



1859

UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Maestría en Minas mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

**“Tratamiento de relaves mineros generados en la Planta de Beneficio
Portovelo 1, código 390368, ubicada en el cantón Portovelo, Provincia de El
Oro”**

**Trabajo de Titulación,
previo a la obtención del
título Magister en Minas,
Mención Mineralurgia y
Metalurgia Extractiva**

AUTOR:

Carlos Bastidas Ramón

DIRECTOR:

Ing. Oscar Estrella Lima MSc.

Loja- Ecuador

2025

Certificación

Loja, 08 de abril de 2025

Ing. Oscar Adrián Estrella Lima. Msc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **“Tratamiento de relaves mineros generados en la Planta de Beneficio Portovelo 1, código 390368, ubicada en el cantón Portovelo, Provincia de El Oro”**, previo a la obtención del título de **Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, de la autoría del estudiante **Carlos Vicente Bastidas Ramón**, con cedula de identidad Nro. **1104217086**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Oscar Adrián Estrella Lima. MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Carlos Vicente Bastidas Ramón**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de identidad: 1104217086

Fecha: 08/04/2025

Correo electrónico: carlos.bastidas@unl.edu.ec

Teléfono: 0998812427

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación

Yo, **Carlos Vicente Bastidas Ramón**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **“Tratamiento de relaves mineros generados en la Planta de Beneficio Portovelo 1, código 390368, ubicada en el cantón Portovelo, Provincia de El Oro”**, como requisito para optar por el título de Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los ocho días del mes de abril del dos mil veinticinco.

Firma:

Autor: Carlos Vicente Bastidas Ramón

Cédula de identidad: 1104217086

Fecha: 08/04/2025

Correo electrónico: carlos.bastidas@unl.edu.ec

Teléfono: 0998812427

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Oscar Estrella Lima MSc.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a quienes han sido mi apoyo y fortaleza en este camino: a mi madre, por su ejemplo, formación y enseñanzas de vida, a mi esposa, por confianza en cada momento y apoyarme incondicionalmente, a mi pequeño hijo que con su amor ha sido mi inspiración para cumplir esta meta. A mis amigos, quienes estuvieron a mi lado en esta aventura académica, y a todos los profesores que han sido parte de mi formación.

Carlos Vicente Bastidas Ramón

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por haber permitido lograr este sueño y darme la fortaleza y la perseverancia para alcanzar este objetivo de superación personal y profesional.

A mi director de tesis, Ing. Oscar Estrella Lima, MSc., por su paciencia y orientación, así como por la dedicación que puso en cada revisión y en cada sugerencia para mejorar mi trabajo. A mis profesores que impartieron sus conocimientos, por su apoyo durante mi formación académica.

De manera especial, quiero agradecer a mi madre, quien con su esfuerzo y sacrificio ha sido mi inspiración y mi mayor apoyo. A mi esposa, por su amor y constante motivación, a mi hijo por ser mi motor todos los días. A mis hermanas, por su cariño y su compañía en cada momento de mi vida. Este trabajo es también para ustedes, que creyeron en mí incluso en momentos en que yo dudaba. A mis amigos y colegas de estudio, por su apoyo y por compartir esta experiencia conmigo.

Carlos Vicente Bastidas Ramón

Índice de contenidos

AUTOR:	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	x
Índice de anexos	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract.....	3
3. Introducción	5
4. Marco teórico	7
Minería.....	7
Socavones	7
4.1.1. Bloques de explotación	7
Transporte	7
Beneficio de minerales.....	7
4.1.2. Trituración.....	8
4.1.3. Molienda.....	8
4.1.4. Cianuración	8
4.1.5. Desorción, fundición y adsorción.....	9
Relaves.....	9
4.1.6. Tipos de relaves.....	9
Tratamiento de relaves mineros	10
4.1.7. Físico-Químico.....	10
4.1.8. Biológicos.....	11
Propiedades físicas-químicas del relave	11
4.1.9. Propiedades físicas	11
4.1.10. Propiedades químicas.....	12
4.1.11. Propiedades mineralógicas	12
5. Metodología	14
5.1. Materiales	14

Materiales de campo	14
Materiales de laboratorio	14
Materiales de oficina.....	14
Materiales geoprocesamiento.....	14
5.2. Área de Estudio	15
5.2.1. Ubicación y Acceso.....	15
5.2.2. Geología Regional.....	17
5.2.3. Geomorfología	18
5.2.4. Clima	19
5.2.5. Metodología para el primer objetivo.....	21
5.2.6. Metodología para el segundo objetivo	22
5.2.7. Metodología para el tercer objetivo	25
6. Resultados	28
6.1. Caracterización de actividades actuales	28
6.1.1. Geología Local	29
6.1.2. Hidrología.....	29
6.1.3. Pluviosidad.....	30
6.1.4. Proceso generador de relaves	30
6.1.5. Balance metalúrgico.....	34
6.1.6. Tratamiento de relaves actual.....	35
6.2. Propiedades físico-químicas y mineralógicas de los relaves.....	36
6.2.1. Caracterización física	36
6.2.2. Caracterización química.....	37
6.2.3. Caracterización mineralógica.....	37
6.2.4. Fluorescencia de Rayos X.....	38
6.3. Propuesta de tratamiento de relaves para la planta de Beneficio Portovelo 1 39	
6.3.1. Filtro prensa.....	39
6.3.2. Floculación	41
6.3.3. Disposición del relave	51
6.3.4. Análisis económico de los métodos propuestos	53
7. Discusión	56
8. Conclusiones	58
9. Recomendaciones	60
10. Bibliografía	62
11. Anexos	64

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (planta de beneficio Portovelo 1)	16
Figura 2. Acceso a la zona de estudio.....	17
Figura 3. Dominios litotectónicos del Sur del Ecuador	17
Figura 4. Metodología del primer objetivo	21
Figura 5. Toma de muestras in situ.....	23
Figura 6. Actividades del segundo objetivo.....	25
Figura 7. Prueba de jarras con polímeros mediante agitación manual	26
Figura 8. Planta de beneficio Portovelo 1	28
Figura 9. Área de trituración.....	30
Figura 10. Área de molinos.....	31
Figura 11. Canalones para el proceso gravimétrico.....	31
Figura 12. Área de remolienda.....	32
Figura 13. Área de agitación.....	32
Figura 14. Horno de fundición.....	33
Figura 15. Área de refinación	33
Figura 16. Área de elusión	34
Figura 17. Piscinas de sedimentación	35
Figura 18. Relaveras	36
Figura 19. Sistema de filtro prensa	40
Figura 20. Sedimentación Floculante HARFLOC 1140.....	44
Figura 21. Propuesta de tratamiento de relaves con floculantes	52

Índice de tablas

Tabla 1. Materiales de campo	14
Tabla 2. Materiales de laboratorio	14
Tabla 3. Materiales de oficina.....	14
Tabla 4. Materiales de geoprocesamiento.....	15
Tabla 5. Coordenadas de la zona de estudio	15
Tabla 6. Rango y nivel de significancia de las alternativas	27
Tabla 7. Equipos utilizados en la planta de beneficio.....	28
Tabla 8. Dimensiones de las piscinas de relaves	35
Tabla 9. Propiedades físicas del relave	36
Tabla 10. Propiedades químicas del relave	37
Tabla 11. Minerales en el relave por el método de ensayo al fuego y absorción atómica	37
Tabla 12. Elementos principales y trazas.....	38
Tabla 13. Especificaciones Floculante HARFLOC – 1110	42
Tabla 14. Especificaciones técnicas floculante HARFLOC – 1140	43
Tabla 15. Especificaciones técnicas floculante HARFLOC – 1145	45
Tabla 16. Condiciones necesarias para el correcto uso del floculante y optimizar su desempeño.....	46
Tabla 17. Especificaciones técnicas floculante HARFLOC-1165.....	46
Tabla 18. Parámetros para un correcto funcionamiento del super floculante.....	47
Tabla 19. Balance de masa y volumen.....	49
Tabla 20. Tratamiento de relaves finos o lamas después que sale de la relavera	49
Tabla 21. Resumen del balance de masa y agua reutilizada o recuperada	49
Tabla 22. Cálculo de volumen tanque dosificador.....	50
Tabla 23. Dimensiones del tanque dosificador	50
Tabla 24. Cálculo de volumen	51
Tabla 25. Comparación entre alternativas	53
Tabla 26. Análisis económico entre los métodos propuestos	54
Tabla 27. Análisis de propuestas	54

Índice de anexos

Anexo 1. Mapa de ubicación

Anexo 2. Ficha de muestreo

Anexo 3. Diagrama de flujo de la planta de beneficio

Anexo 4. Análisis de laboratorio

Anexo 5. Certificación traducción del idioma ingles

1. Título

“Tratamiento de relaves mineros generados en la Planta de Beneficio Portovelo 1, código 390368, ubicada en el cantón Portovelo, Provincia de El Oro”

2. Resumen

El presente trabajo de titulación denominado “Tratamiento de relaves mineros generados en la Planta de Beneficio Portovelo 1, código 390368, ubicada en el cantón Portovelo, Provincia de El Oro”, se centra en el tratamiento de los relaves mineros generados en dicha planta y en la propuesta de un enfoque metodológico para su manejo adecuado. Este tratamiento es crucial por el alto riesgo ambiental que representan los relaves, debido a su contenido de metales pesados y otros contaminantes, los cuales, si no se gestionan correctamente, pueden afectar gravemente al suelo, al agua y la biodiversidad local.

Es por lo que la investigación se enfoca en el cumplimiento de los objetivos establecidos para el tratamiento eficiente de los relaves mineros generados en la planta de beneficio Portovelo 1. Los objetivos específicos incluyen la caracterización física, química y mineralógica de los relaves, así como la evaluación de dos métodos de tratamiento y disposición: el uso de filtro prensa y la floculación. Estos métodos fueron seleccionados debido a su potencial para mitigar la contaminación y optimizar el tratamiento de los relaves. El análisis abarcó un estudio técnico, económico y ambiental con el fin de determinar la viabilidad y efectividad de cada opción.

Este estudio busca caracterizar los relaves de la planta "Portovelo 1", evaluar sus propiedades físico-químicas y mineralógicas, y desarrollar un tratamiento efectivo que permita sedimentar los relaves en un menor tiempo y reducir su impacto ambiental. Para ello, se realizó un análisis de las prácticas actuales en la planta, y se investigó alternativas de tratamiento que cumplan con las normativas ambientales y de esta manera minimizar los riesgos de contaminación.

Para cumplir con lo planificado, se evaluaron dos técnicas de tratamiento de relaves: filtro prensa y floculación, esta última a través de una prueba de jarras. Además, se propuso un método de tratamiento de relaves considerando factores de capacidad de procesamiento, condiciones morfológicas y topográficas de la zona de estudio. Tras un análisis técnico y económico, se concluyó que la floculación es el método más eficiente en términos de costos y tiempo de implementación, gracias al uso de un superfloculante que facilita una filtración rápida y eficaz. Aunque ambos métodos son efectivos, la floculación sobresale por su equilibrio entre costos, eficiencia y menor impacto ambiental.

Palabras clave: relaves, floculantes, filtro prensa, tratamiento, impacto ambiental.

Abstract

The present work entitled "Treatment of mining tailings generated at the "Portovelo 1" processing plant, code 390368, Portovelo canton, El Oro province", focuses on the treatment of mining tailings generated at this plant and on the proposal of a methodological approach for their proper management. This treatment is crucial because of the high environmental risk that tailings represent, due to their content of heavy metals and other contaminants, which, if not properly managed, can seriously affect soil, water and local biodiversity.

For this reason, the research focuses on the fulfillment of the objectives established for the efficient treatment of mine tailings generated at the Portovelo 1 mill. The specific objectives include the physical, chemical, and mineralogical characterization of the tailings, as well as the evaluation of two treatment and disposal methods: the use of filter presses and flocculation. These methods were selected because of their potential to mitigate contamination and optimize tailings treatment. The analysis included a technical, economic, and environmental study to determine the feasibility and effectiveness of each option.

These methods were selected because of their potential to mitigate contamination and optimize tailings treatment. The analysis included a technical, economic, and environmental study to determine the feasibility and effectiveness of each option.

This study seeks to characterize the tailings from the "Portovelo 1" plant, evaluate their physical-chemical and mineralogical properties, and develop an effective treatment that allows the tailings to settle in a shorter time and reduce their environmental impact. To this end, an analysis of the current practices at the plant was carried out, and treatment alternatives that comply with environmental regulations were investigated to minimize the risk of pollution.

In order to comply with the plan, two tailings treatment techniques were evaluated: filter press and flocculation, the latter through a jar test. In addition, a tailings treatment method was proposed considering processing capacity factors, morphological and topographical conditions of the study area. After a technical and economic analysis, it was concluded that flocculation is the most efficient method in terms of cost and implementation time, thanks to the use of a super flocculant that facilitates fast and

effective filtration. Although both methods are effective, flocculation stands out for its balance between cost, efficiency and lower environmental impact.

Keywords: tailings, flocculants, filter press, treatment, environmental impact.

3. Introducción

La minería es una de las principales actividades económicas de Ecuador, especialmente en zonas como la provincia de El Oro, donde se encuentra el cantón Portovelo. Este cantón tiene una larga historia de explotación minera, lo que ha generado tanto beneficios económicos como desafíos ambientales. Entre estos desafíos, uno de los más relevantes es la gestión de los relaves mineros, residuos generados durante el proceso de beneficio de minerales. Los relaves suelen contener metales pesados y otros compuestos potencialmente tóxicos, lo que representa un riesgo considerable para el medio ambiente y la salud pública.

La planta de beneficio "Portovelo 1", con código 390368, ubicada en el cantón Portovelo, procesa minerales y produce relaves que deben ser adecuadamente manejados para evitar su impacto negativo en el entorno. La falta de un tratamiento adecuado puede resultar en la contaminación de suelos, fuentes de agua y ecosistemas locales, comprometiendo la calidad de vida de las comunidades cercanas y la sostenibilidad ambiental de la región.

Este estudio tiene como objetivo principal evaluar alternativas para el tratamiento de los relaves generados en la planta "Portovelo 1". A través de una caracterización física y química de los residuos, se busca identificar sus propiedades y contaminantes específicos. Posteriormente, se propone evaluar diferentes métodos de tratamiento y disposición, tales como el uso de filtro prensa y la floculación, en función de su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Este trabajo pretende aportar una base sólida para la implementación de soluciones sostenibles y cumplir con las normativas ambientales vigentes en el país. Asimismo, se espera que los resultados contribuyan a mejorar las prácticas de manejo de relaves en la industria minera ecuatoriana, minimizando los riesgos ambientales y promoviendo un enfoque de minería responsable en el cantón Portovelo.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

- Proponer un tratamiento eficiente de los relaves generados en la planta de beneficio “Portovelo 1”, código 390368 ubicada en el cantón Portovelo, provincia de el Oro.

Objetivos específicos

- Caracterizar las actividades actuales que generan los relaves de la planta de Beneficio “Portovelo 1”, código 390368 ubicada en el cantón Portovelo, provincia de El Oro
- Determinar las propiedades físico-químicas y mineralógicas de los relaves provenientes de la planta de beneficio “Portovelo 1”, código 390368 ubicada en el cantón Portovelo, provincia de El Oro.
- Elaborar una propuesta que permita manejar y tratar los relaves provenientes de la planta beneficio “Portovelo 1”, código 390368 ubicada en el cantón Portovelo, provincia de El Oro.

4. Marco teórico

Es fundamental abordar las bases conceptuales y legales necesarias para comprender el problema de los relaves mineros y evaluar alternativas de tratamiento y disposición adecuadas. A continuación, se desarrollan los principales conceptos y normativas relevantes para el tratamiento de relaves mineros en la planta de beneficio "Portovelo 1".

Minería

La minería consiste en extraer minerales del yacimiento para llevarlos al lugar donde serán procesados, lo cual, genera vacíos en el yacimiento que pueden tener diferentes formas y dimensiones, dependiendo del volumen de mineral extraído y su disposición original. Estos vacíos, denominados labores mineras, son una consecuencia natural e inevitable de la actividad extractiva (Lavandaio, 2014).

Socavones

Esta actividad se lleva a cabo bajo tierra, creando una serie de túneles horizontalmente o verticalmente, con el propósito de explotar el mineral (Chiquillo, 2020).

4.1.1. Bloques de explotación

Se define como la representación de un yacimiento a través de un muestreo de las características de la zona. En lo que concierne a proyectar la extracción de los bloques se refiere a la disposición del tiempo en el que serán extraídos los bloques a lo largo de un horizonte (Weintraub, 2008).

Transporte

El transporte de mineral consiste en una de las actividades principales de la minería, donde se utiliza los camiones y las palas mineras para cumplir esta función. Se asocia a altos costos atribuyéndoles a los operacionales como el petróleo, estado de la maquinaria, estado del clima, la mano de obra, etc., (Tapia, 2018)

Beneficio de minerales

De acuerdo a Banco Central del Ecuador (2017) beneficio es el procesamiento de minerales extraídos con el cual se obtiene su contenido útil y su ley.

4.1.2. Trituración

La trituración es partir la materia sólida en partes pequeñas, es decir, transformar la materia sin alterar la naturaleza de la misma, lo más homogéneo posible. Los métodos de trituración dependen tanto en la entrada como en la salida del material que se desea obtener, ya que no se puede realizar disminuciones bruscas (250mm a 9mm) (Triana, 2016)

Triana (2016) determina que “en trituración es necesario considerar la tasa de reducción de material, que se conoce como el reglaje de entrada dividido para reglaje de salida de todo proceso de trituración como se ve en la siguiente ecuación” (p.5).

$$\text{Tasa de reducción} = \frac{\text{Diámetro de roca de entrada}}{\text{Diámetro de roca final}}$$

Según Triana (2016) los tipos de trituradoras son:

- Tipo Blade (doble efecto)
- Tipo Dalton (simple efecto)
- Tipo Lyon (excéntrica y leva)
- Tipo Dodge (abertura constante)

4.1.3. Molienda

Molienda es el procesamiento de material con el uso de maquinaria giratoria o cilíndrica, que se realiza con el mineral que llega del chancado, con agua, reactivos y por consiguiente se da paso a la flotación (CODELCO, 2019).

En el caso de molienda convencional se realiza en dos fases, siendo la primera la que emplea un molino de barras, y la segunda usa un molino de bolas, sin embargo, actualmente solo se hace uso del molino de bolas; es importante mencionar que se combina estos procesos con agua para una molienda más uniforme (CODELCO, 2019).

4.1.4. Cianuración

El procedimiento consiste en tratar los minerales o las colas que contienen Oro y plata, con soluciones de cianuro alcalino, de ordinario inferiores a 0.5% de KCN. Estas débiles soluciones disuelven rápidamente el oro y la plata, salvo en casos excepcionales. El NaCN (equivale a un 129 o un 130% de KCN), es usado en lugar de KCN en muchas

plantas; sin embargo, se ha objetado su uso en el tratamiento de algunos minerales (Durán, 1959).

Cuando los minerales o colas, son ácidos, o cuando contienen sulfatos de hierro o de cobre, provenientes de la oxidación de las piritas que puedan contener, se someten primeramente a un lavado con agua y luego a un tratamiento con solución alcalina de soda o cal; de lo contrario, el consumo de cianuro será exagerado. El oro disuelto con KCN se precipita luego de sus soluciones con zinc en granalla, zinc en polvo o electrolíticamente (Durán, 1959).

4.1.5. Desorción, fundición y adsorción

- **Adsorción.** – La adsorción es un proceso superficial, se efectúa en la concentración o acumulación de una sustancia en una interfaz, dicha sustancia se le denomina adsorbato y el material donde se produce la adsorción se conoce como adsorbente (Cooney, 1998)
- **Desorción.** - La desorción es fundamental en la eliminación de metales pesados, debido a que, reutiliza la biomasa que emplea como biosorbente y recupera los contaminantes (Fomina & Gadd, 2014)
- **Fundición.** – El proceso de fundición se define como transformar un metal de estado sólido a estado líquido, colocando el metal a elevadas temperaturas según su tipo (Intelángelo & Bonato, s.f.)

Relaves

Los residuos sin valor que son derivados de la minería y del proceso del mineral, generalmente el material es fino y húmedo y se almacena en botaderos de desechos industriales. Los relaves se deben depositar en áreas de relleno previamente selladas con estos residuos (Romero & Flores, 2010).

4.1.6. Tipos de relaves

Según el Servicio Nacional de Geología y Minería (2018), los relaves se clasifican en diferentes tipos dependiendo de la cantidad de agua que contienen y del método utilizado para su almacenamiento.

- **Tranque de Relave:** Se considera como un depósito en el cual el muro se edifica con la fracción más gruesa del relave, compactada, derivado de un hidrociclón, mientras

que, la parte más fina, llamada lama, se coloca en el recipiente del depósito (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

- Embalse de Relave: Este depósito tiene un muro de contención hecho de material tomado del entorno cercano, impermeabilizado tanto en la coronación como en el talud interno (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).
- Relave Espesado: Este tipo de depósito pasa por un proceso previo de sedimentación en un espesador, donde los sólidos sedimentan para retirar gran parte del agua contenida. El agua extraída puede reutilizarse, reduciendo el consumo de agua limpia (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).
- Relave Filtrado: Similar al relave espesado, pero con un contenido aún menor de agua, gracias a un proceso de filtración que reduce la humedad a menos del 20% (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).
- Relave en Pasta: Se refiere a una mezcla densa de agua y sólidos, con abundantes partículas finas y bajo contenido de agua, lo que le da una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

Tratamiento de relaves mineros

Los metales tienen una vida útil indefinida, no se descomponen fácilmente y los métodos biológicos o químicos tienen limitaciones o no son viables por sus altos costos. La eliminación de estos se ha efectuado por procesos como: precipitación de hidróxidos, la electrólisis, la oxidación química, entre otros (Litter, s.f.).

4.1.7. Físico-Químico

- Floculantes: De acuerdo a (Arrau, 2006) la floculación es la “agregación de partículas sólidas en una dispersión coloidal, en general por la adición de algún agente” (p.386).

El propósito fundamental de la floculación es agrupar las partículas desestabilizadas, formando acumulaciones más grandes y pesadas que puedan sedimentarse de manera más efectiva. Además, los modelos propuestos para realizar la floculación, se da la aglomeración de partículas en razón al tiempo de 20 a 40 minutos mediante el uso de test de jarras (Canepa de Vargas, 2004).

- **Filtro Prensa:** Es un sistema de filtración a presión, destacándose por su alto grado de automatización y eficiencia en la operación, especialmente en el tratamiento de pulpas provenientes de concentradores y relaves de plantas concentradoras, además, están compuestos por una estructura principal, junto con una serie de placas y marcos alternados que contienen una tela filtrante (Ventosilla, 2014).

4.1.8. *Biológicos*

- **Bacterias:** Se ha comprobado que algunas bacterias pueden aumentar la velocidad de oxidación, lo que acelera la generación de ácido. Es el caso de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* que tiene la capacidad de oxidar compuestos de azufre reducidos y transformar el hierro ferroso en férrico, que luego puede actuar como agente oxidante. Otras bacterias que también contribuyen o aceleran la oxidación de minerales sulfurosos incluyen *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus* (Pocohuanca, s.f.).

- **Fitorremediación:** La fitorremediación es una tecnología sustentable que utiliza especies vegetales para reducir, degradar o inmovilizar contaminantes orgánicos e inorgánicos (ya sean de origen natural o sintético) presentes en el suelo, agua o aire (Espín et al., 2017).

Propiedades físicas-químicas del relave

4.1.9. *Propiedades físicas*

- **Densidad**

La densidad se define como la relación de la masa de un producto (por ejemplo, como si fuera pesado en el vacío) con su volumen (OIML, 2011)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- **Contenido de humedad**

El contenido de humedad es una magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido y se puede representar en términos de una base de masa seca o de una base de masa húmeda (Martines & Lira, 2010).

- **Conductividad**

La Conductividad eléctrica mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica y la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo. A mayor conductividad eléctrica mayor concentración de sales (Cadillo, 2022).

- **Granulometría**

La granulometría es una propiedad del suelo íntimamente relacionada con el comportamiento de este, ya que tiene especial influencia sobre la aireación, retención y movimiento de agua (Grabriels & Lobo, 2006).

4.1.10. Propiedades químicas

- **pH**

Los metales en soluciones acuosas se presentan en diversas formas, lo que genera una fuerte dependencia de las reacciones químicas según el pH, de aquí la fuerte dependencia que existe entre el pH de la solución y la posibilidad de extracción del metal, ya que según la especie química los mecanismos de adsorción varían (Castro, 1998)

- **Prueba de jarras**

La prueba de las jarras son principalmente una simulación de las condiciones y procesos que toma lugar en la clarificación de agua residual en las plantas de tratamiento, la prueba de las jarras es un método experimental donde la dosis óptima es determinada empíricamente (Arias & Valdivieso, s.f.).

4.1.11. Propiedades mineralógicas

Las propiedades mineralógicas son consecuencia de la manifestación externa de la ordenación interna tridimensional de los motivos estructurales, sus características morfológicas son: formas cristalinas, cristalización, hábito, agrupaciones, agregados, aspecto, maclas (Fernández, s.f.)

- **Difracción de rayos X**

La técnica de difracción de rayos X (DRX) se ha empleado para estudiar la composición de suelos e identificar una variedad de materiales, como minerales, aleaciones, metales, catalizadores, materiales ferroeléctricos y luminiscentes, entre otros.

La caracterización se realiza a partir del perfil de difracción de rayos X, el cual es único para cada compuesto natural o sintético, actuando como una especie de huella digital (Aparicio & Carbajal, 2010).

- **Fluorescencia de rayos X**

La espectroscopía de fluorescencia de rayos X es un método que facilita identificar elementos en una muestra analizando la emisión de rayos X secundarios o fluorescentes que se generan cuando la muestra es irradiada con rayos X primarios. Al incidir los rayos X primarios, provenientes de un tubo de rayos X o de una fuente radiactiva, sobre la muestra, los rayos pueden ser absorbidos por los átomos o dispersarse a través del material (De La Cruz, 2018).

- **Absorción atómica**

Es una técnica analítica precisa y eficaz para el análisis de elementos traza, capaz de detectar concentraciones en el rango de partes por billón (ppb, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$) en una muestra. Esta técnica instrumental permite cuantificar al menos 70 elementos diferentes con resultados excelentes, incluso en matrices complejas como suelos, agua y alimentos, entre otros (Castellanos et al., 2018).

5. Metodología

La metodología de este estudio se ha estructurado para caracterizar y analizar los relaves generados en la planta de beneficio "Portovelo 1", así como para evaluar alternativas de tratamiento y disposición. Los pasos incluyen la selección de materiales, la caracterización del área de estudio y la aplicación de técnicas de muestreo y análisis de laboratorio, con el objetivo de cumplir los objetivos específicos planteados. A continuación, se describen en detalle cada una de las fases metodológicas.

5.1. Materiales

Materiales de campo

En la Tabla 1. se detallan los materiales de campo.

GPS	Libreta de campo
Equipo de protección personal	Fichas de campo
Fundas Ziploc	Cámara fotográfica

Materiales de laboratorio

En la Tabla 2 se detallan los materiales de laboratorio.

Tabla 2. Materiales de laboratorio

Fichas de laboratorio	Picnómetro
Tamices	Microscopio
Peachímetro	Balanza
Bomba de vacíos	Mortero

Materiales de oficina

En la Tabla 3 se detallan los materiales de oficina.

Tabla 3. Materiales de oficina

Computadora portátil (Laptop)	Fichas de campo y laboratorio
-------------------------------	-------------------------------

Materiales geoprocesamiento

En la Tabla 4 se detallan los materiales de geoprocesamiento.

Tabla 4. Materiales de geoprociamiento

Software Modsim	Software ArcGIS 10.8.2
Microsoft Office 2021	

5.2. Área de Estudio

La planta de beneficio "Portovelo 1", se encuentra en el cantón Portovelo, provincia de El Oro, Ecuador. Las características geográficas y ambientales del área son cruciales para comprender los factores que afectan el manejo de los relaves.

5.2.1. Ubicación y Acceso

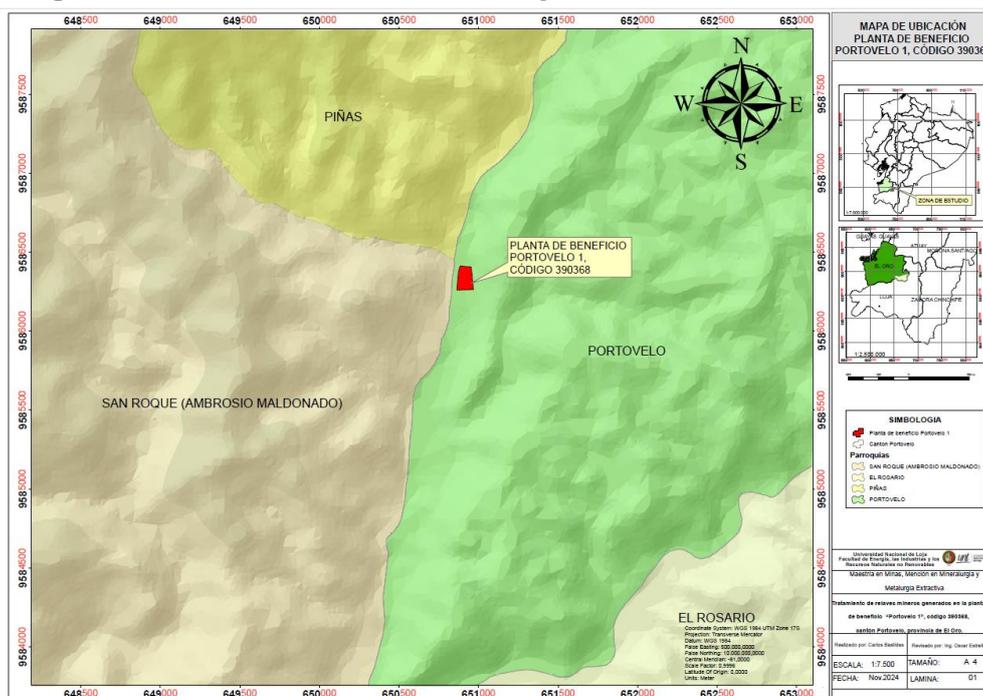
La Planta de Beneficio "Portovelo 1", código 390368 se encuentra ubicada en el Sector de El Salado, Cantón Portovelo, Provincia de El Oro. En la tabla 5 se describen las coordenadas de la zona de estudio y en la figura 1 la ubicación geográfica de la planta de beneficio.

Tabla 5. Coordenadas de la zona de estudio

Coordenadas UTM PSAD 56	
X (m)	Y (m)
651138	9586792
651208	9586785
951214	9586696
951219	9586643
651117	9586639
651121	9586693
651127	9586754

Nota: Elaborado por El Autor, (2025), adaptado de la planta de beneficio Portovelo 1

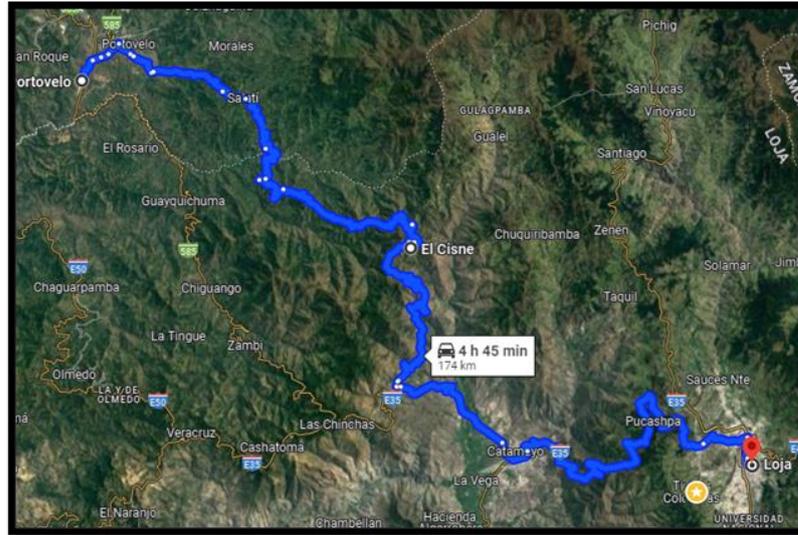
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (planta de beneficio Portovelo 1)



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

Para acceder a la zona de estudio se lo realiza desde la ciudad de Loja, situada a 174 km de distancia, se toma la carretera Panamericana, una vía de primer orden. siguiendo la ruta E50, se llega a San Pedro-El Cisne, desde donde se toma el desvío hacia Ambocas, continuando por Salatí hasta Portovelo, en la provincia de El Oro. Desde Portovelo, se sigue la vía en dirección a El Salado, recorriendo aproximadamente 6.1 km hasta llegar a la zona. En la Figura 2 se muestra el acceso al sitio de investigación.

Figura 2. Acceso a la zona de estudio

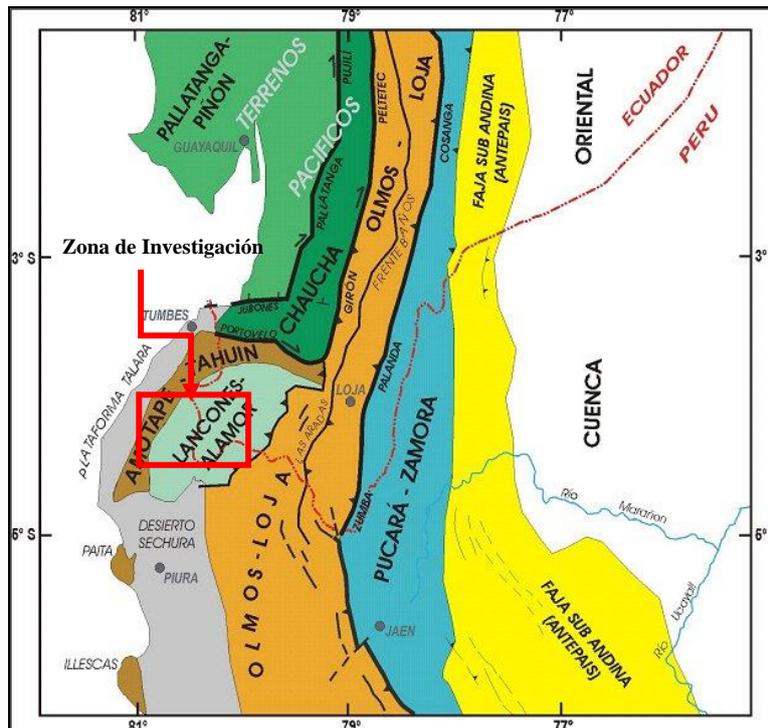


Nota. (Google, s.f.)

5.2.2. Geología Regional

La zona de investigación se ubica al Suroeste del Ecuador (Figura 3), comprendida en la parte Sur por rocas metamórficas del macizo Amotape-Tahuin y en la parte Norte por rocas metamórficas y volcánicas del terreno Chaucha (Pilatasig, L. et al., 2005).

Figura 3. Dominios litotectónicos del Sur del Ecuador



Nota: Dominios litotectónicos del Sur del Ecuador y Norte del Perú. *Elaboración:* Proyecto Zonificación (marzo, 2013). *Fuente:* Pilatasig, L. et al. (2005).

El Grupo Tahuín forma un cinturón de dirección Este – Oeste de aproximadamente 25 km de ancho por 80 km de largo. Está conformado por rocas pelíticas y cuarzo feldespáticas que de Sur a Norte cambian su grado de metamorfismo, desde no metamorizadas hasta un metamorfismo de facies de granulita. Dentro del área de estudio, se encuentran las unidades El Tigre, La Victoria y La Bocana, intruidos por los plutones El Prado y Marcabelí. Su edad deposicional se considera Paleozoico (Feininger, 1978) y el metamorfismo de más alto grado de edad Triásico tardío (Aspden, J. et al., 1995).

El Complejo Metamórfico de El Oro (BGS-CODIGEMM, 1994) forma parte del macizo Tahuín con un rumbo estructural Este-Oeste (Figura N° 3a), el cual contrasta marcadamente con el rumbo estructural NNE-SSO de la Cordillera Real (Aspden, J. et al., 1995). Interpretado como parte de un prisma acrecional, basado en la intercalación de rocas de alto grado (gneis y esquistos azules) y de bajo grado (filitas), presumiblemente de la matriz del prisma (Pratt. et al., 1997). Con una edad comprendida entre el Paleozoico y Cretácico, con eventos metamórficos Triásicos y Cretácicos; incluyendo, lo que generalmente se ha considerado como las rocas más antiguas en el Ecuador (Aspden, J. et al., 1995).

La geología del Complejo Metamórfico de El Oro está descrita en términos de dos sub-provincias informales, delimitadas mediante la zona de falla Zanjón-Naranjo con una dirección Este-Oeste. La subprovincia I se encuentra al Sur de la zona de falla Zanjón-Naranjo, consiste de diversos elementos geológicos que pertenecen a la división semipelítica Tahuín, el Complejo Granitoide Moromoro y el Complejo Máfico Piedras. Al Norte de la zona de falla Zanjón-Naranjo, se encuentra la sub-provincia II que corresponde a la división del melange Palenque, es un complejo estructural heterogéneo que incluye varios cuerpos con límites fallados como inclusiones tectónicas (Aspden, J. et al., 1995).

El terreno Chaucha está conformado esencialmente por eclogitas, esquistos azules, serpentinitas y rocas de bajo grado metamórfico, incluidas en las unidades Raspas, El Toro y Panupali (Litherland, et al., 1994).

5.2.3. Geomorfología

Esta zona corresponde a fondos de valles de los principales drenajes del área de estudio que son el río Calera y el río Amarillo, que se unen a pocos kilómetros antes de

su confluencia con el río Pindo, que forma el río Puyango aguas abajo, existen numerosas quebradas relativamente caudalosas. Se encuentran en altitudes que van desde los 600 m.s.n.m. a 1200 m.s.n.m., son formas con pendientes menores a 5° y desniveles relativos menores a 50 m.

Litológicamente corresponde a depósitos aluviales y sedimentos limo-arcillosos. Esta unidad se encuentra afectada por procesos de erosión fluvial.

5.2.4. Clima

El clima del sector es templado a subtropical, con dos estaciones bien marcadas: la primera una estación lluviosa con una humedad relativa del 84%, evaporación de 738 mm/año, precipitación promedio anual de 1 582 mm/año, especialmente en las partes altas entre los meses de diciembre hasta abril y, la segunda una estación seca de mayo hasta noviembre. La temperatura anualmente oscila entre 16°C a 24°C, correspondiente al bosque húmedo pre-montano, con régimen climático templado y con altitudes que varían entre los 600 m.s.n.m. y los 3.771 m.s.n.m

Indicadores climáticos medios (Portal del Gobierno Municipal de Zaruma, 2013):

- Precipitación total anual: 1229 mm
- Precipitación media mensual: 102 mm
- Evaporación media mensual: 62 mm
- Humedad relativa: 84 %
- Nubosidad: 6/8
- Temperatura ambiental media mensual: 21.8 °C

5.2.5. Hidrografía

La zona de estudio se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Puyango, regada por un sistema hidrográfico cuyos drenajes principales son los ríos Calera y Amarillo (IGM, 2012), con un patrón de drenaje tipo dendrítico, característico de rocas volcánicas.

El río Calera se forma a partir del río Salado como tributario principal, junto con las quebradas Arcapamba, Santa Bárbara, Cascajo, Zaruma Urcu, entre otras.

El río Amarillo, por su parte tiene como tributarios los ríos Ortega y Salvias y las quebradas Honda, Sinsao, de la Máquina, Loma Larga, Las Chontas, entre sus principales.

5.3. Desarrollo de la Metodología

La metodología presente para el proyecto se dividió en tres fases; la fase de campo que consistió en la identificación de los procesos y los muestreos, la fase de laboratorio; en la que se realizó todos los ensayos posibles y la fase de oficina que consistió en el análisis y tabulación de datos. En ese contexto se describe a continuación paso a paso la metodología:

Para abordar el problema científico de la planta de beneficio Portovelo 1, ubicada en el cantón Portovelo, provincia de El Oro, relacionado con el tratamiento de relaves mineros generados, se utilizó un enfoque de investigación mixta. Este enfoque, descrito por Hernández-Sampieri y Mendoza Torres (2020), como “un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación, que implican la recolección y el análisis de datos tanto cuantitativos como cualitativos” (pág. 10), permitió obtener una visión amplia del proceso de manejo de relaves en la planta, al integrar tantos datos numéricos como observaciones cualitativas.

El proceso metodológico para establecer un método adecuado para el tratamiento y disposición final de los relaves generados en la planta Portovelo 1 requirió comprender las características técnicas de la planta y la cantidad de relaves que esta produce. Para ello, se realizaron recopilaciones de datos de campo, alineadas con el planteamiento de Muñoz Razo (2011) sobre la importancia de la recolección de datos en el análisis científico, cuyo propósito es “estudiar las características, conductas y peculiaridades del tema de estudio y establecer una comparación con la teoría existente sobre el tema, para corroborarla, complementarla o refutarla, y así generar nuevos conocimientos sobre el objeto de estudio”, principio básico del relato y planteamiento antes descrito.

La metodología de investigación en Portovelo 1 se estructuró en tres fases, con los siguientes procedimientos:

- **Fase de campo:** Consistió en la descripción visual del área de estudio, observación de la disposición actual de los relaves y la ejecución de un muestreo en distintos puntos del sitio de disposición de residuos. En este proceso se recabo toda la información inicial necesaria sobre las condiciones y características del material.

- **Fase de laboratorio:** netamente se realizó un análisis específico de densidad del material, granulometría, contenido de humedad, pH, conductividad eléctrica y caracterización mineralógica de la muestra recolectada. Estos análisis permitieron comprender la composición y comportamiento de los relaves, datos fundamentales para el diseño de un plan de tratamiento y disposición seguro y eficiente.
- **Fase de oficina:** En esta etapa se analizaron y procesaron los datos obtenidos en las fases anteriores, realizando cálculos y evaluaciones técnicas para desarrollar una estrategia adecuada de tratamiento y gestión de los relaves en la planta Portovelo 1. Esto incluyó la elaboración de informes y propuestas de mejora para optimizar el manejo de los residuos de la planta, conforme a las normativas ambientales y de seguridad vigentes.

Este enfoque integral brindó una comprensión detallada del proceso y permitió establecer una base sólida para la gestión de los relaves en Portovelo 1, asegurando no solo la eficiencia del tratamiento, sino también la minimización de riesgos ambientales asociados a la disposición de los residuos

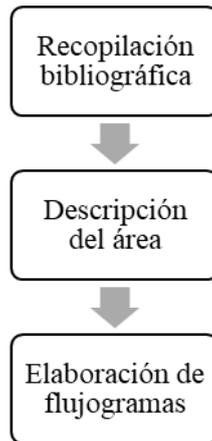
5.2.5. Metodología para el primer objetivo

5.2.5.1. Descripción del área de estudio: Se describió las actividades actuales que generan los relaves en la planta de beneficio Portovelo 1, con el fin de comprender de que proceso provienen estos relaves, para ello se realizó una visita técnica con el fin de describir el proceso desde la trituración, molienda, tratamiento y beneficio la información se registró en la ficha de campo.

5.2.5.2. Elaboración de flujogramas: Se elaboró el proceso mediante flujogramas con la finalidad de esquematizar el proceso para ello se utilizará el Software Modsim.

A manera de resumen la Figura 4 resume el proceso

Figura 4. Metodología del primer objetivo



5.2.6. Metodología para el segundo objetivo

- **Fase de campo**

5.2.6.1. Muestreo: Se estableció dos puntos estratégicos de muestreo en las áreas de disposición de los relaves (en la descarga a las relaveras). Se realizó un muestreo sistemático, tomando en consideración la heterogeneidad del depósito, para asegurar una representación precisa.

En cada punto, se recolectaron pequeñas cantidades de relave hasta alcanzar los 4 kilos requeridos para las pruebas de caracterización. Esto permitió analizar propiedades consistentes con el material procesado en la descarga.

- **Técnica de Muestreo:** Se tomó una cantidad representativa de muestra en varios niveles de profundidad, especialmente en la superficie y en capas más profundas, con el fin de capturar variaciones físico-químicas y mineralógicas.

- **Preparación de Muestras:** Las muestras son secadas y divididas según las necesidades de cada prueba en el laboratorio.

- Las muestras fueron tomadas en fundas ziploc con su respectivo código de muestra, y se las depositó en dos baldes de 5 litros cada uno para extraer 5 kg de relave en cada punto de muestreo.
- Se colocó la muestra en un recipiente de muestreo limpio y seco.
- Se tomó en consideración evitar la contaminación cruzada entre muestras limpiando el equipo de muestreo entre cada toma.
- Se etiquetó cada recipiente de muestra con un código único con la fecha, hora, ubicación y el nombre del muestreador.

- Se registró los detalles en una hoja de muestreo, incluyendo las condiciones climáticas y cualquier observación relevante.
- Se transportó las muestras al laboratorio en condiciones que eviten alteraciones en este caso se utilizó un balde sellado de 5 litros.
- Se almaceno las muestras a temperatura ambiente y protegerlas de la luz solar directa hasta su análisis, que se realizaron en el laboratorio químico y metalúrgico ALBEXXUS (ciudad de Piñas), y los de propiedades físicas en los laboratorios de la planta de beneficio Portovelo 1.

Punto de muestreo:

Se tomó 5 litros de lodo en el punto de descarga a la relavera en las siguientes coordenadas UTM/WGS 84: 650912/9586364

Figura 5. Toma de muestras in situ



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

- **Fase de laboratorio**

5.2.6.2. Propiedades físicas de los relaves: Las propiedades a analizar fueron: densidad, pH, contenido de humedad, y la composición de estos para ello se utilizó los siguientes ensayos:

- **Densidad:** con la finalidad de evaluar el volumen del relave, del mismo modo ayuda a comprender como se comportan los relaves al momento de depositarlos y a entender cómo se comportarán los relaves durante su disposición, de este modo influye en el diseño ya que se puede determinar la cantidad en m³, de relave a depositar.

En este contexto, se aplicó el método del picnómetro, que implica secar la muestra húmeda en un horno para eliminar la humedad. Luego, la muestra se trituro en

un mortero hasta obtener partículas de 75 μm . Posterior se pesó 50 gramos de la muestra seca con una balanza analítica y se colocó en un picnómetro. Se añade agua a la muestra pulverizada y se agita la mezcla para evitar parte del material se adhiera a las paredes del picnómetro. Finalmente, se pesó y se determinó la densidad por medio de la siguiente ecuación.

$$\rho_r = \frac{W_{\text{pulverizada}}}{+W_{\text{pulverizada}} - W_1} * \rho_w$$

Donde:

ρ_w = Densidad del agua

W_2 = Peso del picnómetro + agua (gr/cm^3)

W_1 = Peso del picnómetro + agua + muestra pulverizada (gr/cm^3)

- **pH:** Se realizó con la finalidad de determinar si el relave es propenso a generar drenaje ácido que pueda afectar al suelo o a cuerpo de agua cercanos, para ello se tomó una muestra y se colocó en un vaso de precipitación, asegurándose que este mezclada correctamente, luego con el equipo previamente calibrado se sumerge el electrodo en la mezcla y se determina el pH.

- **Contenido de humedad:** Se realizó con la finalidad de determinar de agua que existe en el relave, ya que el objetivo es reducir significativamente el contenido de humedad. Para este proceso se realizó una diferencia de pesos entre el relave seco y el relave húmedo.

- **Granulometría:** Se realizó con la finalidad de evaluar la distribución de tamaños de las partículas, para ello se utilizó la norma ASTM E11-20. Para ello se seca el relave en el horno, y con el uso de los tamices se coloca la muestra y se agita hasta que el material se filtre hacia el siguiente tamiz. Luego se pesa la cantidad de muestra que se retuvo en cada tamiz y con ello se encuentra los porcentajes finalmente, se elaboró la curva granulométrica según los métodos de Rosim y Schumann

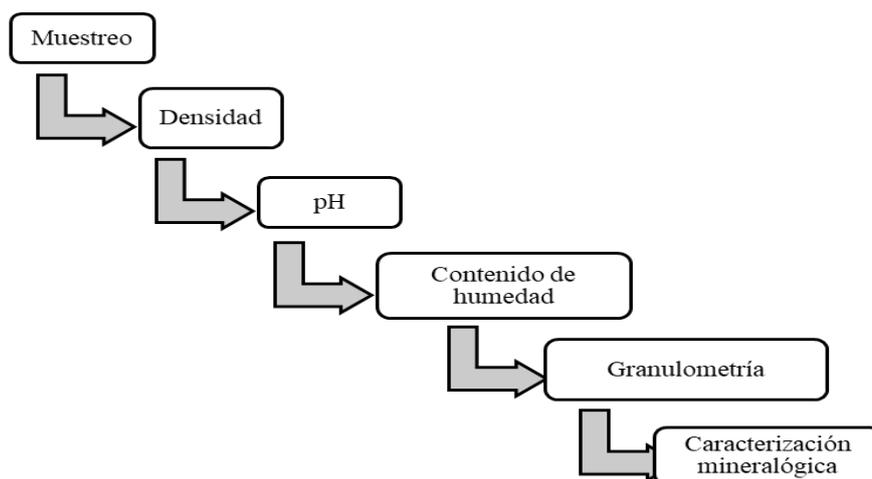
- **Caracterización mineralógica:** Para determinar las concentraciones de metales pesados y a su vez identificar minerales, se realizó los ensayos en el laboratorio químico y metalúrgico ALBEXXUS:

Espectroscopía de absorción atómica: Permitió identificar elementos como oro, plata, cobre, plomo, zinc, arsénico, mercurio y cadmio, información que determino los elementos presentes en el relave.

Difracción de Rayos X: Se realizó con el fin de determinar porcentajes de minerales en mayor concentración en los relaves como cuarzo, micas, carbonatos y metales.

En la Figura 6 se resume las actividades de este objetivo:

Figura 6. Actividades del segundo objetivo



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

5.2.7. Metodología para el tercer objetivo

Se analizó dos técnicas de tratamiento de relaves en función a lo económico, a lo técnico y a lo ambiental, a continuación, se describen los tratamientos de relaves:

5.2.7.1. Filtro Prensa: Los filtros prensa son equipos utilizados por industrias de diferentes sectores para la deshidratación de sólidos, ya sea con el objetivo de recuperar el filtrado, la parte sólida o simplemente realizar su separación. Estos equipos tienen como función principal deshidratar los residuos (relaves), mediante la separación de importantes volúmenes de sólidos y líquidos mediante. En una planta de beneficio de minerales, el filtro prensa resulta óptimo para la deshidratación de lodos, obteniendo altos valores de sequedad de alrededor del 85% aproximadamente.

5.2.7.2. Floculación: Se evaluó los costos de los reactivos y del equipo para el proceso de floculación, así como los gastos operativos asociados. Se analizará la eficacia técnica del proceso en la aglomeración de partículas finas y en la clarificación del agua.

- **Prueba de jarras:** Se elaborará con el fin de determinar el floculante más adecuado y a su vez la dosificación. La prueba consiste en mezclar pequeñas cantidades de relave con agua en un vaso de precipitación, luego se colocarán los reactivos y se mezclará, con ello se observará clarificación del agua, tiempo de sedimentación, y aglomeración del relave.

Figura 7. Prueba de jarras con polímeros mediante agitación manual



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

Para realizar el procedimiento de prueba de jarras se debe tomar en cuenta un procedimiento preestablecido que se lo detalla a continuación:

1. Se necesita un volumen de 12 litros para esta prueba, las cuales son distribuidas en recipientes de 2 litros de muestra en cada uno de los 6 recipientes para su análisis.

2. Se realiza una configuración de la mezcla donde se programa una secuencia de una mezcla rápida intensa y de corta duración, aproximadamente 1 minuto, seguida de una mezcla lenta de aproximadamente 25 minutos, al final se deja reposar por al menos 10 minutos sin mezcla.
3. Se calcula las diferentes dosis a evaluar y se dosifica cada recipiente a analizar (jarras), justo al inicio de la mezcla rápida.
4. Se enciende el programa secuencial y se observa el comportamiento de cada jarra.
5. Al final del tiempo de reposo se observa el volumen de lodos generados y la velocidad de sedimentación.
6. Se extrae una muestra del agua clarificada mediante la ayuda de las llaves que existen en cada jarra.
7. Se analiza los parámetros que se consideren más representativos como pH, turbidez y temperatura.
8. Se monitorea y vigila cuidadosamente ya que es una prueba de corta duración, los detalles visuales que nos brinda junto con los resultados que se obtiene del análisis en laboratorio de los parámetros de cada jarra nos permiten determinar la dosis óptima.

Adicionalmente se considerarán parámetros adicionales como transporte, mantenimiento y disposición final, que describen a continuación:

- **Transporte:** Se evaluarán los costos y logística del transporte de relaves tratados, incluyendo la infraestructura de transporte.
- **Mantenimiento:** Se definirán los requisitos de mantenimiento para el equipo de tratamiento, incluyendo costos de mantenimiento preventivo y correctivo.
- **Disposición Final:** Se planificará la disposición final de los relaves tratados, considerando opciones que minimicen el impacto ambiental.

Finalmente, se espera obtener una propuesta que se viable en los factores, técnico, económico y ambiental, por lo que se evaluará ambas técnicas y finalmente se elaborará un análisis dando valores como lo muestra la tabla 6.

Tabla 6. Rango y nivel de significancia de las alternativas

Rango	Calificación	Significado
1	C	No significativo
2	B	Medianamente significativo
3	A	Significativo

Fuente y elaboración: Elaborado por el Autor. (2025)

6. Resultados

6.1. Caracterización de actividades actuales

La Planta de Beneficio de Minerales Portovelo 1, Código 390368, brinda los servicios de alquiler a los concesionarios mineros a nivel nacional, donde se cuenta en sus instalaciones con un área destinada para acopio de material, área de trituración, molienda, cianuración, planta de elución, Sorbona, y fundición. Su capacidad instalada es de 200 ton/día y laboran prácticamente todo el año, los procesos de recuperación de oro se realizan a través del proceso de cianuración.

Figura 8. Planta de beneficio Portovelo 1



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

En la Tabla 7, se detallan datos generales de la planta de beneficio respecto a equipos:

Tabla 7. Equipos utilizados en la planta de beneficio

Nro.	Equipo	Capacidad	Cantidad	Capacidad Total
1	Trituradora de mandíbulas	2.5 Ton/Día	4	10 Ton/Día
2	Molinos chilenos 3 ruedas	12 Ton/Día	1	12 Ton/Día
3	Molinos chilenos 4 ruedas	14 Ton/Día	9	126 Ton/Día
4	Criba		5	
5	Agitador con carbón activado	3 m ³ /proceso	1	3 m ³ /proceso
6	Agitador con carbón activado	5 m ³ /proceso	1	5 m ³ /proceso
7	Agitadores de carbón activado	18 m ³ /proceso	3	54 m ³ /proceso
8	Agitadores de carbón activado	22 m ³ /proceso	15	330 m ³ /proceso
9	Tambor de Remolienda	2qq	2	4 qq
10	Bomba de sólidos		3	
11	Planta de elución	1.5 ton	1	1.5 ton
12	Planta de elución	2.0 ton	1	2.0 ton
13	Horno		2	
14	Sorbona		2	

Nota: Elaborado por El Autor, (2025), adaptado de la planta de beneficio Portovelo 1.

6.1.1. Geología Local

La geología local de la zona de estudio se descansa sobre el Complejo Metamórfico de El Oro, en la cual predominan las rocas metamórficas como esquistos, gneis, filitas y cuarcitas. Este complejo ha sido fundamental para la actividad minera en la región, y su estudio detallado es clave para la planificación de la explotación minera de manera sostenible y con menor impacto ambiental en el cantón Portovelo.

La unidad El Tigre consiste en una secuencia no metamórfica a débilmente metamorfozada que comprende arcosas, inmaduras, de grano fino a medio, cuarcitas feldespáticas y grawacas junto a lutitas y limolitas intercaladas, esencialmente de origen turbidítico.

En la zona de estudio, estas rocas se presentan como un acúñamiento en la parte Suroeste de la zona, ensanchándose hacia el Sur y al Oeste fuera de la zona de estudio, se encuentran limitadas al Norte por los esquistos, filitas y cuarcitas de la Unidad la Victoria y al Este por rocas granodioríticas correspondientes al Plutón El Prado. Las rocas no metamorfozadas a débilmente metamorfozadas de la unidad El Tigre son de edad Paleozoico (Aspden, J. et al., 1995).

Depósitos y terrazas aluviales: En el área de estudio se ubican a lo largo de los ríos Amarillo, Calera, Luis y Pindo, tratándose de depósitos de arena y grava, localizada en los cauces antiguos y actuales de los ríos.

El material que integra las terrazas es de características muy similares en todas ellas: tales como cantos bien redondeados de naturaleza volcánica e intrusiva principalmente y en menor cantidad de metamórficos con niveles arenosos; están formadas en sus bases por gravas, que de manera gradacional varían con arenas gruesas y arenas finas con presencia de clastos heterolitológicos de diferentes diámetros de 0.50 m a 0.60 m, el color predominante es gris claro.

6.1.2. Hidrología

La zona de estudio se encuentra en la margen izquierda del río Amarillo, donde se encuentran las relaveras, se encuentra en la cabecera de la cuenca del río Puyango, regada por un sistema hidrográfico cuyos drenajes principales son los ríos Calera y Amarillo (IGM, 2012), con un patrón de drenaje tipo dendrítico, característico de rocas volcánicas.

El río Calera tiene como tributario y origen el río Salado y las quebradas Arcapamba, Santa Bárbara, Cascajo, Zaruma Urcu, entre otras.

El río Amarillo tiene como tributarios los ríos Ortega y Salvias y las quebradas Honda, Sinsao, de la Máquina, Loma Larga, Las Chontas, entre otras.

6.1.3. Pluviosidad

La zona de estudio presenta un clima tropical húmedo influenciado por su proximidad a la cordillera de los Andes y el Océano Pacífico. La pluviosidad anual promedio en la región es variable y suele oscilar entre 1,200 mm y 1,800 mm, dependiendo de la influencia de fenómenos climáticos como El Niño o La Niña.

1. **Estación lluviosa:** Se extiende generalmente de enero a mayo, con las precipitaciones más intensas en los meses de marzo y abril. Durante esta época, las lluvias son frecuentes y pueden ser torrenciales.
2. **Estación seca:** De junio a diciembre, las precipitaciones disminuyen notablemente, aunque no se descarta la presencia de lluvias ligeras, especialmente en las tardes.
3. **Intensidad de las lluvias:** Las precipitaciones suelen presentarse en forma de aguaceros intensos y de corta duración, con alta capacidad de escorrentía.

6.1.4. Proceso generador de relaves

6.1.4.1. Trituración: Para la fase de trituración la planta cuenta con cuatro trituradoras de mandíbulas; cabe recalcar. En esta fase se trata de reducir el tamaño del material que ingresa al proceso hasta alcanzar un diámetro adecuado para la fase de molienda (Ver Figura 9).



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.2. Molienda: Para esta fase cuenta con molinos tipo chilenos con una capacidad para procesar 136 Ton/día entre todos los molinos, impulsados por un motor cuya capacidad es de 15HP, este proceso se lo realiza en medio húmedo en donde los molinos reducen el tamaño hasta un diámetro de malla 80, este proceso es denominado como la última etapa de reducción de tamaño (Ver Figura 10).

Figura 10. Área de molinos



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.3. Gravimetría: En este proceso el material que sale del molino con un diámetro de malla 80 es concentrado en 2 canales de hormigón, el material de mayor densidad es retenido en las bayetas, obteniéndose el concentrado gravimétrico. El material más fino pasa directamente hacia las piscinas de decantación donde serán transportadas mediante bombas de solidos hacia los tanques de cianuración (Ver Figura 11).

Figura 11. Canales para el proceso gravimétrico



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.4. Remolienda: Para el proceso de remolienda la planta cuenta con una chancha de capacidad de 2 quintales, esto varía dependiendo de la dureza del material. Una vez obtenido el concentrado esta pasa por la chancha, el mismo que durante el tiempo de una hora aproximadamente se remuele el material para obtener un material más fino (Ver Figura 12).

Figura 12. Área de remolienda



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.5. Cianuración: Para este proceso se cuenta con 8 tanques para las arenas provenientes de los molinos chilenos, Las colas recogidas son trasladadas mediante el sistema de bombeo hacia los tanques, agregándole agua para formar la pulpa y la cantidad apropiada de cianuro de sodio. Además, se agrega cal P-24 para regular el pH idóneo para el procesamiento.

En el proceso de recuperación con carbón activado se dispone de agitadores los cuales se les añade carbón activado en cantidades que estén acordes al concentrado de mineral y se vuelve agitar en un tiempo determinado, luego se pasa el material por una criba en donde se separa el carbón de las arenas (Ver Figura 13).

Figura 13. Área de agitación



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.6. Fundición: La Planta de Beneficio de Minerales cuenta con 1 horno para realizar este proceso el cual se da al aire libre. Posteriormente se lo coloca el metal en un crisol de grafito con bórax para su fundición a alta temperatura obteniendo así la barra DORE, posteriormente se granalla la barra en una soborna, agregando ácido nítrico para obtener un precipitado de color café que es el oro y una solución de color verde azulado que es de nitrato de plata (Ver Figura 14Figura 14).

Figura 14. Horno de fundición



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.7. Refinación

Al precipitado de oro se lo lava con agua, luego es secado y se lo funde en el crisol para la obtención de la barra de oro con una ley de aproximadamente 99,99. A la solución de nitrato de plata se le añade sal de mesa, para precipitarla como cloruro de plata y luego con lana de acero se obtiene el cemento de plata (Ver Figura 15).

Figura 15. Área de refinación



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.4.8. Elusión: Es el proceso de recuperar el oro atrapado por el carbón activado, desorbiendo el oro con la solución stripp, cianuro + soda cáustica + alcohol, en caliente, la misma que es inyectada por una bomba a la base del reactor que contiene el carbón activado cargado de oro, la solución pasa a presión por toda la columna de carbón y va llevando oro disuelto hasta la celda electrolítica colocada en circuito cerrado entre el caldero, bomba, reactor y celda.

El proceso de elusión demora en relación a la recuperación del oro atrapado por el carbón activado, llegando a 48 horas, e incluso 72 horas. Para conocer cuando se termina la elusión se realizan los análisis de oro en el laboratorio, oro contenido en la solución.

Figura 16. Área de elusión



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.1.5. Balance metalúrgico

A continuación, se presente el balance metalúrgico promedio.

- **Ley de Cabeza.** - No se aplica debido a que el titular de la Planta presta los servicios de alquiler de sus instalaciones.
- **Ley de Concentrado.** -No se aplica
- **Ley de Colas.** -No se Aplica
- **Tonelaje de Tratamiento.** - 7433,5 Toneladas/semestre
- **Tonelaje de Concentrado.** -No se aplica
- **Tonelaje de Colas.** - No se aplica
- **Tipo del Producto Final.** - La Planta está implementada para beneficiar y extraer ORO y PLATA.
- **Peso del Producto Final.** - El titular de la Planta no conoce por cuanto presta servicios de alquiler.

- **Recuperación del Mineral.** - 92%

6.1.6. *Tratamiento de relaves actual*

Los relaves se disponen en 4 relavera que se encuentra en las siguientes coordenadas.

Ubicación: DATUM WGS84: X: 650876; Y: 9586288

Características: las relaveras cuentan con geomembrana las mismas previo la colocación se compacto el suelo con maquinaria pesada, además se estabilizo los taludes para evitar posibles desprendimientos de suelo.

Manejo: los relaves una vez depositados en la geomembrana son acumulados en un espacio físico para el secado para posteriormente trasladar hasta la relavera comunitaria El Tablón.

Para el manejo de tratamiento de agua físico, la planta de beneficio cuenta con 19 piscinas de sedimentación, las mismas que son construidas de hormigón armado.

Figura 17. Piscinas de sedimentación



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

En la tabla 8, se describen las relaveras

Tabla 8. Dimensiones de las piscinas de relaves

Descripción	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Volumen (m³)
Relavera 1	18	24	6	2592
Relavera 2	26	19	6	2964
Relavera 3	42	23	9	8694
Relavera 4	42	25	11	11550
Piscina De Relaves 1	8	11	9	792
Piscina De Relaves 2	8	11	9	792
Piscina De Relaves 3	8	11	9	792
Piscina De Relaves 4	3.5	11	9	346.5
Piscina De Relaves 5	3.5	11	9	346.5

Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

En la Figura 18 se indican las relaveras

Figura 18. Relaveras



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.2. Propiedades físico-químicas y mineralógicas de los relaves

El relave proviene de la molienda de rocas volcánicas con presencia de minerales polimetálicos en su mayoría, que pasan por el proceso de molienda y posterior lixiviación, con un alto contenido de metales pesados como son: plomo, zinc, hierro, cadmio, arsénico, entre otros; esto provoca que el relave sea un posible generador de aguas ácidas y por ende se convierte en un riesgo de contaminación de suelos del sector y zonas circundantes, en base a este análisis se realizó la caracterización del relave, para determinar sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas que se describen a continuación:

6.2.1. Caracterización física

Para la caracterización física de los relaves generados en la planta de beneficio Portovelo 1, se consideran los resultados de densidad, granulometría, contenido de humedad y concentración gravimétrica los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades físicas del relave

Densidad	1280 g/L
Granulometría	Malla% 200
Contenido de humedad	30%
	Dilución
% de sólidos	23
% de líquidos	77

Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

Al analizar los resultados de laboratorio se puede determinar que los relaves presentan una baja densidad, lo que quiere decir que existe gran presencia de agua, adicionalmente se puede corroborar con el porcentaje de líquidos el cual es del 77%,

recalcando la necesidad de recibir un tratamiento de espesamiento con el fin de poder disponerlos de mejor manera.

6.2.2. Caracterización química

La caracterización química comprendió los resultados de pH, conductividad eléctrica los cuales se muestran a continuación:

Tabla 10. Propiedades químicas del relave

pH	8.79
Conductividad eléctrica	2530 s/m
Temperatura	24°

Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

Dentro del pH se encuentra un relave ligeramente alcalino encontrándose en el rango de lo normal, debido al uso de cal para el proceso de cianuración. En lo que respecta a conductividad eléctrica se indica la presencia de sales y metales siendo necesario determinar cuáles son para el respectivo tratamiento. Finalmente, la temperatura se encuentra en un rango normal, sin embargo, se destaca la importancia de realizar un tratamiento al agua que salga del relave.

6.2.3. Caracterización mineralógica

Se realizó un análisis de la concentración mineralógica del relave en la cual se encontraron las mayores concentraciones de plata, hierro, zinc, oro y plomo, en la siguiente tabla se describen los resultados obtenidos en el laboratorio:

Tabla 11. Minerales en el relave por el método de ensayo al fuego y absorción atómica

Mineral	Unidad	Resultado
Au	g/t	0.29
Ag	g/t	30.91
Cu	%	0.08
Pb	%	0.53
Zn	%	0.98
As	%	0.08
Sb	%	0.01
Fe	%	11.90
Hg	%	0.00
Bi	%	0.00
Cd	%	0.01

Nota: Elaborado por El Autor, (2025), tomado de los análisis de laboratorio realizados en el laboratorio Albexxus, (2024).

Es importante prestar atención a la presencia de hierro (Fe) y Plata, los cuales pueden generar acidez en el agua y en el suelo en caso de que entre en contacto directo con estos componentes.

6.2.4. Fluorescencia de Rayos X

El análisis de fluorescencia de Rayos X, permitió evaluar la composición de los relaves y su posible impacto en el tratamiento de los mismos ellos por ello que mediante el método: Geochem (3-Beam), se determinó la presencia de silicatos, aluminosiliatos, carbonatos y óxido (Ver Tabla 12). Como se mencionó anteriormente, es necesario prestar atención ante la posible generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM), además de encontrar la presencia de elementos tóxicos como el selenio (Se), uranio (U) y bario (Ba).

Tabla 12. Elementos principales y trazas

Elemento	PPM	+/- 3 σ
Mg	1.05%	0.33
Al	3.91%	0.13
Si	13.69%	0.21
P	86	72
S	3.008%	0.053
K	8970	190
Ca	1.697%	0.030
Ti	3480	380
V	99	87
Mn	1.116%	0.029
Se	25	8
Rb	81	7
Sr	61	6
Y	25	9
Zr	101	8
Nb	22	6
Sn	132	40
Ba	378	62
La	670	110
Ce	900	130
Pr	820	170
Nd	1130	250
U	18	9
Elemento	PPM	+/- 3 σ
Cr	ND	<94
Co	ND	<250
Ni	ND	<16
W	ND	<62

Nota: Elaborado por El Autor, (2025), tomado de los análisis de laboratorio realizados en el laboratorio Albexus, (2024).

La caracterización de los relaves recalca la necesidad de dar un tratamiento a los relaves, puesto que se ha determinado gran contenido de agua que puede provocar el desbordamiento y colapso de las relaveras además de la contaminación a cuerpos de agua y suelo cercanos. Adicionalmente se tiene la presencia de metales y elementos tóxicos que podrían generar ácidos.

6.3. Propuesta de tratamiento de relaves para la planta de Beneficio Portovelo 1

A continuación, se analizarán dos propuestas: filtro prensa y floculantes.

6.3.1. Filtro prensa

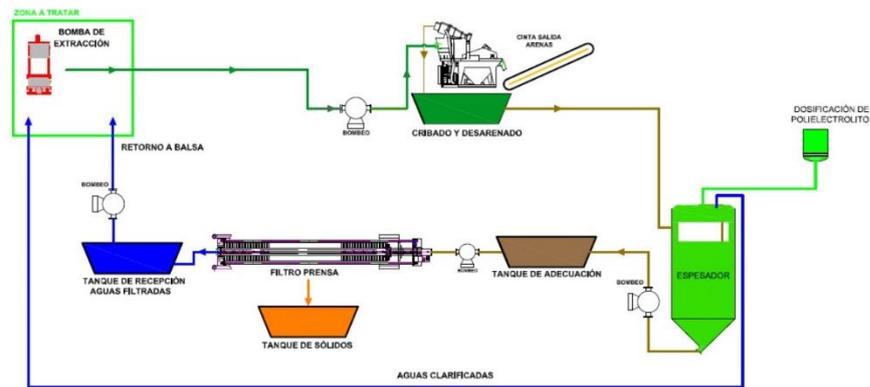
El filtro prensa, es un equipo utilizado en la industria para la deshidratación de sólidos, con el objetivo de separar la mayor cantidad de sólidos y líquidos por medio de la filtración a presión. En una planta de beneficio de minerales, el filtro prensa resulta óptimo para la deshidratación de lodos, obteniendo altos valores de sequedad.

El proceso de deshidratación comienza con la extracción de lodos sedimentados en el fondo. Para ello se utiliza bombeos de extracción en función de los condicionantes técnicos del trabajo.

Ante un lodo con elevado contenido en arena, éste deberá ser desarenado antes de su introducción al filtro prensa. Las fases de desarenado y espesado de los lodos dependen en gran medida de la cantidad de arena acumulada, así como del comportamiento del fango ante procesos de coagulación y floculación. Si la concentración de extracción es pequeña y el fango espeso bien, la mezcla se hará pasar por un espesador. Por el contrario, si el lodo no tiene elevado contenido en arena y la concentración de extracción es adecuada, las fases de desarenado y espesado pueden NO ser necesarias y se pueden omitir.

Posteriormente el lodo extraído se somete al proceso específico de filtración para conseguir la separación sólido-líquido necesaria. El proceso de secado de los fangos finaliza con el transporte y la gestión adecuada de la fracción sólida resultante y el envío de agua clarificada tras el proceso nuevamente a la balsa o, en función de la calidad necesaria, a la cabecera del proceso para su reutilización.

Figura 19. Sistema de filtro prensa



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.3.1.1. Características recomendadas para el filtro prensa: Las características recomendadas para el filtro prensa son las siguientes:

- 1. Capacidad:** Un filtro prensa con capacidad de procesamiento de 240 m³/tanda
- 2. Placas y tamaño:** Dependiendo del diseño, se necesitará un filtro con suficiente área de filtración, típicamente entre 50 y 150 placas para este volumen.
- 3. Porcentaje de sólidos en la torta:** El filtro debe ser capaz de generar tortas con un contenido de sólidos del **30% al 50%**
- 4. Recuperación de agua:** Debería garantizar una recuperación del 80% al 90% del agua.

6.3.1.2. Modelos comerciales que se podrían implementar dentro de la planta de beneficio:

- 1. Metso Outotec VPX:**
 - Diseñado para altas capacidades y recuperación de agua.
 - Alta automatización.
- 2. ANDRITZ sidebar filter press:**
 - Ideal para minería y manejo de relaves.
 - Flexible en tamaño y configuración.

Para la planta Portovelo 1 se recomienda un filtro prensa automático con capacidad de 240 m³/tanda sería óptimo. La elección específica del modelo dependerá de factores como presupuesto, espacio disponible y requisitos de operación.

6.3.1.3. Análisis técnico: En base a un análisis técnico y en vista que en la planta de beneficio Portovelo 1, se procesan 200 Tn/día actualmente, asumiendo que el 90% del mineral procesado es relave sólido. Deduciendo que el mineral procesado tiene una recuperación del 90% del mineral valioso, y el restante (10%) corresponde a relaves sólidos. Entonces, la generación diaria de relaves sólidos sería: 200 tn /día x 90% dando un total de 180 Tn/día. A continuación, se detallan los cálculos necesarios:

Volumen de lodos generados (considerando agua en el relave):

Si el relave tiene un 25% de sólidos, el resto sería agua (75%)

$$\text{Volumen total} = \frac{\text{peso de solidos}}{\%Sl} = \frac{180 \text{ Kg}}{0.25} = 720 \text{ Kg} = 720 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Capacidad del filtro prensa: Para manejar 720 m³/día considerando un 80% de recuperación de agua, el filtro prensa debe ser capaz de procesar los sólidos restantes y extraer el agua de forma eficiente.

Operación por tandas: Suponiendo 3 turnos de operación (8 horas cada uno), cada tanda debe procesar:

$$\frac{720 \text{ m}^3}{3} = 240 \text{ m}^3/\text{tanda}$$

6.3.2. Floculación

La floculación es un proceso empleado en el tratamiento de aguas residuales que consiste en añadir compuestos químicos específicos al agua para facilitar la sedimentación de partículas coloidales que, por sí solas, no sedimentarían debido a su pequeño tamaño y a sus cargas eléctricas. Este proceso se realiza tras la coagulación, donde las partículas suspendidas pierden su estabilidad al neutralizarse sus cargas eléctricas.

En la floculación, se introducen floculantes, que son sustancias que promueven la formación de estructuras más grandes y densas llamadas flóculos, a través de la unión de las partículas. Para que este proceso sea efectivo, es necesario mantener una agitación controlada que permita que las partículas interactúen sin desintegrar los flóculos formados.

El resultado de la floculación es la formación de flóculos que sedimentan más rápidamente, mejorando la claridad del agua y facilitando su tratamiento posterior en

clarificadores o sedimentadores. Este método es clave en la eliminación de turbidez y sólidos suspendidos, siendo ampliamente utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.

Para tratamiento de relaves se realizó varios análisis con la finalidad de recuperar la mayor cantidad de agua, y con ello la liberación de metales pesados. Se utilizó cuatro tipos de floculantes, los cuales se describen a continuación:

- **HARFLOC – 1110:** Este floculante es un copolímero de acrilamida combinado con un monómero catiónico cuaternizado, ideal para procesos que requieren cargas positivas en el tratamiento de aguas.
- **HARFLOC – 1140:** Copolímero de acrilamida con un monómero no iónico cuaternizado, pero con una formulación ligeramente diferente que puede ajustarse a distintos requerimientos de floculación.
- **HARFLOC – 1145:** Copolímero de acrilamida y un monómero no iónico cuaternizado, favoreciendo procesos de floculación en situaciones donde no se necesita una carga eléctrica específica.
- **HARFLOC – 1165:** Es un copolímero compuesto por acrilamida y ácido acrílico, utilizado para procesos donde se requiere una acción de floculación efectiva

Los resultados obtenidos con la prueba de jarras se los describe a continuación:

6.3.2.1. Floculante-1110: Es un Super Floculante catiónico de orden de cationidad muy alto, que está dando resultados satisfactorios en la industria minera, petrolera en perforación control de sólidos (Dewatering), agua de formación, plantas potabilizadoras, lodos activados provenientes de aguas grises y negras, textiles, pinturas, industria azucarera; es un producto químico sintético que se puede adaptar a una amplia gama de aplicaciones como, por ejemplo: deshidratación y compactación de lodos (Dewatering), floculaciones, clarificaciones, etc (EcoFluid System, 2024).

Tabla 13. Especificaciones Floculante HARFLOC – 1110

Especificaciones:	Índice:
Apariencia:	Polvo Granular blanquecino
Nombre Comercial:	HARFLOC-1110
Nombre Químico:	Poliacrilamida / Polielectrolito
Carga Iónica:	Catiónica
Tamaño de Partícula:	20-100 malla
Peso Molecular:	Alto (5-15 millón)
Grado de carga:	Mediano (17 – 20) %

Contenido Sólido:	89% Mínimo
Densidad aparente:	Aprox. 0.80
Gravedad Específica a 25°C:	1.01 – 1.1
Viscosidad aproximada de Brookfield a 25°C	100 – 1000 cps
Grado de la Hidrólisis:	10 – 50%
Contenido Activo	100 %
Concentración de trabajo recomendada:	0.1 - 0.5 %
Rango de pH:	4 - 9
Temperatura de almacenamiento(°C):	0 - 35
Vida Útil aproximada:	2 - 3 años

El uso de floculantes catiónicos no mostró eficacia en el tratamiento del relave debido a su interacción con la composición mineralógica del mismo, que incluye oro, plata, hierro, cobre y trazas de arsénico. Estos elementos, especialmente los metales pesados y en menor proporción el arsénico, generan condiciones químicas que dificultan la aglomeración de partículas y, por ende, el proceso de sedimentación, limitando significativamente su rendimiento en la clarificación del agua y la consolidación del relave.

6.3.2.2. Floculante 1140: Se trata de un floculante no iónico altamente eficiente que ha demostrado excelentes resultados en diversas industrias, incluyendo minería, petróleo (en unidades de deshidratación), tratamiento de aguas residuales (PTAR), plantas potabilizadoras, textiles, azucareras y extractoras de aceite. Este floculante es fácilmente soluble en agua, estable frente a variaciones de pH y adaptable para múltiples aplicaciones, como deshidratación, floculación y clarificación, lo que lo convierte en una solución versátil y eficaz en el manejo de residuos y tratamiento de agua (EcoFluid System, 2024)

En la siguiente tabla se describen las especificaciones técnicas del floculante HARFLOC – 1140.

Tabla 14. Especificaciones técnicas floculante HARFLOC – 1140

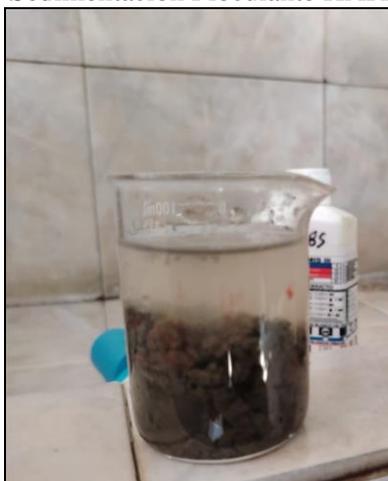
Especificaciones:	Índice:
Apariencia:	Polvo Granular blanquecino
Nombre Comercial:	HARFLOC-1140
Nombre Químico:	Poliacrilamida / Polielectrolito
Carga Iónica:	No iónica
Tamaño de Partícula:	20-100 malla
Peso Molecular:	Alto (6-18 millón)
Grado de carga:	Mediano (1 – 3) %
Contenido Sólido:	89% Mínimo - 91% Máximo
Densidad aparente:	Aprox. 0.8

Gravedad Específica a 25°C:	1.01 – 1.1
Viscosidad aproximada de Brokfield a 25°C	100 – 1000 cps
Grado de la Hidrólisis:	10 – 40%
Contenido Activo	100 %
Concentración de trabajo recomendada:	0.1 - 0.5 %
Rango de pH:	4 - 9
Temperatura de almacenamiento(°C):	0 - 35
Vida Útil aproximada:	2 años

Nota: Ecofluid System (2024)

En busca de un mejor resultado se realizó una dosificación de 2ml de floculante en 80 ml en el vaso de precipitación, dando como resultado que el agua aun esta turbia y la sedimentación aun no este consolidada como se esperaba.

Figura 20. Sedimentación Floculante HARFLOC 1140



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.3.2.1. Floculante-1145: Este floculante no iónico tiene un desempeño excelente en diversas industrias, como la minera, petrolera (en unidades de deshidratación), plantas potabilizadoras, tratamiento de aguas residuales (PTAR), extractoras de aceite e industrias azucareras. Su principal ventaja es la capacidad de inducir una rápida separación de fases en los lodos tratados, logrando una sedimentación eficiente con un sólido altamente compacto y una fase líquida clara, que corresponde al agua recuperada. En la Tabla 15 se presentan las especificaciones técnicas de este floculante, destacando su versatilidad y eficacia en procesos de deshidratación y clarificación.

Tabla 15. Especificaciones técnicas floculante HARFLOC – 1145

Especificaciones:	Índice:
Apariencia:	Polvo Granular blanquecino
Nombre Comercial:	HARFLOC-1145
Nombre Químico:	Poliacrilamida / Polielectrolito
Carga Iónica:	No iónica
Tamaño de Partícula:	20-100 malla
Peso Molecular:	Alto (6-16 millón)
Grado de carga:	Mediano (4 – 8) %
Contenido Solido:	89% Mínimo - 91% Máximo
Densidad aparente:	Aprox. 0.75
Gravedad Especifica a 25°C:	1.01 – 1.1
Viscosidad aproximada de Brokfield a 25°C	100 – 1000 cps
Grado de la Hidrólisis:	10 – 30%
Contenido Activo	100 %
Concentración de trabajo recomendada:	0.1 - 0.4 %
Rango de pH:	4 – 9.5
Temperatura de almacenamiento(°C):	0 - 35
Vida Útil aproximada:	2 -3 años

Nota: EcoFluid System (2024)

Es importante tomar en consideración la dosificación de cada floculante que en este caso fue en un recipiente de 80 ml se colocó 2 ml, dando como resultado una sedimentación normal y un agua turbia.

Figura 21. Proceso de sedimentación Floculante HARFLOC 1145



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

En este caso con el floculante HARFLOC 1145, es importante tomar en consideración algunos parámetros descritos en la tabla 16, con la finalidad de tener un correcto funcionamiento de los floculantes, y de esta forma tener resultados óptimos y esperados que son una sedimentación consolidada y un agua limpia para los procesos.

Tabla 16. Condiciones necesarias para el correcto uso del floculante y optimizar su desempeño.

Parámetro	Valor Recomendado
Velocidad de Agitación	55 a 70 rpm
Concentración de Disolución	0,1% a 0,2%
RPM para Pruebas de Jarras	Agitación rápida: 100-120 rpm (1 minuto). Agitación lenta: 30-60 rpm para observar flóculo, sedimentación y turbidez.
Tiempo de Disolución	Mínimo 1 hora de agitación (preferible más tiempo para mejorar la maduración).
Dosis	Basada en los resultados de pruebas de jarras.
Paquete	Bolsa de polietileno PE o papel Kraft, ambas de 25 kg netos.
Almacenamiento	En embalaje original. Lugar fresco y seco. Lejos de calor, llamas, humedad y luz solar directa.

Nota: Elaborado por El Autor, (2025), adaptado de EcoFluid System (2024)

6.3.2.2. Floculante 1165: Es un Super Floculante aniónico, es altamente efectivo en el tratamiento de aguas residuales en el proceso de cianuración. Su capacidad para aglomerar partículas cargadas positivamente mejora la sedimentación de los relaves, optimizando la recuperación de agua y reduciendo el impacto ambiental de la operación minera.

Tabla 17. Especificaciones técnicas floculante HARFLOC-1165

Especificaciones:	Índice:
Apariencia:	Polvo Granular blanquecino
Nombre Comercial:	HARFLOC-1165
Nombre Químico:	Copolímero de Acrilamida y ácido acrílico
Carga Iónica:	Aniónicas
Tamaño de Partícula:	20-100 malla
Peso Molecular:	Muy Alto (17 - 19 millón)
Grado de carga:	Mediano (30 - 40) %
Contenido Solido:	89% Mínimo – 93% Máximo
Densidad aparente:	Aprox. 0.80
Gravedad Especifica a 25°C:	1.01 – 1.1
Viscosidad aproximada de Brokfield a 25°C	100 – 1000 cps
Grado de la Hidrólisis:	10 – 30%
Contenido Activo	100 %
Concentración de trabajo recomendada:	0.1 - 0.5 %
Rango de pH:	6,0 – 9,0
Temperatura de almacenamiento(°C):	0 - 35
Vida Útil aproximada:	2 años

Nota: Ecofluid System (2024)

Dado que muchos de los elementos metálicos en las muestras (especialmente los metales pesados como plomo, zinc, calcio y bario) tienen una carga positiva, este floculante aniónico se deduce que podría ser el más adecuados para la floculación, ya que atraen estas partículas cargadas positivamente y ayudan a su aglomeración y posterior sedimentación.

La presencia de oro, plata y uranio puede complicar el proceso de floculación debido a la tendencia de estos metales a formar complejos con otros elementos. Es posible que se requieran floculantes más específicos para tratar minerales que contienen estos metales. Sin embargo, los floculantes aniónicos pueden seguir siendo útiles para remover partículas finas de metales pesados que no están en estado puro.

En base al análisis y prueba de jarras realizado con cada uno de los floculantes ese debe considerar que no existe un súper floculante que pueda lograr el resultado esperado por sí solo se necesita realizar varias pruebas o análisis con la finalidad de obtener el resultado requerido.

Tabla 18. Parámetros para un correcto funcionamiento del super floculante

Parámetro	Valor Recomendado
Velocidad de Agitación	55 a 70 rpm
Concentración de Disolución	0,1% a 0,2%
RPM para Pruebas de Jarras	Agitación rápida: 100-120 rpm (1 minuto). Agitación lenta: 20-40 rpm para observar floculo, sedimentación y turbidez.
Tiempo de Disolución	Mínimo 1 hora de agitación (preferible más tiempo para mejorar la maduración).
Dosis	Basada en los resultados de pruebas de jarras.
Paquete	Bolsa de polietileno PE o papel Kraft de 25 kg netos, big bag de 750 kg.
Almacenamiento	En embalaje original. Lugar fresco y seco. Lejos de calor, llamas, humedad y luz solar directa. Para soluciones, usar recipientes de plástico, esmalte, fibra de vidrio o vidrio.

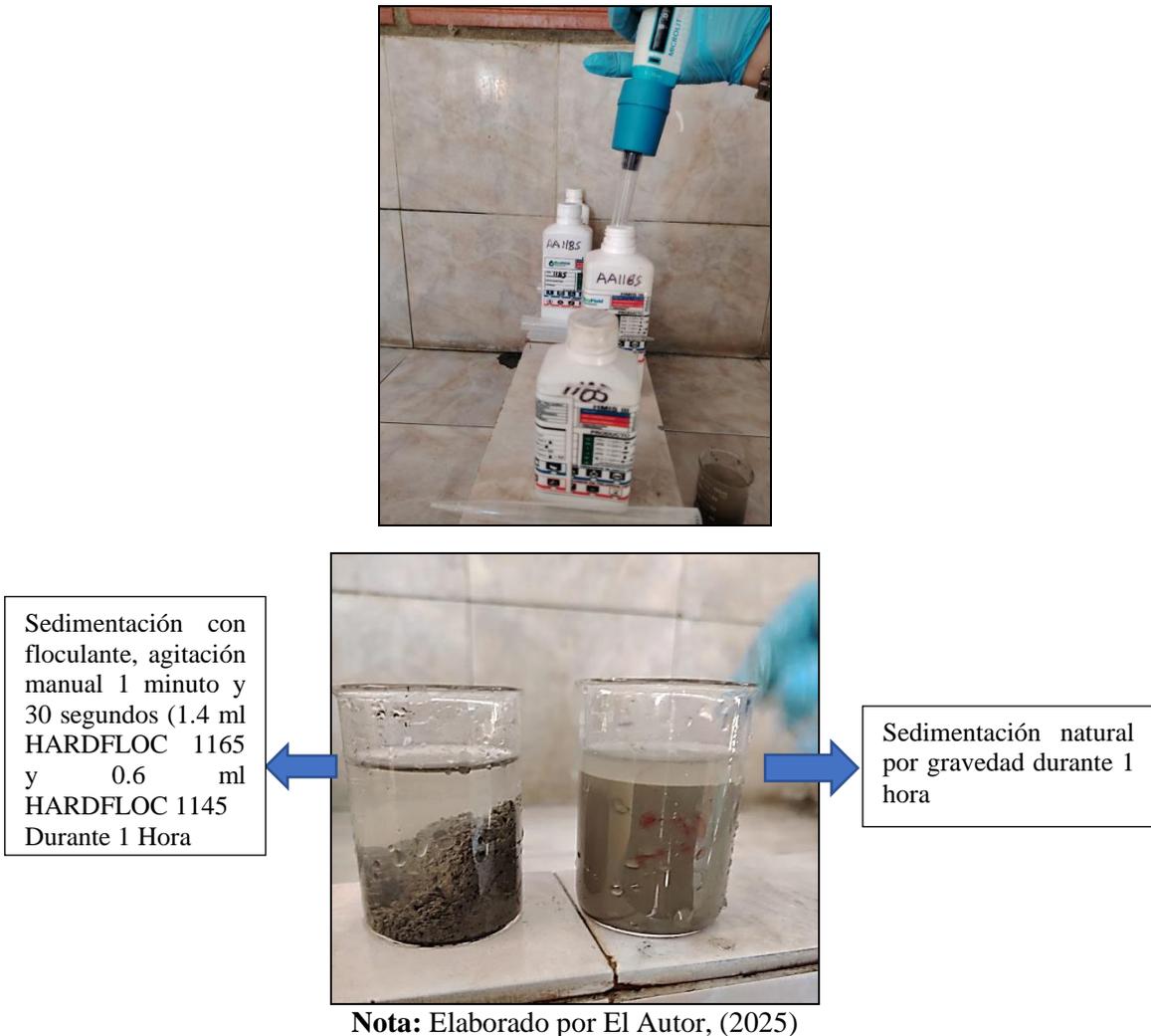
Nota: Elaborado por El Autor, (2025), adaptado de EcoFluid System (2024)

6.3.2.3. Superfloculante HARFLOC 1145-1165: La prueba de jarras determinó que los floculantes HARFLOC 1110 y 1140 no dieron resultados positivos con el relave, sin embargo, con los floculantes HARFLOC 1145 y 1165 se obtuvo una mayor sedimentación y menor turbidez, que era el resultado que se esperaba, por lo que se optó por combinar ambos floculantes en una dosificación de 1.4 ml del floculante HARDFLOC 1165 y 0.6 ml del floculante HARDFLOC 1145.

Con base en la composición química lo más adecuado es utilizar estos floculantes aniónicos, ya que estos son efectivos para tratar partículas con carga positiva como las encontradas en los metales pesados y algunos minerales presentes en el relave. Además, los floculantes aniónicos ayudaron a mejorar la clarificación y sedimentación de las partículas.

El resultado, el cual fue que se logró una agua cristalina y libre de sedimentos (Ver Figura 22).

Figura 22. Superfloculante 1145 - 1165



6.3.2.4. Análisis técnico: Los floculantes básicamente son diseñados para optimizar la velocidad de sedimentación y mejorar la clarificación y turbidez del sobrenadante (overflow) y adecuar el porcentaje de sólidos del concentrado o relave a las etapas subsiguientes, como las etapas de filtrado o tanques de relave. Esta nueva tecnología permite extraer más humedad que con el filtro prensa, con la finalidad de demostrar que es posible recuperar mayor cantidad de agua se presenta el siguiente estudio realizado por la empresa EcoFluid System para la planta de beneficio Portovelo 1.

En la Tabla 19 podemos observar la recuperación de agua del concentrado sin tratamiento previo de 109.24 a 167.59 Lt, con una cantidad de relave de 774.18 a

1116.28 m³/día. Después de realizar el tratamiento se puede determinar una recuperación de agua de 560.38 a 841.66 m³/día (Ver Tabla 20) incluyendo el agua del concentrado, demostrando su eficiencia en el objetivo que se pretende cumplir.

Tabla 19. Balance de masa y volumen

Balance de masa y volumen para llevar un buen control de los relaves												
Material Mineralizado Día (+2.5)	Agua Requerida para procesar	Total Volumen Ingresado	Volumen Concentrado (3.5%) (d=2.99tn)	Material Estéril Arena Dens = 1667 Kg/m ³	Vol. Relave	Agua Recuperada del Concentrado	Relave Fino (Lama)	# de Planas Benef.	Total Relave Fino No Tratado			
Tn/día	m ³ /día	m ³ /día	m ³ /día	Tn/día	m ³ /día	m ³ /día	m ³ /día	m ³ /día	m ³ /día	m ³ /día	-	m ³ /día
200	80.00	800	880.00	7.20	2.48	133.33	192.80	744.18	109.24	634.94	1	634.94
300	120.00	1200	1320.00	10.80	3.72	200.00	289.20	1116.28	167.59	948.69	1	948.69

Nota: Ecofluid System (2024)

Tabla 20. Tratamiento de relaves finos o lamas después que sale de la relavera

Tratamiento de los relaves finos o lamas después de que sale de la relavera							
Material Mineralizado Día Tn/día	Volumen de Relave después de la Relavera (d=1,15)			Solidos dispuestos en la Relavera		Agua Recuperada	Agua Recuperada incluyendo el agua del concentrado
	m ³ /día	Tn/día	m ³ /día	Tn/día	m ³ /día	m ³ /día	
200	634.94	774.63	183.80	323.49	451.14	560.38	
300	948.69	1157.40	274.62	483.33	674.07	841.66	

Nota: Ecofluid System (2024)

Tabla 21. Resumen del balance de masa y agua reutilizada o recuperada

Resumen del balance de masa y volumen agua reutilizada o recuperada							
Mineral a Procesar (Tn)	Agua requerida (m ³)		Agua recuperada			Agua a completar de captación o de mina	
	(m ³ /día)	(l/s)	(m ³ /día)	(l/s)	%	(m ³ /día)	(l/s)
200	800	9.3	560	6.5	70	240	2.8
300	1200	13.9	842	9.7	70.1	358	4.1

Nota: Ecofluid System (2024)

Para implementar la técnica de floculación, es necesario dimensionar los tanques de agitación, los cuales se utilizan para mezclar fases homogéneas y heterogéneas, como el lodo y el floculante. La dosificación óptima del floculante se determinó mediante el

ensayo de jarras, ajustando los parámetros según las características del relave y el producto químico. A continuación, se presenta un cálculo ejemplo de la cantidad de floculante requerida y el tamaño del tanque necesario para procesar el volumen de lodos generado.

Tabla 22. Cálculo de volumen tanque dosificador

Caudal (Q)	Volumen a tratar (v)
14 l/s	1200 m ³ /día
Solución (sf)	Caudal de polímero (l/s)
2	0.35 l/s

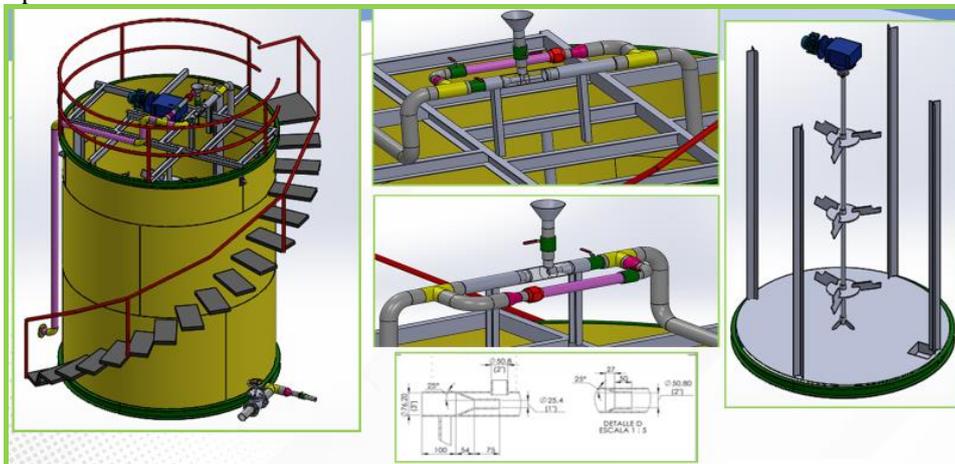
El tanque que se necesitaría para dosificar los floculantes, será de aproximadamente 21 m³.

Tabla 23. Dimensiones del tanque dosificador

Dosificador para deshidratar relave	
Dimensionamiento del tanque dosificador (1200m ³)	
Perímetro	9 m
Altura	3 m
Diámetro	2,86 m
Volumen T.	19,34 m ³
Volumen del cono cilíndrico	
Altura	1 m
Volumen	2,15 m ³
Angulo	34,92 grados
Volumen T.	21,49 m ³

Nota: Ecofluid System (2024)

Figura 23. Tanques de agitación (planos dosificadores polímero con su respectivo embudo Vortex tipo Venturi



Nota: Ecofluid Sysem (2024)

6.3.2.5. Cálculo de volumen del tanque de polímero y tanque dosificador

Para conocer el volumen requerido en el tanque con el consumo aproximado de polímetro y el costo por día, se realizó un cálculo que se describe en la Tabla 24, obteniendo los resultados que se pueden apreciar a continuación:

Tabla 24. Cálculo de volumen

CÁLCULO VOLUMEN TANQUE DE POLÍMERO Y CONSUMO QUÍMICO (PRUEBA JARRAS RELAVEO)																			
ml de Muestra:		80		ml de Solución:		2		% Concentración Química:		0,10%		g/l o Kg/m3:		1		Usd/Kg		\$5,20	
Caudal a Tratar		Volumen a Tratar y Cálculo Volumen del Tanque para dosificar la Química (24h)							Volumen (12h)		Volumen (8h)		Volumen (4h)						
(l/s)	(m3/h)	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)	Q polím. (l/s)	Kg/día	Sx/día	Usd/Día	Usd/m3	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)					
9,3	33,48	803,52	20,09	0,233	20,09	0,80	\$104,46	\$0,13	401,76	10,04	267,84	6,70	133,92	3,35					
13,9	50,04	1200,96	30,02	0,348	30,02	1,20	\$156,12	\$0,13	600,48	15,01	400,32	10,01	200,16	5,00					
CÁLCULO VOLUMEN TANQUE DOSIFICADOR Y CONSUMO QUÍMICO (PRUEBA REAL RELAVES)																			
ml de Muestra:		80		ml de Solución:		1,5		% Concentración Química:		0,10%		g/l o Kg/m3:		1		Usd/Kg		\$5,20	
Caudal a Tratar		Volumen a Tratar y Cálculo Volumen del Tanque para dosificar la Química (24h)							Volumen (12h)		Volumen (8h)		Volumen (4h)						
(l/s)	(m3/h)	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)	Q polím. (l/s)	Kg/día	Sx/día	Usd/Día	Usd/m3	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)	V. Tratar (m3)	V. Tanque (m3)					
9,3	33,48	803,52	15,07	0,23	15,07	0,60	\$78,34	\$0,10	401,76	7,53	267,84	5,02	133,92	2,51					
13,9	50,04	1200,96	22,52	0,35	22,52	0,90	\$117,09	\$0,10	600,48	11,26	400,32	7,51	200,16	3,75					

Nota: Ecofluid System (2024)

6.3.3. Disposición del relave

Actualmente en la planta de beneficio Portovelo 1, código 390368, cuenta con 5 piscinas de sedimentación y 4 relaveras temporales donde son depositados el material residual luego del proceso de molienda y cianuración para luego ser transportados a la relavera comunitaria el Tablón, ubicada en la vía El Salado - Loja del cantón Portovelo. Los relaves sólidos que quedan después de la sedimentación deben ser dispuestos adecuadamente. La disposición puede seguir una de las siguientes opciones, dependiendo de los requerimientos de la operación y las normativas ambientales:

Los relaves sólidos resultantes del proceso de floculación se suelen almacenar en presas o embalses de relaves, estructuras diseñadas para contener grandes volúmenes de material residual. Estos depósitos pueden ser secos o húmedos, dependiendo de la consistencia del material.

Los relaves húmedos (con una mayor concentración de agua) se almacenan en áreas donde el agua puede ser drenada y reciclada para reducir el volumen de los residuos.

Si el proceso de floculación produce un material con suficiente consistencia, puede ser posible almacenar los relaves en forma de relaves secos, lo que permite una mayor estabilidad y menor riesgo de contaminación.

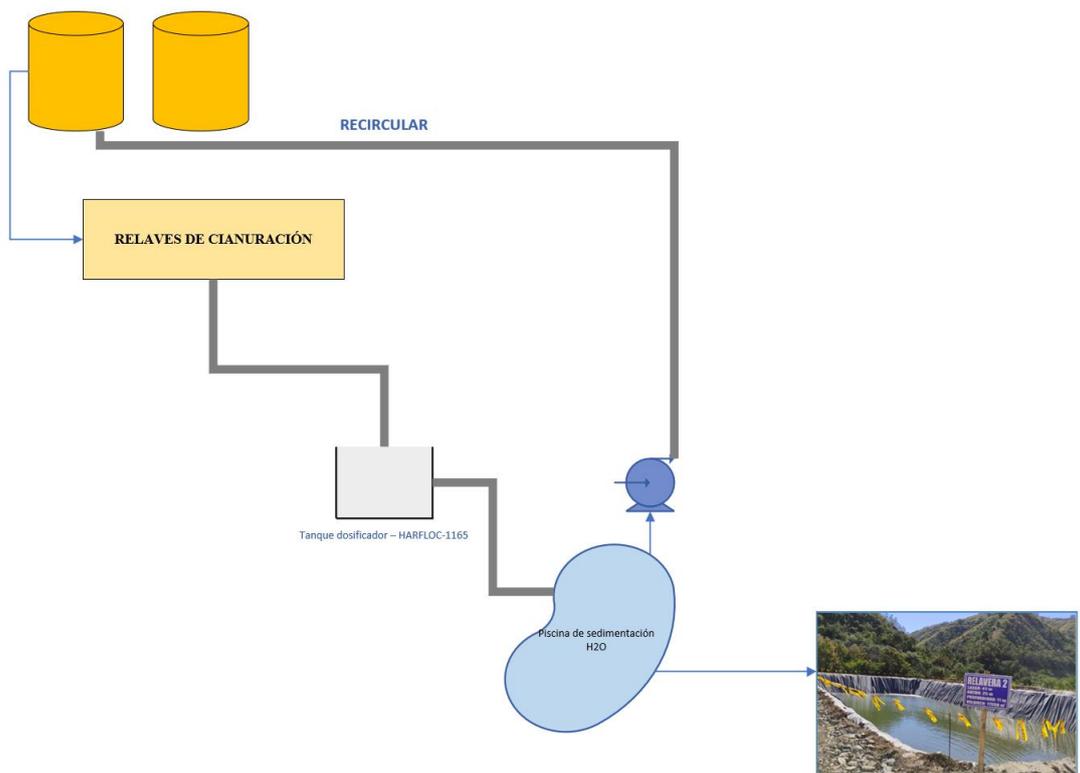
Los relaves secos también pueden ser transportados a otras áreas para su disposición final, como vertederos o cementeras, donde pueden ser utilizados en procesos de construcción.

El agua clarificada (sobrenadante) que se obtiene después de la floculación es generalmente tratada para eliminar cualquier contaminante residual y, dependiendo de la calidad del agua, puede ser reciclada dentro del proceso para minimizar el consumo de agua y reducir los impactos ambientales.

En algunos casos, el agua clarificada se pasa a través de tratamientos adicionales, como filtración o tratamiento químico, para eliminar trazas de contaminantes.

El agua reciclada se puede usar nuevamente en la planta de beneficio o en procesos de minería, reduciendo así el consumo de agua y optimizando el uso de recursos.

Figura 21. Propuesta de tratamiento de relaves con floculantes



Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.3.3.1. Consideraciones Ambientales

- **Control de Contaminantes:**

Aunque los floculantes HARFLOC-1145 y HARFLOC-1165 son eficaces en la sedimentación de partículas, los relaves pueden contener metales pesados y otras sustancias tóxicas (como cianuro en el caso de la cianuración), por lo que es fundamental monitorear y tratar tanto los relaves como el agua clarificada para evitar la contaminación del medio ambiente.

La disposición de los relaves implica un proceso de sedimentación eficiente, donde los flóculos formados se separan del agua, y los relaves sólidos se almacenan en presas o áreas de disposición, dependiendo de su consistencia. El agua clarificada se puede reciclar para su reutilización, y el proceso debe cumplir con las normativas ambientales para asegurar la seguridad y minimizar el impacto ambiental.

A continuación, en la Tabla 25 se realiza una comparación entre ambos métodos:

Tabla 25. Comparación entre alternativas

Criterio	Filtro prensa	Floculación
Generación de residuos	Genera relaves con menor contenido de humedad	Requiere mayor depósito de almacenamiento
Contaminación	Reduce la infiltración de contaminantes	Es media debido a la filtración de químicos con el agua, es por ello que se debe tener en consideración los monitoreos trimestrales.
Recuperación de agua	Es media debido a que se retiene la mayor cantidad de sólidos sin embargo hay que considerar la generación de lamas que pueden infiltrarse en el agua	Media, debido al contenido de químicos que requiere un tratamiento

Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

6.3.4. Análisis económico de los métodos propuestos

Para realizar el análisis económico se comparó las dos metodologías planteadas como son el uso del filtro prensa y la floculación, con el objetivo de analizar cual se acopla mejor a lo que se buscó y el costo estimado de cada uno de ellos para determinar el procedimiento más idóneo (Ver Tabla 26).

Tabla 26. Análisis económico entre los métodos propuestos

Filtro prensa	Cantidad	Precio unitario	Total	Floculantes	Cantidad	Total	Precio unitario
Filtro prensa	1	\$100,000.00	\$100,000.00	Floculantes HARDFLO C 1165 720 m3/día	15.07	\$ 5.50	\$ 82.89
Costos de mantenimiento 1 vez al año	1	\$ 20,000.00	\$20,000.00	Tanque dosificador	1	\$30,000.00	\$30,000.00
Consumo energético kwh/día	800	\$ 0.097	\$77.60				
			\$120,000.10			\$30,082.89	

Nota: Ecofluid System (2024)

En resumen, el método de floculantes es el óptimo y económico en relación con el proceso que es el filtro prensa, en el análisis de alternativas presentado se conjuga los diferentes aspectos técnicos, económico y ambientales que dan como resultado la mejor opción floculantes.

A continuación, se presenta en el análisis:

Tabla 27. Análisis de propuestas

Viabilidad	Componente	Variable	Importancia Relativa total	FILTRO PRENSA			FLOCULANTES		
				Condición	C	C*IR	Condición	C	C*IR
Técnica	Aspectos técnicos			El filtro prensa debe ser capaz de manejar 720 m3/día de relave considerando la recuperación de agua del 80%.	3	1.5	Proceso menos complejo, y altamente efectivo	3	1.5
	Aspectos Económicos	Menor contenido de humedad	0.5	Sobre el analisis de costos el filtro prensa tiene un valor de incluyendo la maquinaria, costos de mantenimiento y energía eléctrica 120 000	1	0.5	El costo es de \$30,082.89 y no requiere de costos de mantemiento, ni energía eléctrica	3	1.5
				PROMEDIO	1		PROMEDIO	1.5	

Viabilidad	Componente	Variable	Importancia Relativa total	FILTRO PRENSA		FLOCULANTES				
				Condición	C	C*IR	Condición	C	C*IR	
Ambiente		Generación de residuos	0.5	Genera relaves con menor contenido de humedad	3	1.5	Requiere mayor depósito de almacenamiento	2	1	
		Contaminación		Reduce la infiltración de contaminantes	3	1.5	Es media debido a la filtración de químicos con el agua.	2	1	
		Calidad de agua		Es media debido a que se retiene la mayor cantidad de sólidos sin embargo hay que considerar la generación de lamas que pueden infiltrarse en el agua	2	1	Media, debido al contenido de químicos que requiere un tratamiento	2	1	
		PROMEDIO			1.33	PROMEDIO		1		
				TOTAL					2.33	2.50

Nota: Elaborado por El Autor, (2025)

7. Discusión

Para el tratamiento de relaves mineros es fundamental seleccionar y gestionar de una forma correcta las tecnologías actuales, con la finalidad de maximizar el aprovechamiento de sus componentes, como son el agua, los sólidos y metales presentes. En el marco de la consolidación y deshidratación del relave como tal y la recuperación de la mayor cantidad de agua sin turbiedad este estudio se centró en abordar estos aspectos claves. Se evaluaron dos técnicas: filtro prensa y floculación, entre estas se pudo evidenciar que la floculación es la más efectiva en términos de remoción de sólidos y turbidez, siendo la más económica, lo que la convierte en una alternativa viable para mejorar la eficiencia en el tratamiento de relaves a menor costo.

La caracterización mineralógica es un factor clave para el tratamiento de relaves, en función a ella se determina la posibilidad de generar contaminación en el agua y suelo. En este contexto, Cevallos (2020) en su estudio caracterización mineralógica del sistema de vetas del área minera Barbasco Unificado, cantón Portovelo, provincia de El Oro, menciona la asociación de minerales como pirita, calcopirita, esfalerita, galena, calcosina, bornita, además de encontrar arcillas tipo caolín, al comparar con los estudios realizados de fluorescencia de rayos X y absorción atómico se encontró elementos en traza de oro, plata, cobre, plomo, zinc, además de sílice y altos porcentajes de hierro, se puede deducir que se trata de menas polimetálicas, donde es importante prevenir que los minerales generen acidez.

López (2021), en su “Estudio Experimental de Procesos de Sedimentación Secundaria de Ultrafinos de Relaves Mineros Chilenos”, menciona la adición de coagulantes la cual favorece la remoción de sólidos en el sobrenadante (lamas) y al agregar el floculante potencia un aumento en la velocidad de sedimentación en comparación con el presente estudio en el que únicamente es floculante no iónico, puede suponer un aumento en la efectividad del tratamiento.

En el estudio realizado por González y colaboradores (2020), titulado "Evaluación de floculantes naturales y sintéticos en el tratamiento de aguas residuales industriales", se investigó el rendimiento de varios floculantes, incluyendo aquellos a base de almidón y polímeros sintéticos, para la remoción de sólidos en aguas industriales. Los resultados indicaron que los floculantes a base de almidón de maíz alcanzaron una eficiencia de remoción de sólidos de hasta el 96.5%, mientras que los

floculantes sintéticos basados en polímeros poliacrilamida lograron una remoción superior, alcanzando hasta un 99.2%. En el presente estudio los floculantes alcanzan una recuperación de agua del 88.25% es decir 560.38 m³, el restante se recupera en la relavera y se evapora.

El uso de floculantes, especialmente los basados en polímeros sintéticos, ha demostrado ser altamente eficiente en la remoción de sólidos suspendidos en los relaves mineros, alcanzando eficiencias de hasta el 98% en la recuperación de sólidos y agua. Según estudios recientes, como el de Salgado (2023), los floculantes poliméricos tienen un alto poder aglutinante, lo que facilita la sedimentación de partículas finas y metales pesados, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua y la reducción de la contaminación. De igual manera, Cuadro et al. (2019) indican que los floculantes a base de polímeros ofrecen una notable eficiencia en la remoción de turbidez, alcanzando valores cercanos al 97.94, %, esto se puede evidenciar con el presente trabajo que la remoción alcanza el 88.25% de recuperación.

Por otro lado, el filtro prensa ha demostrado tener eficiencia significativa en la recuperación de agua sin embargo el sobrenadante (lamas) puede generar contaminación en las agua y no hacerla apta para la recirculación al proceso, es por ello que Cuenca (2023) en su estudio “Tratamiento de los relaves para el Área Minera Joya del Oriente II código 501381, ubicado en la parroquia Los Encuentros, perteneciente al cantón Yanzatza”, provincia Zamora Chinchipe menciona que el filtro prensa recupera hasta el 90% de agua, sin embargo el agua debe recibir un tratamiento previo como el que propone de fitorremediación.

El uso combinado de floculantes y tecnologías de deshidratación como el filtro prensa potencia aún más la efectividad del proceso, alcanzando altos porcentajes de recuperación de agua y reduciendo el volumen de relaves, lo que contribuye significativamente a una gestión más sostenible de los residuos mineros.

Luego de analizar todas las variables, en los ámbitos técnico, económico y ambiental, se determinó que el método mas adecuado para tratar los relaves de la planta de beneficio Portovelo 1, es floculación debido a que no requiere costos de instalación, ni mantenimiento, además logra la eficiencia esperada sin generar mayor impacto ambiental.

8. Conclusiones

- La planta de beneficio Portovelo 1, código 390368, procesa materiales polimetálicos provenientes de diferentes partes del país, brindando un servicio de alquiler de sus instalaciones las cuales están diseñadas para 200 Toneladas/día con proyección a 300 toneladas/día, es por ello que los análisis técnico y económico se los enfocó al crecimiento y mejoramiento de los procesos y el tratamiento de los relaves que es lo principal en este estudio.
- La caracterización de los relaves generados en la planta de beneficio Portovelo 1, mediante el análisis de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas se determinó que los materiales que se procesan son de características polimetálicas con un interesante contenido de metales como plomo, zinc, hierro, entre otros, siendo estos elementos contaminantes para el medio ambiente y requiriendo un proceso distinto al que actualmente poseen en la planta de beneficio para su recuperación, beneficio y tratamiento final de sus relaves mineros.
- El uso de floculantes en el proceso de cianuración mejora la eficiencia del proceso de separación de sólidos y líquidos, facilita la recuperación del agua y reduce el impacto ambiental de las operaciones mineras. La selección del tipo de floculante depende de las características del relave y de la eficiencia en el tratamiento de los residuos. Es por ello que el floculante aniónico sería el más adecuado para este tipo de muestra debido a la presencia de metales cargados positivamente y la necesidad de mejorar la clarificación del agua y la extracción de sólidos. Los floculantes catiónicos no serían ideales en este caso debido a la posibilidad de que interactúen de manera menos eficiente con las partículas cargadas positivamente.
- La prueba de jarras realizada con los polímeros permitió determinar el floculante más adecuado para el tratamiento de los relaves. Los resultados mostraron que la combinación de los floculantes HARFLOC-1145 y HARFLOC-1165 dio lugar a un "súper floculante", que fue el más eficiente en la recuperación de agua. Esta combinación permitió obtener una gran cantidad de agua cristalina, libre de sedimentos, lo cual es un indicador de la efectividad del proceso de floculación. La optimización del uso de estos floculantes no solo mejora la calidad del agua recuperada, sino que también facilita la consolidación de los relaves, contribuyendo a un manejo más eficiente y sostenible de los residuos mineros.

- En base a un análisis técnico se determinó que el método más práctico, eficaz y económico es la floculación, el cual permite extraer la mayor cantidad de humedad en comparación con el filtro prensa, de esta manera y en base a dicho análisis se obtuvo lo que se deseaba en este trabajo de investigación un método óptimo y rentable en el tiempo.

9. Recomendaciones

- Una vez que los relaves generados en la planta de beneficio hayan sido tratados mediante el uso de floculantes, los cuales permiten la consolidación de los relaves a través de la liberación de agua, se puede considerar su reutilización en la industria minera, específicamente para el relleno de labores mineras subterráneas. Además, se recomienda realizar ensayos técnicos para evaluar si las características de estos relaves permiten su aprovechamiento en la industria de la construcción, contribuyendo así a minimizar el impacto paisajístico y, por ende, el impacto ambiental.
- Se sugiere llevar a cabo monitoreos continuos y un seguimiento detallado en las actividades relacionadas con el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición de relaves, así como en las instalaciones de la relavera, con el objetivo de prevenir posibles fuentes de contaminación y garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales.
- Con base en los resultados obtenidos de la prueba de jarras, que demuestran la efectividad de la combinación de los floculantes HARFLOC-1145 y HARFLOC-1165 en la recuperación de agua y la consolidación de los relaves, se recomienda realizar un escalado de la combinación de floculantes en los cuales se debe considerar la aplicación de esta combinación de floculantes a mayor escala en la planta de tratamiento de relaves.
- Es importante realizar pruebas adicionales a nivel piloto para ajustar las dosis óptimas de ambos floculantes, asegurando que los resultados sean consistentes en diferentes condiciones operativas y con distintos tipos de relaves.
- Se debe realizar un monitoreo continuo mediante la implementación de un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua recuperada y de la estabilidad de los relaves tratados, para garantizar que la eficiencia del proceso de floculación se mantenga a lo largo del tiempo y que el agua recuperada cumpla con los estándares ambientales requeridos.
- Investigación en aplicaciones adicionales mediante la exploración de posibles aplicaciones adicionales de la combinación de floculantes en otras fases del

tratamiento de residuos mineros, como el manejo de efluentes o la mejora de la calidad del agua en procesos de recirculación.

- En base a la caracterización física, química y mineralógica de los de los materiales existentes en la planta de beneficio y sus contenidos de Zinc, plomo, hierro se recomienda implementar un circuito de flotación con la finalidad de recuperar estos minerales de interés comercial y potenciar de esta manera los procesos que actualmente se utilizan.
- Con estas recomendaciones, se puede maximizar la efectividad del proceso de floculación, mejorando el manejo de los relaves y optimizando la recuperación de agua de manera sostenible.
- Es importante evaluar la calidad de agua y a su vez considerar un tratamiento con el fin de poder reutilizarla en el proceso de beneficio con ello se minimizaría el impacto ambiental y también se reduciría el consumo.

10. Bibliografía

- Aparicio, P., & Carbajal, J. (2010). Difracción de rayos X: Caracterización de compuestos naturales y sintéticos. *Revista de Técnicas Analíticas*
- Aspden, J., & Coauthors. (1995). *Geología del Complejo Metamórfico de El Oro y análisis estructural del macizo Tahuín.*
- Banco Central del Ecuador. (2017). Informe de desarrollo minero. Quito, Ecuador
- British Geological Survey y CODIGEMM. (1994). Estudios del Complejo Metamórfico de El Oro.
- Castellanos, M., et al. (2018). Absorción atómica para análisis de elementos traza. *Journal of Analytical Techniques*
- Cevallos, D. (2020). *Caracterización mineralógica del sistema de vetas del área minera Barbasco Unificado, cantón Portovelo, provincia de El Oro.*
- Cevallos, N., Burgos, G., & Córdova, A. (2022). *Evaluación de la eficacia de coagulantes sintéticos y naturales en el tratamiento de aguas residuales generadas en la producción de harina de pescado.*
<https://doi.org/10.5281/zenodo.6993155>
- Cuenca, L. (2023). *Tratamiento de los relaves para el Área Minera Joya del Oriente II código 501381, ubicado en la parroquia Los Encuentros, perteneciente al cantón Yanzatza, provincia Zamora Chinchipe.*
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/27027/3/LuisEnriqueCuencaAguinsaca.pdf>
- Chiquillo, A. (2020). Métodos de explotación subterránea: Aplicaciones y técnicas. *Revista Minería y Sociedad*
- De La Cruz, R. (2018). Fluorescencia de rayos X para identificación de elementos. *Química Analítica*
- EcoFluid System. (2024). Especificaciones técnicas de los floculantes HARFLOC-1110, 1140, 1145 y 1165
- Fernández, A. (s.f.). Propiedades mineralógicas de los relaves. *Manual de Geología*
- Feininger, T. (1978). *Estratigrafía y petrología de las rocas paleozoicas de Ecuador.*

Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico(INIGEMM), Informe de las unidades litológicas de la zona Zaruma-Paccha Escala 1:50 000, Junio 2013.

Lavandaio, E. (2014). Introducción a la minería. Ediciones Técnicas Mineras

López, C. (2021). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA DE ULTRAFINOS DE RELAVES MINEROS CHILENOS.*

Muñoz Razo, J. (2011). *Metodología de la recolección de datos para análisis científico*

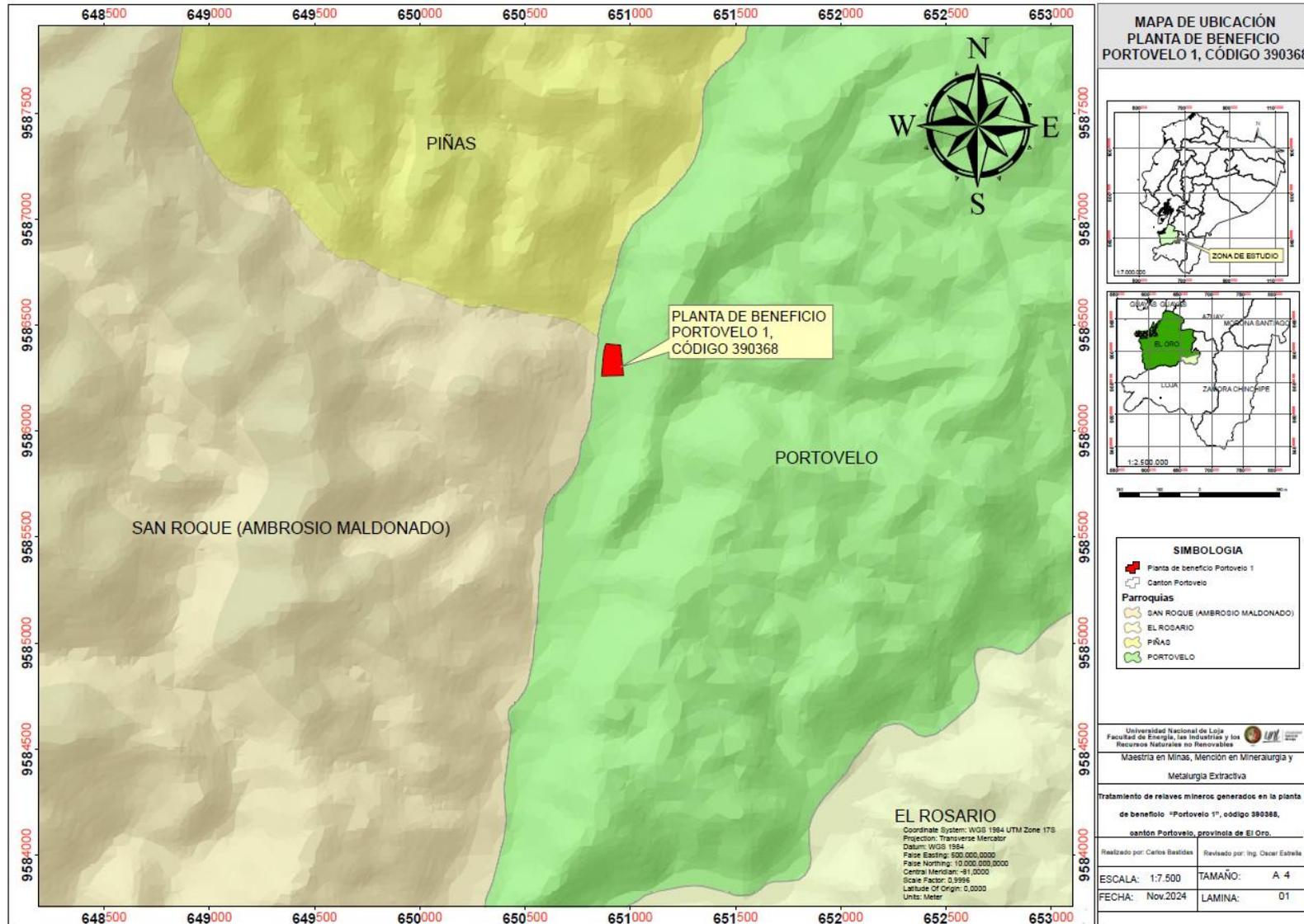
Tapia, E. (2018). Análisis de costos en el transporte de minerales. *Ingeniería Minera*

Triana, J. (2016). Técnicas de trituración en minería moderna. *Manual Técnico de Procesos Mineros*

Weintraub, A. (2008). *Optimización de bloques de explotación minera*

11. Anexos

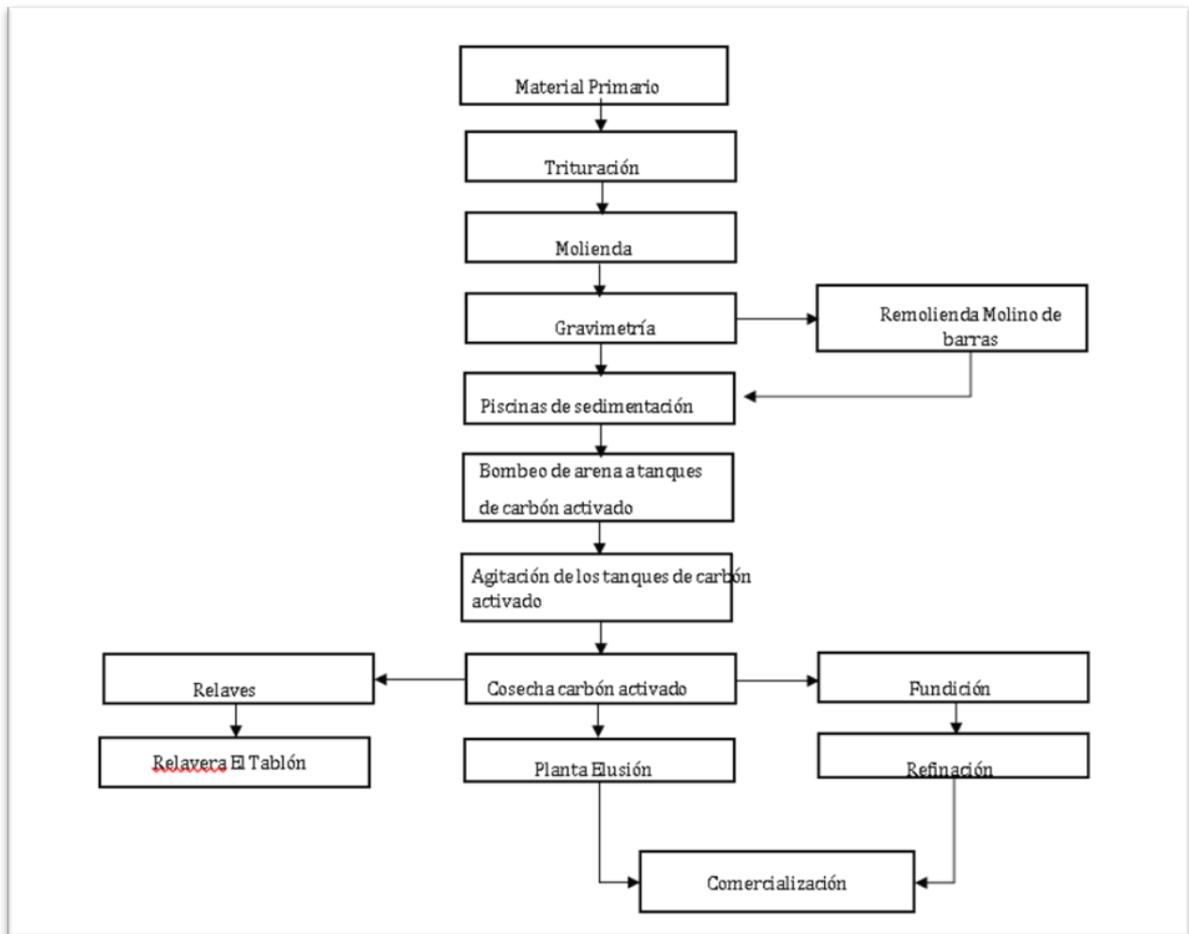
Anexo 1. Mapa de ubicación planta de beneficio Portovelo 1



Anexo 2. Ficha de muestreo

MUESTREO DE RELAVE		
Coordenadas	X: 650912 Y: 9586364	Datum: WGS 84
Dimensiones:	A: 42 x L:23 x P: 6	
Código de la muestra:	R1	
Fotografías:		
Descripción de las propiedades del relave:	<p>Mediante la caracterización del relave, a través del análisis de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas, se pudo identificar que los relaves son de naturaleza polimetálica sulfurado, con un considerable contenido de metales de cobre, plomo, cadmio, hierro, entre otros.</p>	

Anexo 3. Diagrama de flujo Planta de beneficio Portovelo 1



Anexo 4. Análisis de laboratorio



INFORME DE ENSAYO

Nº. 32922

Cliente	: <u>Carlos Bastidas</u>
Dirección	: <u>Portovelo</u>
Tipo de Muestra	: <u>Mineral</u>
Envase	: Funda Plástica
Condición de la Muestra	: En buenas condiciones para analizar
Recepción de Muestra N°	: 22818
Fecha de Recepción de Muestras	: 2024-11-08 10:41:21.0
Fecha Inició Análisis	: 2024-11-11
Fecha Terminó Análisis	: 2024-11-11
Fecha de Emisión del Informe	: 2024-11-11

Los datos subrayados son proporcionados por el cliente. Albexus no es responsable por dicha información. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio Albexus

Las actividades del laboratorio se realizan en la sede principal, Piñas.
Los testigos de las muestras se almacenan por un periodo de 2 meses

CINTHIA
MELINA
RIOS
AGUILAR

Digitally signed by CINTHIA MELINA RIOS AGUILAR
DN: cn=CINTHIA MELINA RIOS AGUILAR,
serialNumber=0752223196-3
10124174234, o=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION e=SECURITY DATA S.A. S, c=EC
Date: 2024.11.11 20:32:44 -0500

Cynthia Ríos Aguilar
Jefe de Laboratorio

ALB-FOR-07 Ver. 06 27/10/2023

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO

Nº. 32922

RESULTADOS

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb*	Fe
	Nº	Alb.	grt	grt	%	%	%	%	%	%
Relave	1	123990	0.29	30.91	0.08	0.53	0.98	0.08	0.01	11.90

Comp. N°: Número de muestras que conforman el compuesto // Cod. Alb: Código Albexus
Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.
Los resultados solo están relacionados con los ítems de ensayo.
Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.

MÉTODOS:

1. Au, Ag: ALB-MET-01. Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, AS, Fe: ALB-MET02. Determinación de Metales por Digestión con HNO₃ (cc) por Absorción Atómica.
3. Au, Ag(Pureza): ALB-MET-04. Determinación de Au y Ag por copelación en barras doré.
4. Humedad: NTP 122.015 1974 (Revisado el 2017). Contenido de Humedad.
5. Au (EF/AAS): ALB-MET-05. Determinación de Au por ensayos al fuego – AAS.
6. Cu (Volumetría): ALB-MET-06. Determinación de cobre por volumetría.

COMENTARIOS:

FINAL DEL DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO

Nº. 32923

RESULTADOS

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Hg*	Bi*	Cd*
	Nº	Alb.	%	%	%
Relave	1	123990	0.00	0.00	0.01

Comp. N°: Número de muestras que conforman el compuesto // Cod. Alb: Código Albexus
Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.
Los resultados solo están relacionados con los ítems de ensayo.
Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.

MÉTODOS:

1. Au, Ag: ALB-MET-01. Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, AS, Fe: ALB-MET02. Determinación de Metales por Digestión con HNO₃ (cc) por Absorción Atómica.
3. Au, Ag(Pureza): ALB-MET-04. Determinación de Au y Ag por copelación en barras doré.
4. Humedad: NTP 122.015 1974 (Revisado el 2017). Contenido de Humedad.
5. Au (EF/AAS): ALB-MET-05. Determinación de Au por ensayos al fuego – AAS.
6. Cu (Volumetría): ALB-MET-06. Determinación de cobre por volumetría.

COMENTARIOS:

FINAL DEL DOCUMENTO

Anexo 5. Certificado de traducción al idioma inglés



Loja, 13 de diciembre del 2024

A quien corresponda. –

Yo Jinson Michael Vélez Vega con cedula de identidad 1104244296, Licenciado en Ciencias de la Educación mención inglés registro Nro. 1031-2017-1878629.

CERTIFICO:

Que, he realizado la traducción al idioma inglés de el resumen de Trabajo de Integración Curricular denominado "Tratamiento de relaves mineros generados en la planta de beneficio Portovelo 1, código 390368, cantón Portovelo, provincia de El Oro", elaborado por el Ing. **Bastidas Ramón Carlos Vicente** con cedula de ciudadanía numero **1104217086**, maestrante en Minas mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva de la Universidad Nacional de Loja.

Atentamente,

Jinson Michael Vélez Vega
DIRECTOR ACADEMICO WEI ENGLISH INSTITUTE
Lcdo. En Ciencias de la Educación Mención Idioma Inglés
Número de Registro Senescyt: 1031-2017-1878629
Email: wei.academico@gmail.com
Teléfono: 0992062770



Av. Orillas del Zamora 93-94 entre Segundo Puertas Moreno Y Clodoveo Carrión
Teléfono: 07-2571489 / 2579934
weiyoaec@gmail.com – Loja, Ecuador.