente descrita. Se concluye que es un problema de operación, debido a que la presencia de este parámetro en el agua se debe solo a dos situaciones que se presenten en la unidad minera, primero, los procedimientos de limpieza implementado en la trampa de grasa del taller de equipos mecanizados y segundo, la ocurrencia de fugas o derrames de hidrocarburos, por un daño ocasional de un equipo fuera del taller; sin embargo, se entrega algunas recomendaciones, entre ellas, mantenimiento periódico de los equipos mecanizados, la implementación de procedimientos de respuesta rápida para contener y remediar cualquier fuga o derrame de aceite (uso de elementos absorbentes como aserrín, tela oleofílica, contar con kit completo para atención de derrames), además de en caso de ser posible, la instalación y/o construcción de una trampa de grasa adicional.

Mencionando cada una de las alternativas propuestas; la precipitación química, es una técnica valiosa para el tratamiento de efluentes industriales, pero es importante considerar sus ventajas y desventajas antes de su implementación. Se deben tener en cuenta los costos asociados al manejo de lodos y al uso de reactivos químicos, así como los posibles problemas relacionados con olores y gases. Además, es fundamental evaluar la necesidad de etapas adicionales de tratamiento para alcanzar los estándares deseados de calidad del agua.

Para la neutralización de pH es importante realizar un monitoreo regular de este parámetro y ajustar la dosificación de cal hidratada de manera adecuada. Se recomienda establecer procedimientos más precisos y automatizados para controlar y mantener un pH óptimo en el agua tratada, evitando así las fluctuaciones que puedan afectar su calidad y la de los ecosistemas acuáticos que dependen de ella. Esta alternativa, incluye dos tanques de sedimentación, lo cual permite que uno de ellos esté en funcionamiento mientras el otro se encuentre en proceso de lavado. Esta configuración garantiza que la neutralización no se detenga durante el proceso de limpieza de los tanques; adicional, se requiere un espacio para construir el sedimentador final, con el fin de optimizar el rendimiento del tratamiento.

Sin embargo, es importante considerar algunos aspectos en esta propuesta. En primer lugar, se debe asegurar que el diseño y la capacidad de los tanques de

sedimentación sean adecuados para manejar el volumen de efluente tratado y garantizar una sedimentación efectiva de los sólidos. Esto implica un análisis detallado de los requisitos de diseño y una correcta selección de los equipos utilizados. Asimismo, puede implicar costos adicionales, tanto en términos de inversión inicial como de mantenimiento a largo plazo.

En cuanto a la implementación de químicos como el coagulante y el floculante, los cuales hacen parte de los tratamientos más comunes utilizados en los vertimientos mineros; como ya se mencionó anteriormente, una de las investigaciones realizadas en el año 2019 por Álvaro Huamán y Jose Betancurt, se enfocó en el uso de sulfato de aluminio y cloruro férrico para la remoción de turbiedad y sólidos, donde mediante el test de jarras, obtuvieron una dosis óptima de aplicación, logrando que, de una turbiedad de 3893 NTU y una concentración de sólidos suspendidos totales de 2360 mg/L, disminuyera a 6.07 NTU y 20 mg/L, respectivamente. (45) Lo que permite dar una mayor certeza en la utilización de estos productos en la unidad minera con el fin de remoción efectiva, para lo cual se requiere de pruebas de jarras que permitan conocer la dosis óptima.

Pasando al uso de Zeolitas como la clinoptilolita y chabasita serían efectivas para tratar las ARnD de la mina El Silencio, debido a que son minerales microporosos que permite la adsorción de los metales presentes (33); esto se ha visto reflejado en diferentes estudios realizados, uno de ellos del año 2019 por Diego Toro, de la Universidad Industrial de Santander, en su trabajo de grado “Evaluación del Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina mediante el uso de Zeolitas Naturales y Modificadas”, donde estudió la remoción de metales pesados ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ ) de aguas sintéticas en zeolitas clasificadas como clinoptilolita (CLI) y chabasita (CHA) naturales y modificadas, para lo que realizó diferentes ensayos y se pudo determinar que tanto la clinoptilolita como la chabasita, mostraron diferentes porcentajes de remoción, sin embargo, mostró ser más efectiva la segunda mencionada, con porcentajes de remoción de hierro (98.6 %), cinc (81.3%) y cobre (80.1%). Es importante mencionar que, el porcentaje removido de hierro fue con chabasita natural y el de cinc y cobre, con la modificada. (46)

Ahora bien, así como las zeolitas han demostrado ser eficientes en la remoción de metales pesados, la tecnología de ósmosis inversa ofrece otra opción prometedora para el tratamiento de efluentes mineros, así como lo menciona Paola Alvizuri en su tesis doctoral titulada “Estudio de la ósmosis inversa operada a baja presión como tratamiento de una fuente natural contaminada por actividad minera, en la microcuenca Milluni en Bolivia, para el abastecimiento de agua segura a poblaciones” donde determinó que aplicando este mecanismo se puede obtener una remoción de metales pesados como cobre, níquel, cadmio, plomo y arsénico hasta más del 90%, mencionando que la efectividad también depende de la calidad o cantidad de las membrana implementadas. En la microcuenca objetivo de estudio por Alvizuri, se denotó que el metal problema fue el arsénico, por tanto, la planta piloto de ósmosis inversa permitió el estudio del comportamiento y eficiencia de una membrana semipermeable de poliamida con configuración en espiral tipo ULP-2540, marca Kensem de procedencia China, con la cual se hizo posible la remoción de este elemento presente en el agua. (47)

Las principales ventajas de este método son: facilidad de automatización; no se presenta cambios en la composición química de las aguas residuales y presenta altos niveles de remoción. Las desventajas son: alto costo por reemplazar la membrana; como se mencionó previamente, se requieren de altas presiones para su funcionamiento y para permitir dar paso del agua residual por la membrana, dando lugar a una alta demanda de energía, lo que implica costos adicionales; tiene un bajo tiempo de vida con soluciones corrosivas y se necesita de un mantenimiento frecuente.

Todas estas alternativas presentadas, serían mecanismos prometedores para el mejoramiento de la calidad del agua vertida de la Mina El Silencio; sin embargo, para la determinación de cuál implementar (precipitación química, neutralización de pH, coagulación y floculación, zeolitas y ósmosis inversa), es necesario considerar algunos criterios fundamentales, no sin antes validar el hecho de la combinación de varias opciones con el fin de tener un vertimiento de aguas residuales domésticas dentro de lo exigido por la Resolución 0631 de 2015.

Los criterios a los que se hace referencia son:

- Ambientales: la generación de subproductos tóxicos, manejo de residuos, reutilización de materias primas y generación de olores ofensivos.
- Administrativos: la habilidad de los operarios para el tratamiento, su capacitación y la toma de decisiones.
- Técnicos: tiempos de operación y caudales, necesidad de reactivos, eficiencia de remoción.
- Económicos: costo de equipos y mantenimiento y operación.
- Área necesaria: evaluación de espacios y ubicación del sistema de tratamiento a implementar.

## 11. Conclusiones

Según lo encontrado en el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, se puede concluir que:

- Las fases del tratamiento de las ARnD implementado en la mina El Silencio está enfocado en procesos de sedimentación y ajuste de pH, o sea procesos físicos y químicos.
- Las limpiezas a los tanques sedimentadores se realiza generalmente una vez al año y la mayoría son depósitos de agua debido a que no cuenta con compartimientos que permitan mayor retención de sólidos, esto, debido a que la unidad minera no cuenta con un sistema de tratamiento que haya sido planeado y diseñado para tal fin.
- En el 2020, solo se realizó un monitoreo con personal externo, donde los sólidos suspendidos estuvieron dentro de los valores de referencia; este resultado se presentó debido a la poca operación por temas de emergencia sanitaria (Covid 19).
- Del 100% de mediciones de pH realizadas en el vertimiento de la Mina El Silencio durante los años 2019 a 2022, el 9% de las muestras se encontraron por fuera del límite permisible según la Resolución 0631 de 2015
- Del 100% de muestras de SST tomadas en el vertimiento de la mina El Silencio, más del 90% se encontraron por encima del límite máximo permisible según Resolución 0631 de 2015.
- Del 100% de los parámetros analizados en los monitoreos compuestos durante los años 2019 a 2022; el pH, los SSED y el Plomo, se mantuvieron por fuera del límite permisible según normatividad, esto equivale al 7.69%.
- Los parámetros como pH, SST, SSED, grasas y aceites, sulfuros, cadmio, cinc, hierro y plomo, presentaron incumplimiento en al menos uno de los monitoreos realizados en el periodo 2019.-2022.
- En cuanto a las mediciones puntuales realizadas en los depósitos de agua, los que más reciben aporte de acidez, son los de los niveles 30, 40 y 43 y en lo que se

refiere a sólidos, los tanques 34 y 39, aunque muestran retención de sólidos, no son suficiente para la generación; situación quizá presentada por la ausencia de limpiezas continuas.

- Las alternativas propuestas, como la precipitación química, la neutralización de pH, el tratamiento con coagulante y floculante, el uso de zeolitas y la ósmosis inversa, ofrecen diferentes enfoques para abordar los problemas del efluente minero permitiendo que cumplan con los estándares requeridos.
- Cada alternativa tiene sus ventajas y desventajas, y la elección de la opción más adecuada debe ser a partir de diversos factores, como la composición del efluente, la capacidad de tratamiento necesaria, los recursos disponibles, las consideraciones ambientales, donde se hace necesario la combinación de varias alternativas para lograr los mejores resultados.
- Cualquier opción de tratamiento debe ir acompañada de un monitoreo constante para asegurar el cumplimiento de los estándares y realizar los ajustes si es necesario. Además, se debe prestar atención a la gestión adecuada de los lodos y residuos generados durante el tratamiento.
- Las comunidades que están en contacto con los vertimientos mineros que cuentan con las características contaminantes ya mencionadas, están expuestos a riesgos significativos para su salud, como lo son irritaciones en la piel, los ojos y las membranas mucosas, daños estomacales y de órganos, náuseas, pérdida de memoria.
- La biota acuática que se encuentra en la fuente receptora del vertimiento minero puede sufrir efectos adversos como alteraciones en el comportamiento, crecimiento, extinción, entre otros que afectan el equilibrio ecosistémico.

En conclusión, este proyecto ha permitido identificar la existencia de problemas en el sistema de tratamiento de ARnD en la Mina El Silencio, perteneciente a la empresa Aris Mining Segovia. Los resultados obtenidos a lo largo de las tres etapas de investigación muestran que el efluente minero generado durante los procesos de exploración y extracción en la mina presenta niveles elevados de diversos contaminantes que superan los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, estos son,

acidez, basicidad, presencia de sólidos suspendidos y sedimentables, grasas y aceites, y metales pesados como Cadmio, Cinc, Hierro y Plomo. Estos resultados son preocupantes, ya que los contaminantes mencionados pueden tener impactos negativos en el medio ambiente.

A partir de los resultados obtenidos, se sugiere la implementación de tecnologías de tratamiento más efectivas y la mejora de las prácticas operativas en la mina. Además, de implementar medidas de monitoreo más rigurosas para garantizar que los niveles de contaminantes en el efluente minero cumplan con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

Las alternativas de mejora presentadas en este proyecto pueden ser de gran utilidad para la empresa Aris Mining Segovia, ya que permitiría reducir los impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente generados por el sistema de tratamiento de ARnD actual en la mina El Silencio. Es necesario seguir trabajando en este sentido para garantizar una gestión ambientalmente responsable de las actividades mineras y contribuir a la sostenibilidad del sector minero en Colombia.

## 12. Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos en el estudio, se recomienda implementar mejoras en el sistema de tratamiento de las aguas residuales no domésticas generadas en la mina El Silencio. Para ello, se sugiere la implementación de tratamientos adicionales para reducir la presencia de sólidos en suspensión, sedimentables, grasas y aceites, y metales pesados presentes en el efluente.

Asimismo, se recomienda tecnificar el proceso de ajuste de pH que realiza en el nivel 5 con la adición de cal, para evitar las fluctuaciones de acidez o basicidad en el efluente. También se recomienda, la limpieza más frecuente de los depósitos de agua ubicados en los diferentes niveles de la operación en la etapa de exploración y extracción para garantizar una mejor calidad del agua residual tratada. Adicional, es importante capacitar al personal encargado del tratamiento de aguas residuales para asegurar que estén al tanto de los cambios y mejoras propuestas, y tengan el conocimiento de cómo llevar a cabo las limpiezas y monitoreos adecuado del sistema de tratamiento.

En cuanto a las grasas y aceites, mejorar los procedimientos de limpiezas y ejecutar los constantes mantenimientos de los equipos mecanizados, donde además se capacite y se tenga personal calificado para la realización de estas labores y la instalación de una trampa de grasas adicional.

Para la elección de la mejor alternativa presentada (precipitación química, neutralización, coagulación y floculación, zeolitas u ósmosis inversa) para el tratamiento de las ARnD de la Mina El Silencio, es recomendable realizar una matriz comparativa teniendo en consideración los subcriterios: habilidad de los operarios, experiencia en la industria minera, generación de subproductos, manejo de residuos, olores ofensivos, reutilización de materias primas, costo de equipos, área necesaria, mantenimiento y operación, tiempo de operación y caudales; para luego pasar a pruebas de laboratorio y a escala piloto.

Por último, se enfatiza la importancia de cumplir con la legislación ambiental y los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015. La empresa Aris Mining Segovia con su responsabilidad ambiental, conoce que el no cumplimiento de estos límites trae implicaciones negativas tanto en el medio ambiente como en la salud pública, así como sanciones y multas.

### 13. Referencias bibliográficas

1. Hernández C. El camino que recorre Segovia para tener una minería más sostenible. [periódico en internet]. Portafolio. 24 de septiembre de 2021. [Citado 2023 May 5]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/mineria-en-colombia-formalizacion-minera-en-segovia-con-gran-colombia-gold-556612>
2. Torrico I. A 650 metros de profundidad está el primer refugio minero de Colombia. El Mundo.com [periódico en internet]. 2017 [citado 2023 May 5]. Disponible en: <http://www.elmundo.com/noticia/A-650-metros-de-profundidad-esta-el-primer-refugio-minero-de-Colombia/361082>
3. Hernández M, Sanz L, Mancebo J. Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería. Archivo PDF [internet]. 2014 [citado 2023 May 5]. Disponible en: [https://oa.upm.es/44286/1/INVE\\_MEM\\_2014\\_238768.pdf](https://oa.upm.es/44286/1/INVE_MEM_2014_238768.pdf)
4. Puente A, Calderón J. Optimización del sistema de tratamiento y gestión sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase III, provenientes de la bocamina del nivel 250 (EF 03) al río San José - Perú. Industria Data-Revista de Investigación. 2018; 21 (2): 7-15. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/816/81658967002/html/>
5. Caballón M. Optimización del tratamiento de las aguas residuales industriales generadas en el proceso de explotación minera subterránea (nivel 10) de la compañía minera Casapalca S.A. - U.E.A. Americana en el año 2017. Archivo PDF [Internet]. 2020 [citado 2023 May 5]. Disponible en: [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/7993/3/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Caballon\\_Quispe\\_2020.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/7993/3/IV_FIN_107_TE_Caballon_Quispe_2020.pdf)
6. Álava J. Simulación mediante GPS-X del proceso de acondicionamiento de aguas residuales procedentes de actividades mineras para su reutilización en el propio sistema [Tesis de Maestría]. España: Universidad de Oviedo; 2021. Disponible en: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/60605>

7. Aguilar P, Navarro L. Propuesta de diseño del sistema de tratamiento para reusar aguas residuales industriales generadas por la actividad minera en la Cantera Encanto Blanco, Chongos Alto - 2021 [Tesis de pregrado]. Perú: Universidad Continental; 2022. Disponible en:  
[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11542/4/IV\\_FIN\\_110\\_107\\_TE\\_Aguilar\\_Navarro\\_2022.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11542/4/IV_FIN_110_107_TE_Aguilar_Navarro_2022.pdf)
8. Sánchez D, Cañón J. Análisis documental del efecto de vertimientos domésticos y mineros en la calidad de agua del río Condoto (Chocó - Colombia). *Gestión y Ambiente*. 2010; 13 (3): 115-130. Disponible en:  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/37475/25420-89421-1-PB.pdf?sequence=1>
9. Álvarez D. Alternativas para el Tratamiento de Vertimientos Provenientes de la Explotación de Oro en el Distrito de California-Vetas, Santander [Tesis de grado]. Santander: Universidad de Pamplona; 2017. Disponible en:  
[http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/4943/1/Alvarez\\_20127\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/4943/1/Alvarez_20127_TG.pdf)
10. Gonzales, V. Evaluación del impacto ambiental de los vertimientos de minería aurífera sobre la quebrada Bemango (Remango) en el municipio de Buriticá departamento de Antioquia [Tesis de maestría]. Manizales: Universidad de Manizales; 2018. Disponible en:  
[https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/4051/Gonzalez\\_Melendez\\_Viky\\_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/4051/Gonzalez_Melendez_Viky_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
11. López M. Selección de técnicas para el tratamiento de aguas residuales con contenido elevado de metales pesados, enfocado a la sostenibilidad en la industria minera colombiana [Proyecto Integral de grado de Especialista]. Bogotá: Fundación Universidad de América; 2021. Disponible en:  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8407/1/893736-2021-I-GA.pdf>
12. Muñoz O. Análisis de concentraciones de Cadmio asociado a la explotación minera subterránea de oro de veta en el Distrito Minero Segovia Remedios

- (DMSR) [Trabajo investigativo]. Manizales: Universidad de Manizales; 2022. Disponible en: <https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500>
13. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Minería [página de internet]. En: Cuéntame de México. Economía; fecha de publicación no disponible. [Citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=e>
14. Echavarría C. Manejo del agua en la minería artesanal y de pequeña escala de aluvión [página de internet]. En: Alliance for Responsible Mining; fecha de publicación no disponible. [Citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.responsiblemines.org/2019/03/manejo-del-agua-en-la-mineria-artesanal-y-de-pequena-escala-de-aluvion/>
15. Engeoexpert. La minería subterránea: ¿En qué consiste? [Página de internet]; enero de 2019 [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://ingeoexpert.com/2019/01/18/la-mineria-subterranea-en-que-consiste/>
16. Minería Sostenible de Galicia. Minería moderna, minería del Siglo XXI [Página de internet]; febrero de 2020 [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://minariasostible.gal/es/mineria-moderna-mineria-del-siglo-xxi/#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20moderna%20busca%20la,en%20una%20actividad%20altamente%20tecnificada.>
17. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Permisos de vertimiento [Página de Internet]. Bogotá D.C.: CAR; fecha de publicación no disponible. [Citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/vercontenido/1168>
18. Gómez A, Quintero J. Términos de referencia para la presentación del informe de caracterización de vertimientos líquidos. Archivo PDF [Internet]. Cornare: Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare; fecha de publicación no disponible [Acceso el 5 de mayo del 2023]. Disponible en: [https://www.cornare.gov.co/Tramites-Ambientales/TR/ter\\_ref\\_manejo\\_vertimientos.pdf](https://www.cornare.gov.co/Tramites-Ambientales/TR/ter_ref_manejo_vertimientos.pdf)
19. Equipo y laboratorio de Colombia. Tratamiento de aguas. [Artículo de internet]. Fecha de publicación no disponible. [Citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en:

- <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/tratamiento-de-aguas#:~:text=En%20ingenier%C3%ADa%20ambiental%20el%20t%C3%A9rmino,de%20proceso%20o%20residuales%20%E2%80%94llamadas%20>
20. Santos J, Uribe J. Decreto 2667 de 2012. [Diario Oficial de Internet]. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; 2012 [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en:  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=51042>
21. Segovia (Antioquia). Dónde nació Segovia Antioquia [Página de internet]. Wikidata; fecha de publicación no disponible [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: [https://es.wikidat.com/info/Segovia\\_\(Antioquia\)](https://es.wikidat.com/info/Segovia_(Antioquia))
22. Osorio D. Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 "Somos Segovia Generando Confianza". Archivo PDF [Internet]. Segovia (Antioquia): Alcaldía de Segovia; 2020 [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en:  
[https://segoviaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/segoviaantioquia/content/files/000186/9282\\_somos-segovia-generando-confianza-aprobado.pdf](https://segoviaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/segoviaantioquia/content/files/000186/9282_somos-segovia-generando-confianza-aprobado.pdf)
23. Aris Mining. Operación Segovia [Internet]. Aris Mining; 2022 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.aris-mining.com/operations/operating-mines/segovia/overview/default.aspx>
24. Aris Mining. Acerca de Aris Mining [Internet]. Aris Mining; 2022 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.aris-mining.com/about-us/about-aris-mining/default.aspx>
25. Gran Colombia. Informe de Sostenibilidad Corporativo 2020. Archivo PDF [Internet]. Gran Colombia Gold; 2020 [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en: [https://s27.q4cdn.com/512972177/files/doc\\_downloads/sustainability/overview/07/Gran-Colombia-Gold-2020-Informe-de-sostenibilidad.pdf](https://s27.q4cdn.com/512972177/files/doc_downloads/sustainability/overview/07/Gran-Colombia-Gold-2020-Informe-de-sostenibilidad.pdf)
26. Gran Colombia. Buena Ciudadanía - Fundación [Página de internet]. Gran Colombia Gold; fecha de publicación no disponible [citado el 5 de mayo de 2023]. Disponible en:  
<https://www.grancolombiagold.com.co/fundaciongrancolombiagold#:~:text=La%20fundaci%C3%B3n%20Gran%20Colombia%20Gold,las%20compa%C3%B1as%20vinculadas%20%20subsidiarias%20>

27. El ciclo del fósforo [Internet]. Khan Academy. [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en:  
<https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-phosphorous-cycle>
28. El ciclo del nitrógeno [Internet]. Khan Academy. [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en:  
<https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-nitrogen-cycle>
29. Rodríguez R, García Á. Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente [Internet]. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España; 2006 [citado el 10 de junio de 2023]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Lorenzo-Pacheco/publication/263741877\\_Los\\_residuos\\_minero-metalurgicos\\_en\\_el\\_medio\\_ambiente\\_Mining\\_and\\_metallurgical\\_waste\\_in\\_the\\_environment/links/55472f330cf24107d3981b93/Los-residuos-minero-metalurgicos-en-el-medio-ambiente-Mining-and-metallurgical-waste-in-the-environment.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Lorenzo-Pacheco/publication/263741877_Los_residuos_minero-metalurgicos_en_el_medio_ambiente_Mining_and_metallurgical_waste_in_the_environment/links/55472f330cf24107d3981b93/Los-residuos-minero-metalurgicos-en-el-medio-ambiente-Mining-and-metallurgical-waste-in-the-environment.pdf)
30. Pérez F, Urrea. M. Abastecimiento de aguas. En: Coagulación y Floculación [Internet]. [citado el 29 de mayo de 2023]. p. 34. Disponible en: [https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod\\_resource/content/1/Tema\\_06\\_COAGULACION\\_Y\\_FLOCULACION.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf)
31. Garay M, Bonilla S, Coloma T. Neutralización: aplicado a aguas residuales [Internet]. Compas. 2017 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: [http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/69/3/ilovepdf\\_merged-6-ilovepdf-compressed.pdf](http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/69/3/ilovepdf_merged-6-ilovepdf-compressed.pdf)
32. CONTIQUIM [Internet]. Coagulante y floculante en el tratamiento de aguas. 2022 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en:  
<https://contiquim.com/blog/coagulante-y-floculante-en-el-tratamiento-de-aguas>
33. Margiolos G. Zeolitas en el tratamiento de aguas [Página de Internet]. Primato; fecha de publicación no disponible [citado el 10 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.primato.gr/nuestras-noticias-es/zeolitas-en-el-tratamiento-de-aguas-es/#:~:text=Los%20filtros%20de%20agua%20con,volc%C3%A1nicas%20y%20otros%20minerales%20naturales.>

34. Duarte E, Vizcaíno C. Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial [Trabajo de grado]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2015. Disponible en:  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=ing_ambiental_sanitaria)
35. Curi A, Granda W, Lima H y Sousa W. Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Rev La Serena. 2006; 17(6):111-118. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642006000600017#:~:text=El%20estudio%20muestra%20que%20las,de%20copelas%20quemadores%20de%20amalgama](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017#:~:text=El%20estudio%20muestra%20que%20las,de%20copelas%20quemadores%20de%20amalgama).
36. Zeolitas [Internet]. Plantas de tratamiento de aguas residuales. Fecha de publicación no disponible. [Citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://zeolitas.mx/>
37. Carboctenia [Internet] ¿Qué es la ósmosis inversa? 2022. [Citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: [https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/#%C2%BFQue\\_es\\_la\\_osmosis\\_inversa](https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/#%C2%BFQue_es_la_osmosis_inversa)
38. Albendea F. Tratamiento de efluentes mineros con ósmosis inversa: comparación de tecnologías con aplicación de energía solar [Trabajo de grado]. Sevilla: Universidad de Sevilla; 2020. Disponible en:  
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/106067/TFG-3234-ALBENDEA%20RUIZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
39. Perez G, Sotomayor J. Análisis de Redundancia para Diagnóstico de Fallas de una Planta Desalinizadora de Agua de Mar [Internet]. ResearchGate. 2014 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/291332097\\_Analisis\\_de\\_Redundancia\\_para\\_Diagnostico\\_de\\_Fallas\\_de\\_una\\_Planta\\_Desalinizadora\\_de\\_Agua\\_de\\_Mar](https://www.researchgate.net/publication/291332097_Analisis_de_Redundancia_para_Diagnostico_de_Fallas_de_una_Planta_Desalinizadora_de_Agua_de_Mar)
40. Gobierno de México. Informe del medio ambiente - Agua [Internet]. Gob.mx. [citado el 9 de julio de 2023]. Disponible en:  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap6.html>

41. Prueba de sangre de metales pesados [Internet]. Medlineplus.gov. [citado el 16 de julio de 2023]. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/prueba-de-sangre-de-metales-pesados/>
42. Reyes H. Análisis de las concentraciones de Mercurio (Hg), Arsénico (As), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni) generados por la minería aurífera en el occidente y norte de Colombia, con el fin de realizar una propuesta de niveles permisibles en los sedimentos de actividades extractivas de minerales [tesis de maestría]. Manizales: Universidad de Manizales; 2018. Disponible en: [https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3522/Asce ncio\\_Salazar\\_Hugo\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3522/Asce ncio_Salazar_Hugo_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
43. Drenaje ácido de minas [Internet]. AGQ Labs Colombia. 2022 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://agqlabs.co/2022/06/21/drenaje-acido-minas/>
44. Guillén J. Vertimiento de efluentes mineros de mina Marta en la contaminación de las aguas del río Tinyacclla [tesis de maestría]. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú; 2020. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6180/TESIS%20JUAN%20ADOLFO%20GUILL%c3%89N%20P%c3%89REZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
45. Huamán A, Betancurt J. Tratamiento fisicoquímico de aguas turbias de la minera aurífera Tunquimayo Mining EIRL Camanti- Quincemil [tesis de pregrado]. Cusco, Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco; 2019. Disponible en: <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3849>
46. Toro D. Evaluación del Tratamiento del Drenaje Acido de Mina mediante el uso de Zeolitas Naturales y Modificadas [tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2019. Disponible en: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/0547b2fb-0483-4bea-969f-0c20bd6b099f/content>
47. Alvizuri P. Estudio de la ósmosis inversa operada a baja presión como tratamiento de una fuente natural contaminada por actividad minera, en la microcuenca Milluni en Bolivia, para el abastecimiento de agua segura a poblaciones [tesis doctoral]. España: Universidad Politécnica de Valencia; 2022. Disponible en:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/191428/Alvizuri%20-%20Estudio%20de%20la%20osmosis%20inversa%20operada%20a%20baja%20opresion%20como%20tratamiento%20de%20una%20fuente%20na....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## 14. Anexos

Figura 36. Acuerdo de confidencialidad.

ZAD 773	 <b>GRANCOLOMBIAGOLD</b>
<b>DECLARACIÓN UNILATERAL DE CONFIDENCIALIDAD – TRATAMIENTO DE DATOS</b>	
<b>EMISOR</b>	GRAN COLOMBIA GOLD SEGOVIA SUCURSAL COLOMBIA
<b>RECEPTOR</b>	SIRLEY JOHANA SERNA BETANCUR
<p><b>SIRLEY JOHANA SERNA BETANCUR</b>, mayor de edad, identificada con cédula de ciudadanía N° 1.038547182 actuando en su nombre propio y representación, quien en adelante y para los efectos del presente contrato se denominará el <b>RECEPTOR</b>, acuerda suscribir la presente <b>DECLARACIÓN UNILATERAL DE CONFIDENCIALIDAD – TRATAMIENTO DE DATOS</b> que se regirá por las cláusulas que se indican a continuación, y en lo no previsto en ellas por las disposiciones del Código de Comercio y demás normas concordantes aplicables a la materia de qué trata el presente negocio jurídico, previas las siguientes:</p>	
<b><u>CONSIDERACIONES</u></b>	
<p><b>PRIMERA:</b> El <b>RECEPTOR</b>, está optando por el título de administración ambiental y sanitaria en la Universidad de Antioquia, por lo que está realizando un trabajo cuya temática se relaciona con una propuesta de mejoramiento en el tratamiento del vertimiento minero a partir de la revisión de información de variables físico - químicas y de eficiencia en la mina El Silencio, empresa Gran Colombia Gold, Segovia, años 2019 al 2022. Para lo anterior, el <b>EMISOR</b> entregará los resultados de análisis de laboratorio certificado e internos realizado al vertimiento industrial de la mina El Silencio, años del 2019 al 2022 y la información de los componentes del sistema de bombeo de la mina el Silencio.</p>	
<p><b>SEGUNDO:</b> Considerando que la información que se entregará al <b>RECEPTOR</b> y la misma se considera de carácter confidencial, se ve la necesidad de realizar la presente declaración unilateral de confidencialidad – tratamiento de datos, basados en las siguientes:</p>	
<b><u>CLÁUSULAS</u></b>	
<p><b>PRIMERA. CONFIDENCIALIDAD:</b> El <b>RECEPTOR</b> reconoce y declara que todos los diseños, trabajos, muestras, datos e información de cualquier naturaleza obtenidos, entregados o desarrollados durante el transcurso o con relación a la labor encomendada tanto en la etapa pre, contractual y post contractual (contractual y post contractual si llegara a darse), indicado en las consideraciones, serán confidenciales y pertenecerán exclusivamente al <b>EMISOR</b>. El <b>RECEPTOR</b> hará todo cuanto esté a su alcance para impedir que la información relativa al acuerdo que no deba ser publicada, sea revelada a persona alguna, exceptuando solamente al supervisor del <b>EMISOR</b> y a cualquier otra persona autorizada por éste, por escrito, para recibir dicha información. El <b>RECEPTOR</b> no permitirá que personas no autorizadas examinen la información y documentación resultante de la presente declaración y la guardará en la forma y lugares que indique el supervisor del <b>EMISOR</b>. El <b>RECEPTOR</b> informará a cada uno de sus trabajadores, subcontratistas y dependientes, a cualquier título, de la naturaleza confidencial de la actividad contratada en este contrato, obligación que deberá constar en los contratos de trabajo de sus trabajadores.</p>	

**ZAD 773****GRANCOLOMBIAGOLD**

La obligación de confidencialidad aquí descrita se mantendrá durante la vigencia del presente acuerdo y durante el tiempo que permanezca confidencial la información, e incluirá a los dependientes y asesores de las partes a quienes se les dé a conocer información relativa al proyecto, en la medida en que ello resulte necesario para la ejecución de las obligaciones consagradas en el acuerdo. Se incluye como confidencial, en todo caso, la información relativa a la negociación pactada a través de este contrato, incluyendo, de forma no limitativa, los bienes y/o servicios objeto del negocio, el precio, y la forma de pago; el contenido y desarrollo del contrato a suscribir, y la información entregada para realizar cualquier cotización u oferta.

La obligación de confidencialidad implica no revelar ninguna información confidencial a ningún tercero y no efectuar copias de elementos constitutivos de información confidencial, excepto con ocasión de una autorización de la otra parte o cuando tales copias vayan a ser utilizadas en actividades relacionadas con el cumplimiento del presente acuerdo. Así mismo, el **RECEPTOR** será responsable por el manejo que sus administradores, dependientes, delegados o asesores hagan de la información confidencial. El incumplimiento del deber de confidencialidad dará lugar a la correspondiente indemnización de daños y perjuicios a favor del **EMISOR**, sin necesidad de declaración judicial, y a la aplicación de las demás sanciones a las que legal o contractualmente haya lugar.

**PARÁGRAFO.** Se exceptúa de lo previsto en esta cláusula, cualquier obligación de revelación de información impuesta por una norma imperativa o por órdenes judiciales o administrativas, en cuyo caso la parte afectada por la norma u orden de que se trate, tomará las medidas conducentes a mitigar los posibles perjuicios derivados de la divulgación de la información, y en todo caso, pondrá en conocimiento de la otra parte, tan pronto como sea posible, la norma u orden judicial o administrativa competente por cuya virtud deba revelarse la información confidencial. El incumplimiento del deber de confidencialidad dará lugar a la correspondiente indemnización de daños y perjuicios a favor del **EMISOR**, y a la aplicación de las demás sanciones a las que legal o contractualmente haya lugar.

**SEGUNDA. TRATAMIENTO DE DATOS.** El **RECEPTOR**, en su condición de titular de la información personal autoriza de manera libre, previa, clara, expresa, voluntaria e informada al **EMISOR**, quien es el responsable del tratamiento de los datos personales recopilados durante la relación entre las partes, para almacenar en sus bases de datos los datos personales en caso de ser persona natural y los datos de la persona jurídica y de aquellos colaboradores y dependientes que participen directa o indirectamente en la relación entre las partes, los cuales debieron haber aceptado previamente el otorgamiento de dichos datos al **EMISOR** y tener acceso a los mismos en cualquier momento, tanto durante la vigencia de la relación entre las partes como con posterioridad a la misma. Esta autorización abarca la posibilidad de recolectar y almacenar dichos datos en las bases de datos y sistemas o software propios o licenciados del **EMISOR**. El **RECEPTOR** entiende que el tratamiento de sus datos personales por parte del **EMISOR** tiene una finalidad legítima de acuerdo con la ley y la Constitución y obedece al manejo interno de sus datos en desarrollo de la relación existente entre las partes y que su información personal será manejada con las medidas técnicas, humanas y administrativas necesarias para garantizar la seguridad y reserva de la información, evitando su adulteración, pérdida, consulta, uso o acceso no autorizado o fraudulento.

ZAD 773



El **EMISOR** ha enterado al **RECEPTOR**, de su derecho a conocer el uso dado sus datos, acceder a ellos, actualizarlos y rectificarlos en cualquier momento. Igualmente el **EMISOR** me ha informado en mi calidad de **RECEPTOR** sobre el carácter facultativo de la respuesta a las preguntas que versen sobre datos sensibles y de menores de edad. Igualmente entiendo que son datos sensibles aquellos que afectan la intimidad del Titular o cuyo uso indebido puede generar discriminación.

**PARAGRAFO PRIMERO:** Igualmente, el **RECEPTOR** autorizará al **EMISOR** para que efectúe operaciones sobre sus datos personales tales como recolectar, utilizar, transferir, transmitir, almacenar, procesar, depurar, circular, actualizar, cruzar con información propia y/o de terceros autorizados o suprimir, para los fines relacionados con el objeto de la relación, incluidas auditorías, interventorías, procesos estadísticos o revisión por los asesores legales internos y externos, bajo los criterios establecidos en la Ley 1581 de 2012, el Decreto Reglamentario 1377 de 2013 y demás normas y sentencias que regulen el tema y la política sobre uso de datos personales que se encuentra vigente en la organización. De conformidad con lo anterior, se expresa que el tratamiento de dichos datos podrá tener las siguientes finalidades, las cuales están descritas ampliamente, en caso de cualquier duda, en la política de tratamiento de datos del **EMISOR**:

- (i) La adecuada prestación de los servicios comprendidos en el objeto social del **EMISOR** de acuerdo a sus estatutos.
- (ii) Para los fines comerciales del **EMISOR**
- (iii) Relacionamiento con públicos de interés
- (iv) Fines legales
- (v) Fines de gestión financiera
- (vi) Fines de gestión de compras
- (vii) Fines de salud y seguridad en el trabajo, incluidas protocolos y políticas de seguridad asociadas con pandemias y emergencias de cualquier tipo
- (viii) Las demás necesarias y que se presente en el entorno de la ejecución de la relación entre las partes.

**PARAGRAFO SEGUNDO:** Los datos personales que el **RECEPTOR** autoriza para ser tratados por el **EMISOR** son todos aquellos que con motivo de su relación han sido brindados por este antes, durante y después de la relación entre las partes.

**PARAGRAFO TERCERO:** El **RECEPTOR** autoriza que los datos personales se remitan a las personas naturales o jurídicas diferentes al **EMISOR**, quienes, para dar cumplimiento a las finalidades expuestas anteriormente, los puedan requerir.

**PARAGRAFO CUARTO:** En aras de dar cumplimiento con lo dispuesto en la ley 1581 de 2012 y demás normas concordantes y pertinentes, el **EMISOR** da a conocer al **RECEPTOR**, como titular de los referidos datos, que cuenta con los derechos establecidos en el artículo 8 de la ley 1581 de 2012, los cuales pueden ser consultados igualmente en la política de tratamientos de datos de la compañía.

**PARAGRAFO QUINTO:** La presente autorización de tratamiento de datos personales perdurará hasta que termine su finalidad, dado que la misma se supedita al cabal desarrollo

ZAD 773



de esta relación, y en todo caso, se mantendrá la información del **RECEPTOR**, en las bases de datos del **EMISOR**, después de finalizada la relación.

**PARÁGRAFO SEXTO:** El **RECEPTOR** podrá ejercer a través de los canales o medios dispuestos por el **EMISOR** mediante el correo electrónico [habeasdata@grancolombiagold.com.co](mailto:habeasdata@grancolombiagold.com.co), para la atención de requerimientos relacionados con el tratamiento de datos personales y el ejercicio de los derechos mencionados en esta autorización.

**PARÁGRAFO SÉPTIMO: Autorización de Consulta-** El **RECEPTOR** da consentimiento expreso e irrevocable a consultar en las listas internacionales expedidas por el Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas y las demás que tengan carácter vinculante para Colombia o en los registros o listados nacionales de personas señaladas de tener vínculos con los delitos de lavado de activos financiación del terrorismo o sus delitos fuente u otras emitidas por organismos judiciales y de control establecidas en el Sistema de Autocontrol y Gestión del Riesgo de Lavado de Activos y Financiación del Terrorismo.

**PARÁGRAFO OCTAVO:** Será obligación del **RECEPTOR**, dar cumplimiento a lo señalado en la ley 1581 de 2012, sobre protección de datos personales, sus reglamentos, las normas que las modifiquen, complementen o sustituyan, así como las políticas y manuales de la compañía. Su incumplimiento o desconocimiento acarreará las responsabilidades a que haya lugar, incluyendo el exigir las indemnizaciones, daños y perjuicios que su acción u omisión hayan generado al **EMISOR** o cualquier tercero, especialmente que demanden del **EMISOR** un resarcimiento. Si en la ejecución de la relación es necesario que el **EMISOR** le entregue bases de datos personales o archivos con esta clase de información, el **RECEPTOR** será considerado encargado del tratamiento en los términos de la Ley 1581 de 2012 y el Decreto 1377 de 2013, y las normas que las modifiquen, complementen o sustituyan, por tanto, deberá cumplir su encargo en los términos y condiciones que impone la ley, y en particular las instrucciones que el **EMISOR** como responsable del tratamiento le indique, y siempre para los fines y propósitos que sean estrictamente necesarios y razonables, conforme a la autorización del titular de la información y a las políticas y lineamientos internos del **EMISOR** en materia de protección de datos.

El presente documento se suscribe por el **RECEPTOR** al veintiún (21) día del mes de junio de dos mil veintidós (2022).

**EI RECEPTOR**

Sirley Johana Serna Betancur  
**SIRLEY JOHANA SERNA BETANCUR**  
 C.C. 1.038.547.182

**Figura 37.** Registro fotográfico - Reconocimiento sistema de tratamiento de ARnD mina El Silencio.



Fuente: fotografía tomada por Lizeth Sánchez, Coordinadora ambiental.