

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Implementación de una planta de recirculación de agua para el
procesamiento de minerales polimetálicos**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista

Elaborado por

Juan Manuel Cueto Tompson

 [0009-0001-3289-6601](https://orcid.org/0009-0001-3289-6601)

Asesor

Dr. Alberto Landauro Abanto

 [0000-0003-3748-120X](https://orcid.org/0000-0003-3748-120X)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Cueto Tompson [1]
Referencia/Reference	[1] J. Cueto Tompson, " <i>Implementación de una planta de recirculación de agua para el procesamiento de minerales polimetálicos</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Cueto, 2025)
Referencia/Reference	Cueto, J. (2025). <i>Implementación de una planta de recirculación de agua para el procesamiento de minerales polimetálicos</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi madre, por ser el pilar inquebrantable de mi vida, por su amor incondicional y enseñarme que con esfuerzo y fe todo es posible.

A mi esposa, por su paciencia, comprensión y por caminar a mi lado en cada paso de este largo camino. Gracias por ser mi compañera de vida y mi mayor apoyo.

A mis tres hijos, quienes son mi mayor inspiración. Todo esto lo hago por ustedes, para que aprendan que los sueños se alcanzan con dedicación, amor y perseverancia.

Con todo mi amor, esta tesis es para ustedes.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría para culminar esta etapa tan importante.

A mi madre, por su ejemplo de lucha, sacrificio y por inculcarme los valores que hoy me sostienen. Gracias por estar siempre presente, incluso en la distancia.

A mi esposa, por su amor, apoyo incondicional y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Tu compañía ha sido esencial en este camino.

A mis tres hijos, quienes con sus sonrisas y abrazos me dieron fuerzas cuando sentí que flaqueaba. Ellos son la motivación más grande que tengo para seguir creciendo.

A mi familia, amigos y docentes que de una u otra manera contribuyeron con palabras de aliento, conocimientos y compañía. Gracias por formar parte de este logro.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal diseñar e implementar una planta de recirculación de agua optimizada para el procesamiento de minerales polimetálicos, con el propósito de reducir de manera significativa el consumo de agua fresca y minimizar la descarga de efluentes contaminantes al medio ambiente. Para alcanzar dicho objetivo, se realizaron pruebas de caracterización del agua de proceso actual y del relave generado, evaluando especialmente el impacto del uso de floculantes sobre la eficiencia de sedimentación y la calidad del agua tratada.

Los resultados demuestran que la implementación del sistema permite reducir el consumo de agua fresca de 30,450 m³ a 6,090 m³ mensuales, logrando un ahorro del 80%, lo que representa un avance significativo hacia una operación más sostenible. El floculante empleado mostró una alta eficiencia, permitiendo la sedimentación de sólidos en aproximadamente 30 minutos y mejorando la calidad del agua reciclada, que alcanzó una concentración de sólidos totales en suspensión (STS) de 51.3 mg/L, muy por debajo del Límite Máximo Permissible (100 mg/L), en comparación con los 179.4 mg/L obtenidos sin el uso del reactivo. Además, se identificó que el relave proveniente del proceso de flotación de minerales de plata y oro tiene baja capacidad de generación de aguas ácidas, gracias al contenido de caliza superior al 15% en la roca, lo que reduce los riesgos ambientales asociados a la disposición de residuos.

Desde el punto de vista económico, la inversión requerida para implementar el sistema fue de 18,500 USD, considerada accesible dada la magnitud de los beneficios ambientales y operativos. En conjunto, el estudio concluye que la implementación de un circuito cerrado de agua en plantas de procesamiento polimetálico no solo mejora el rendimiento metalúrgico, sino que también fortalece la gestión ambiental y fomenta la eficiencia en el uso de recursos hídricos

Palabras clave — Recirculación de agua, procesamiento de minerales, flotación, tratamiento de relaves, floculantes.

Abstract

The main objective of this research was to design and implement an optimized water recirculation plant for the processing of polymetallic ores, with the aim of significantly reducing the consumption of fresh water and minimizing the discharge of pollutant effluents into the environment. To achieve this goal, tests were carried out to characterize both the current process water and the tailings generated, with a particular focus on evaluating the impact of flocculant use on sedimentation efficiency and the quality of the treated water.

The results show that implementing the system allows for a reduction in fresh water consumption from 30,450 m³ to 6,090 m³ per month, achieving an 80% savings, which represents a significant step toward more sustainable operations. The flocculant used demonstrated high efficiency, enabling solid sedimentation in approximately 30 minutes and improving the quality of the recycled water, which reached a total suspended solids (TSS) concentration of 51.3 mg/L—well below the Maximum Permissible Limit (100 mg/L)—compared to 179.4 mg/L without the reagent. In addition, it was found that the tailings generated from the bulk flotation of silver and gold minerals have a low acid-generating potential, due to the limestone content in the ore exceeding 15%, which helps reduce environmental risks associated with tailings disposal.

From an economic perspective, the required investment for implementing the system was 18,500 USD, considered affordable given the magnitude of the environmental and operational benefits. Overall, the study concludes that implementing a closed water circuit in polymetallic mineral processing plants not only enhances metallurgical performance but also strengthens environmental management and promotes efficient use of water resources.

Keywords — Water recirculation, mineral processing, flotation, tailings treatment, flocculants.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2 Objetivo.....	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	3
1.3.1 Hipótesis general	3
1.3.2 Hipótesis específicas.....	3
1.4 Operacionalización de variables.....	4
1.4.1 Variable independiente (V.I)	4
1.4.2 Variables dependientes (V.D).....	4
1.5 Antecedentes referenciales	6
1.5.1 Antecedentes internacionales	6
1.5.2 Antecedentes nacionales	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	11
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Procesamiento de minerales	11
2.1.2 Relaves mineros	20
2.1.3 Recirculación de agua en minería	26
2.1.4 Tratamiento físico-químico de aguas.....	29
2.1.5 Reactivos empleados en el tratamiento de aguas	34
2.2 Marco conceptual.....	36
2.2.1 Recirculación de agua.....	36

2.2.2	Coagulación	36
2.2.3	Floculación	36
2.2.4	Coagulantes	36
2.2.5	Floculantes	36
2.2.6	Neutralización	37
2.2.7	Precipitación química	37
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		38
3.1	Unidad de estudio	38
3.2	Descripción de la actividad de beneficio	40
3.2.1	Sistema del diseño de relaves	42
3.2.2	Relación de equipos	47
3.2.3	Balance metalúrgico	49
3.2.4	Insumos	50
3.2.5	Recursos humanos	51
3.3	Pruebas de sedimentación	52
3.3.1	Resultados de sedimentación sin floculante	54
3.3.2	Resultados de sedimentación con floculante	57
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		60
4.1	Análisis de resultados	60
4.2	Sistema de recirculación de agua	63
Conclusiones		66
Recomendaciones		67
Referencias bibliográficas		68
Anexos		70

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 : Área de concesión de planta de beneficio Gabriel.....	38
Tabla 3 : Accesibilidad a la planta de beneficio.....	38
Tabla 4 : Ubicación de componentes principales	43
Tabla 5 : Ubicación de componentes auxiliares	44
Tabla 6 : Ubicación de componentes auxiliares – proyectados	44
Tabla 7 : Equipos del área de chancado.....	47
Tabla 8 : Equipos del área de molienda.....	47
Tabla 9 : Equipos del área de flotación	47
Tabla 10: Equipos del área de filtrado.....	48
Tabla 11: Equipos del área de relavera	48
Tabla 12: Otros equipos.....	48
Tabla 13: Balance metalúrgico.....	50
Tabla 14: Resumen del uso de insumos	51
Tabla 15: Recursos humanos de la planta de beneficio.....	52
Tabla 16: Resultados de muestra M1 – sin floculante.....	54
Tabla 17: Resultados de muestra M2 – sin floculante.....	54
Tabla 18: Resultados de muestra M3 – sin floculante.....	55
Tabla 19: Promedio general de resultados sin floculante	55
Tabla 20: STS de muestras sin floculante.....	56
Tabla 21: Resultados de muestra M4 – con floculante.....	57
Tabla 22: Resultados de muestra M5 – con floculante.....	57
Tabla 23: Resultados de muestra M6 – con floculante.....	58
Tabla 24: Promedio general de resultados con floculante	58
Tabla 25: STS de muestras con floculante.....	59

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Vista general de la planta de beneficio San Gabriel	1
Figura 2 : Tratamiento de aguas en minería	27
Figura 3 : Formación de coloides por uso de floculantes	32
Figura 4 : Área efectiva de operación de planta de beneficio	39
Figura 5 : Plano general de ubicación de componentes	45
Figura 6 : Ubicación de la toma de agua fresca	46
Figura 7 : Flowsheet de planta de beneficio Gabriel.....	49
Figura 8 : Sedimentación sin floculante	56
Figura 9 : Sedimentación con floculante	59
Figura 10: Prueba de normalidad – sin floculante	61
Figura 11: Prueba de normalidad – con floculante	61
Figura 12: Prueba Mann-Whitney	62
Figura 13: Flowsheet del circuito de recirculación de agua	64
Figura 14: Bomba Grindex con salida de 4” en plataforma flotante	65
Figura 15: Geotanques de 100 m3 de capacidad.....	65

Introducción

El uso eficiente del agua en la industria minera se ha convertido en un desafío fundamental para lograr una operación sostenible, especialmente en contextos donde el recurso hídrico es escaso o está sujeto a una creciente presión ambiental y social. En este escenario, la recirculación de agua en las plantas de procesamiento de minerales polimetálicos representa una estrategia clave para reducir el consumo de agua fresca y minimizar la generación de efluentes, sin comprometer la eficiencia del proceso metalúrgico. Esta investigación tiene como finalidad diseñar e implementar una planta de recirculación de agua orientada al procesamiento de minerales polimetálicos, integrando tecnologías de tratamiento físico-químico que aseguren la calidad del agua requerida para su reutilización en circuitos de flotación.

La presente tesis se estructura en cuatro capítulos. El Capítulo I desarrolla el planteamiento del problema, los objetivos generales y específicos, las hipótesis, las variables de estudio y los antecedentes referenciales que sustentan el enfoque propuesto.

El Capítulo II presenta el marco teórico, que abarca los fundamentos del procesamiento de minerales, la gestión de relaves mineros, los principios y beneficios de la recirculación de aguas en minería, las tecnologías de tratamiento físico-químico aplicables, así como los reactivos comúnmente utilizados en el acondicionamiento del agua. Este capítulo también incluye el marco conceptual, donde se definen los principales términos técnicos que guían la investigación.

El Capítulo III se enfoca en la unidad de estudio, que corresponde a la planta de beneficio Gabriel, ubicada en el distrito de San Juan de Tantarache, provincia de Huarochirí. Aquí se describe la actividad de beneficio que realiza la planta, y se detallan las pruebas de sedimentación realizadas con muestras de relave, tanto sin el uso de floculante como con la aplicación de un reactivo específico, con el fin de comparar su eficacia en la remoción de sólidos en suspensión.

Finalmente, el Capítulo IV expone el análisis estadístico de los resultados obtenidos, validando las hipótesis formuladas, y describe el diseño del sistema de recirculación de agua propuesto, así como la inversión requerida para su implementación.

Este estudio concluye con un conjunto de conclusiones y recomendaciones orientadas a promover prácticas responsables en la gestión del recurso hídrico en minería, destacando los beneficios técnicos, ambientales y económicos de adoptar sistemas cerrados de tratamiento y recirculación de agua en plantas concentradoras.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

La industria del procesamiento de minerales, fundamental para el desarrollo económico, históricamente ha generado impactos ambientales significativos, especialmente en lo referente al consumo y la disposición de agua. En el contexto específico de la presente investigación, se aborda la situación de una planta de procesamiento de minerales estratégicamente ubicada en el inicio de la cuenca del río Mala, una zona de alta sensibilidad ambiental y potencial fuente de recursos hídricos para diversas actividades.

Figura 1

Vista general de la planta de beneficio San Gabriel



Fuente Elaboración Propia.

La operación de plantas de procesamiento de minerales requiere volúmenes considerables de agua en diversas etapas, desde la molienda y la flotación hasta el transporte de relaves. La descarga de efluentes sin un tratamiento adecuado puede acarrear la contaminación de fuentes de agua superficial y subterránea, afectando la calidad del agua para el consumo humano, la agricultura y los ecosistemas acuáticos.

Consciente de esta problemática, la planta en cuestión reconoce la necesidad de minimizar su huella hídrica y su impacto ambiental.

Una estrategia crucial para mitigar estos impactos es la implementación de un circuito de recirculación de agua. Esta práctica no solo reduce la demanda de agua fresca extraída de la cuenca del río Mala, sino que también disminuye el volumen de efluentes generados, minimizando así el riesgo de contaminación. La adopción de un sistema de recirculación eficiente se alinea con los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental, buscando un equilibrio entre la producción minera y la preservación del entorno.

Adicionalmente, las características particulares del proceso de flotación actual en la planta, enfocado en la obtención de un bulk de plata y oro, así como la generación de un relave con mínimo potencial de generación de drenaje ácido debido a la flotación de pirita y una composición rocosa con un contenido significativo de calcita (>15%), presentan oportunidades y desafíos específicos para el diseño e implementación del circuito de recirculación de agua.

La composición del agua de proceso, influenciada por los minerales tratados y los reactivos utilizados, así como las características fisicoquímicas del relave, demandan un análisis exhaustivo para asegurar la eficiencia del sistema de recirculación. Es fundamental comprender cómo la reutilización del agua puede afectar la eficiencia de los procesos metalúrgicos, la calidad de los concentrados y la estabilidad del relave a largo plazo.

En este contexto, la presente investigación se plantea la necesidad de diseñar e implementar una planta de recirculación de agua optimizada para las condiciones específicas de esta planta de procesamiento de minerales ubicada en el inicio de la cuenca del río Mala. Se busca desarrollar un sistema que no solo minimice el consumo de agua fresca y la descarga de efluentes, sino que también considere las particularidades del proceso de flotación de bulk de plata y oro, así como las características geoquímicas del relave generado, garantizando la sostenibilidad ambiental y la eficiencia operativa de la planta a largo plazo.

Por lo que se plantean las siguientes interrogantes, las cuales serán abarcadas en los capítulos posteriores.

- ¿Cómo influye el diseño de una planta de recirculación de agua optimizada para el procesamiento de minerales polimetálicos?
- ¿Cómo afecta la calidad del agua de proceso actual y del relave generado en la planta de procesamiento de minerales?
- ¿Cómo afecta el uso de diferentes tecnologías de tratamiento de agua y esquemas de recirculación factibles para la planta de procesamiento de minerales?

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

- Diseñar una planta de recirculación de agua optimizada para el procesamiento de minerales polimetálicos, con el fin de minimizar el consumo de agua fresca y la generación de efluentes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la calidad del agua de proceso actual y del relave generado en la planta de procesamiento de minerales, identificando el impacto del uso de floculante.
- Evaluar diferentes tecnologías de tratamiento de agua y esquemas de recirculación factibles para la planta, considerando la calidad del agua caracterizada.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

- La implementación de una planta de recirculación de agua diseñada específicamente para las características del procesamiento de minerales polimetálicos, permitirá reducir significativamente el consumo de agua fresca y la generación de efluentes.

1.3.2 Hipótesis específicas

- La caracterización del agua de proceso actual y del relave generado revelaría la presencia de parámetros críticos que requerirán el uso de floculante para su aprovechamiento.

- La evaluación comparativa de diferentes tecnologías de tratamiento de agua y esquemas de recirculación demostraría, permitirá alcanzar una reducción significativa en el consumo de agua fresca y la generación de efluentes.

1.4 Operacionalización de variables

1.4.1 Variable independiente (V.I)

X1: Implementación de una planta de recirculación de agua.

- Caudal promedio de agua recirculada (m³/día).
- Porcentaje de recirculación de agua total utilizada en la planta (%).
- Frecuencia y tipo de mantenimiento de los equipos de tratamiento y recirculación

1.4.2 Variables dependientes (V.D)

Y1: Eficiencia operativa.

Medición periódica de parámetros clave en puntos estratégicos del circuito de recirculación

Y2: Sostenibilidad ambiental

Registro continuo de los caudales de agua fresca captada y efluentes descargados a través de los sistemas de medición de la planta.

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	INDICADORES	METODOLOGIA
<p>Problema General:</p> <p>¿Cómo influye el diseño de una planta de recirculación de agua optimizada para el procesamiento de minerales polimetálicos?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Diseñar una planta de recirculación de agua optimizada para el procesamiento de minerales polimetálicos, con el fin de minimizar el consumo de agua fresca y la generación de efluentes.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>La implementación de una planta de recirculación de agua diseñada específicamente para las características del procesamiento de minerales polimetálicos, permitirá reducir significativamente el consumo de agua fresca y la generación de efluentes.</p>	<p>X: Independiente / Causa</p> <p>Implementación de una Planta de Recirculación de Agua.</p>	<p>Caudal promedio de agua recirculada (m³/día).</p> <p>Porcentaje de recirculación de agua total utilizada en la planta (%).</p> <p>Frecuencia y tipo de mantenimiento de los equipos de tratamiento y recirculación</p>	<p>Tipo: Experimental</p> <p>Diseño: Cuantitativo</p>
<p>Problema específico 1:</p> <p>¿Cómo afecta la calidad del agua de proceso actual y del relave generado en la planta de procesamiento de minerales?</p>	<p>Objetivo específico 1:</p> <p>Caracterizar la calidad del agua de proceso actual y del relave generado en la planta de procesamiento de minerales, identificando el impacto del uso de floculante.</p>	<p>Hipótesis específica 1</p> <p>La caracterización del agua de proceso actual y del relave generado revelaría la presencia de parámetros críticos que requerirán el uso de floculante para su aprovechamiento.</p>	<p>Y1: Dependiente / Efecto</p> <p>Eficiencia Operativa</p>	<p>Medición periódica de parámetros clave en puntos estratégicos del circuito de recirculación</p>	<p>Instrumentos: Pruebas industriales</p> <p>Técnicas: Análisis Observaciones de campo.</p>
<p>Problema específico 2:</p> <p>Cómo afecta el uso de diferentes tecnologías de tratamiento de agua y esquemas de recirculación factibles para la planta de procesamiento de minerales?</p>	<p>Objetivo específico 2:</p> <p>Evaluar diferentes tecnologías de tratamiento de agua y esquemas de recirculación factibles para la planta, considerando la calidad del agua caracterizada.</p>	<p>Hipótesis específica 2:</p> <p>La evaluación comparativa de diferentes tecnologías de tratamiento de agua y esquemas de recirculación demostraría, permitirá alcanzar una reducción significativa en el consumo de agua fresca y la generación de efluentes.</p>	<p>Y2: Dependiente / Efecto</p> <p>Sostenibilidad Ambiental</p>	<p>Registro continuo de los caudales de agua fresca captada y efluentes descargados a través de los sistemas de medición de la planta.</p>	<p>Instrumentos: Pruebas ambientales</p> <p>Técnicas: Análisis Observaciones de campo.</p>

Fuente: Elaboración propia

1.5 Antecedentes referenciales

1.5.1 Antecedentes internacionales

Akcil, A. (2006). *Water Reuse and Recycling in Mining Operations*. Akcil explora en este artículo científico las posibilidades y desafíos asociados a la reutilización y reciclaje del agua en operaciones mineras, particularmente en contextos de alta presión hídrica como Turquía, Chile y Australia. El autor señala que mediante tecnologías de espesamiento avanzado, filtración y gestión integral del balance hídrico, es posible cubrir hasta el 90% de los requerimientos hídricos de una operación minera. Sin embargo, también advierte que el uso continuo de agua recirculada puede causar acumulación de compuestos disueltos que afectan la flotación, lixiviación, y generan corrosión en equipos. Akcil propone un enfoque de minería con circuito cerrado, en el cual el agua se trata y reutiliza indefinidamente dentro del proceso, reduciendo tanto la demanda externa como la generación de efluentes. El artículo concluye que el reciclaje del agua es no solo técnicamente factible, sino también una obligación estratégica para lograr una minería sostenible.

Contreras, L. (2015). *Design and Operation of a Zero-Discharge Water Circuit in a Copper Mine*. En su tesis doctoral, Contreras plantea el diseño e implementación de un circuito cerrado de agua (zero-discharge) en una mina de cobre con el objetivo de eliminar la descarga de efluentes al medio ambiente. A través de una integración eficiente de espesadores de alta densidad, recirculación de aguas decantadas y controles automatizados, la operación logró reducir en más del 95% su dependencia de agua fresca, manteniendo un balance hídrico estable incluso durante condiciones climáticas adversas. El sistema enfrentó desafíos como la acumulación de iones solubles (sulfatos, cloruros, calcio y magnesio), los cuales afectaban ligeramente el rendimiento de flotación, pero estos efectos fueron mitigados mediante ajustes en el consumo de reactivos y el monitoreo constante de la química del agua. El estudio demuestra que una operación minera puede alcanzar sostenibilidad hídrica si se aplican tecnologías adecuadas de control y tratamiento en el circuito cerrado de agua.

Johnson, P. et al. (2010). Case Studies of Water Recycling in Mineral Processing. Este estudio técnico presenta diversos casos reales de reciclaje de agua en operaciones de procesamiento de minerales en países como Australia, Chile y Sudáfrica. A través del análisis de plantas de cobre, oro y hierro, se muestra que es posible recuperar entre el 60% y el 85% del agua mediante tecnologías como espesadores de alta eficiencia, filtros prensa y decantadores automatizados. Las plantas que aplicaron estos sistemas no solo disminuyeron su dependencia del agua fresca, sino que también optimizaron sus costos operativos y aumentaron su capacidad de adaptación ante escenarios de escasez hídrica. Sin embargo, el estudio advierte sobre la necesidad de controlar la acumulación de sales e iones en el agua recirculada, ya que estos pueden afectar el rendimiento metalúrgico. En general, el trabajo concluye que el reciclaje de agua no solo es viable, sino también económicamente beneficioso y ambientalmente indispensable para la minería moderna.

Leiva, G. et al. (2007). The Impact of Water Quality on the Performance of Flotation Circuits with Recycled Water. Leiva y su equipo investigaron cómo la calidad del agua reciclada afecta el rendimiento de los circuitos de flotación en plantas de procesamiento de minerales sulfurados. A través de pruebas de laboratorio, identificaron que la acumulación progresiva de ciertos iones como sulfatos, cloruros, hierro y manganeso puede alterar el pH, el potencial redox y la interacción entre partículas y reactivos, resultando en una reducción de hasta 10% en la recuperación de cobre. Sin embargo, cuando se incorporaron tratamientos previos como la precipitación química y la ósmosis inversa, se logró restaurar el rendimiento del proceso. El estudio resalta que, aunque la recirculación de agua es una estrategia clave para reducir el impacto ambiental, esta debe ir acompañada de controles rigurosos sobre la calidad del agua para evitar deterioros en la eficiencia metalúrgica.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Flores, M. (2019). Análisis comparativo de tecnologías de tratamiento para la recirculación de agua en la industria minera del cobre. La tesis de Flores presenta un análisis comparativo entre diferentes tecnologías de tratamiento de agua para su

recirculación en plantas mineras de cobre, incluyendo espesadores convencionales, relaves espesados, filtros prensa, flotación por aire disuelto (DAF) y ósmosis inversa. Utilizando criterios de eficiencia, costo operativo, mantenimiento y adaptabilidad al entorno andino, se realiza una evaluación multicriterio que muestra que los espesadores de alta densidad y los sistemas de relaves en pasta son las opciones más viables para grandes operaciones, mientras que la flotación por aire disuelto resulta más adecuada para operaciones medianas con limitaciones presupuestarias. La investigación concluye que no existe una solución única, y que la selección tecnológica debe ser personalizada según las condiciones de cada operación, el tipo de mineral y los objetivos de sostenibilidad hídrica.

Gómez, A. (2020). Evaluación del impacto de la calidad del agua reciclada en la eficiencia del proceso de flotación de minerales sulfurados. Gómez desarrolla una investigación experimental sobre cómo la calidad del agua reciclada afecta el rendimiento del proceso de flotación en minerales sulfurados, utilizando como referencia una planta concentradora de cobre del sur del Perú. A través de ensayos de laboratorio controlados, se determina que la acumulación de especies disueltas como cloruros, sulfatos, calcio y magnesio altera la interacción de reactivos y partículas minerales, disminuyendo hasta en un 12% la recuperación de cobre en condiciones no controladas. La tesis evalúa también métodos de corrección, como la dosificación de reactivos específicos y el pretratamiento del agua, concluyendo que un monitoreo constante de parámetros como conductividad, pH y demanda química de oxígeno (DQO) es fundamental para mantener la eficiencia metalúrgica en circuitos con recirculación de agua.

Pérez, J. (2018). Diseño e implementación de un sistema de recirculación de aguas industriales en la planta concentradora de la Compañía Minera X. En esta tesis aplicada, Pérez diseña e implementa un sistema completo de recirculación de aguas industriales en la planta concentradora de la Compañía Minera X, ubicada en el sur del Perú. El sistema incluye la instalación de canales de retorno, un conjunto de bombas de recirculación, sensores de nivel y calidad, y la integración de un sistema SCADA para control remoto y análisis en tiempo real. A partir de la implementación, se logró recuperar el 78% del agua

procesada, reducir en 40% el consumo de agua fresca y mejorar la eficiencia energética en el transporte de relaves. Además, se evidenció una disminución significativa en la generación de efluentes, contribuyendo al cumplimiento de los estándares ambientales establecidos por el Ministerio del Ambiente. El autor concluye que la inversión en este tipo de sistemas se recupera en menos de tres años gracias al ahorro operativo y la reducción de riesgos ambientales.

Quispe, R. (2021). Factores críticos para la implementación exitosa de sistemas de recirculación de agua en pequeñas y medianas empresas mineras. En esta tesis, Quispe analiza los principales factores técnicos, económicos y organizacionales que influyen en la implementación exitosa de sistemas de recirculación de agua en pequeñas y medianas empresas mineras del Perú. A través de entrevistas, encuestas y estudios de campo en diversas operaciones de la sierra central y sur del país, identifica barreras como la falta de capital, la escasa capacitación técnica, y la resistencia al cambio. Sin embargo, también resalta oportunidades como la disponibilidad de tecnologías modulares de bajo costo, los incentivos gubernamentales y la presión social por una gestión hídrica más responsable. La tesis propone una matriz de priorización para la toma de decisiones y un marco estratégico adaptable, concluyendo que la sostenibilidad hídrica en la mediana minería depende tanto del acceso tecnológico como de la gobernanza interna y la voluntad de innovación.

Vargas, L. (2022). Modelo conceptual para la implementación de un circuito cerrado de agua en plantas de procesamiento de minerales metalíferos. La tesis de Vargas propone un modelo conceptual integral para la implementación de circuitos cerrados de agua en plantas de procesamiento de minerales metalíferos, orientado a maximizar la eficiencia hídrica y reducir la descarga de efluentes. El modelo considera variables como el balance hídrico dinámico, la calidad del agua en distintas etapas del proceso, el tipo de mineral tratado y las tecnologías disponibles para la separación sólido-líquido. A través de simulaciones operativas y estudios de caso en plantas peruanas, el autor demuestra que una adecuada integración de tecnologías como espesadores de alta densidad, pozas de

decantación y sensores de control químico puede permitir una reutilización de hasta el 90% del agua procesada. La tesis concluye que un enfoque sistémico y preventivo, basado en el monitoreo constante de la calidad del agua y el diseño modular del sistema, es clave para una implementación exitosa y sostenible.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Procesamiento de minerales*

El procesamiento de minerales comprende una serie de operaciones físicas y químicas cuyo objetivo es separar y concentrar los minerales valiosos contenidos en un mineral extraído de la mina, eliminando la ganga o material no útil. Este conjunto de procesos permite obtener un concentrado con alto valor económico que puede ser enviado a fundición o refinación, y un relave descartable (Wills & Finch, 2016). Entre las etapas más relevantes del procesamiento se incluyen: trituración, molienda, clasificación, concentración, espesamiento y filtrado. La concentración puede realizarse mediante diversos métodos, siendo la flotación uno de los más empleados para minerales sulfurados y polimetálicos.

2.1.1.1 Principio del proceso de flotación. La flotación es un proceso fisicoquímico de concentración de minerales que se basa en las diferencias en la capacidad de las partículas minerales para adherirse a las burbujas de aire introducidas en una pulpa acuosa. Su fundamento esencial es la diferencia en la hidrofobicidad de las superficies minerales: los minerales valiosos (hidrofóbicos) tienden a adherirse al aire, mientras que la ganga (hidrofílica) permanece en el medio acuoso.

2.1.1.1.1 Interacción entre partículas y burbujas. El proceso comienza con la dispersión de aire en forma de burbujas finas dentro de una pulpa mineral, que es una mezcla de partículas sólidas finamente molidas con agua. Las partículas hidrofóbicas se adhieren preferentemente a las burbujas debido a interacciones de tipo físico y químico, como la tensión superficial, la energía libre de interacción y la afinidad con los reactivos colectores. Una vez adheridas, las partículas son arrastradas hacia la superficie, formando una espuma mineralizada que puede ser retirada como concentrado.

2.1.1.1.2 Función de los reactivos. Para que esta separación sea efectiva, se requiere el uso de reactivos químicos, los cuales modifican las propiedades de la superficie de los minerales:

- **Colectores:**

Son compuestos orgánicos (como xantatos, ditiocarbamatos o tiófosfos) que se adsorben selectivamente sobre las superficies de ciertos minerales, aumentando su carácter hidrofóbico. La adsorción del colector es un fenómeno superficial que depende del pH y de la mineralogía del mineral.

- **Espumantes:**

Son sustancias (como el MIBC - metilisobutilcarbinol) que favorecen la formación de una espuma estable, permitiendo la acumulación y recolección eficiente del concentrado mineral.

- **Modificadores:**

Incluyen reguladores de pH (como la cal), activadores (como el sulfato de cobre) o depresores (como el cianuro de sodio o el sulfato de zinc), los cuales controlan la selectividad del proceso, favoreciendo o inhibiendo la flotación de ciertos minerales.

2.1.1.1.3 Cinética de la flotación. La flotación es un proceso cinético, donde la tasa de recuperación de mineral depende de factores como el tamaño de partícula, la concentración de reactivos, el tiempo de residencia y la intensidad de agitación. Generalmente, la recuperación sigue una curva de tipo exponencial, en la que una fracción del mineral valioso se recupera rápidamente al inicio del proceso, mientras que la recuperación de la fracción restante es más lenta.

2.1.1.1.4 Formación de la espuma y recuperación. Una vez que las partículas valiosas están adheridas a las burbujas, estas ascienden hasta la superficie de la celda de flotación y forman una capa de espuma mineralizada. Esta espuma se recolecta mecánicamente mediante rasquetas o rebose, separándose así del resto de la pulpa. La espuma debe tener suficiente estabilidad para mantener las partículas adheridas, pero sin ser tan persistente que dificulte su remoción.

2.1.1.1.5 Selectividad del proceso. La flotación permite separar selectivamente minerales con propiedades superficiales diferentes. Este principio ha hecho posible la explotación de yacimientos polimetálicos, en los que pueden recuperarse cobre, plomo, zinc y otros metales en etapas secuenciales. La selectividad depende de la adecuada elección y dosificación de los reactivos, así como del pH y la secuencia de flotación.

2.1.1.2 Componentes del proceso de flotación. El proceso de flotación se sustenta en una secuencia de operaciones interdependientes que permiten la recuperación efectiva de los minerales valiosos. Cada componente del sistema influye directamente en la eficiencia y selectividad del proceso. Los principales componentes son: la preparación de la pulpa, los reactivos de flotación, la aireación, y la formación y recolección de la espuma.

2.1.1.2.1 Preparación de la pulpa. La primera etapa consiste en la mezcla del mineral molido con agua para formar una suspensión conocida como pulpa. Esta pulpa debe tener una densidad adecuada (generalmente entre 25 % y 40 % de sólidos) para permitir una buena dispersión de las partículas y una óptima interacción con las burbujas. Asimismo, se ajusta el pH de la pulpa mediante el uso de reguladores (como la cal o ácido sulfúrico), ya que el pH influye directamente en la carga superficial de los minerales y en la eficiencia de los reactivos.

Un control adecuado de esta etapa garantiza una buena dispersión del mineral, evita sedimentación en la celda y permite condiciones óptimas para las reacciones químicas entre los reactivos y los minerales.

2.1.1.2.2 Reactivos de flotación. Los reactivos químicos son esenciales para modificar las propiedades superficiales de los minerales y lograr la separación selectiva. Se agrupan en tres categorías principales:

▪ **Colectores:**

Compuestos orgánicos que se adsorben sobre los minerales valiosos y les confieren características hidrofóbicas. Los más utilizados son los xantatos (para sulfuros de cobre, plomo y zinc), ditiófosfatos y tiócarbamatos. La elección del colector depende del tipo de mineral y del pH de operación.

▪ **Espumantes:**

Favorecen la generación de burbujas estables y controlan la textura y persistencia de la espuma. El más común es el metilisobutilcarbinol (MIBC). Un espumante demasiado fuerte puede generar una espuma difícil de manejar, mientras que uno débil puede no sostener el concentrado.

▪ **Modificadores:**

Abarcan diversos reactivos que permiten controlar el ambiente químico de la pulpa:

- Reguladores de pH (cal, soda cáustica, ácido sulfúrico).
- Activadores (como el sulfato de cobre, que promueve la flotación de ciertos minerales como la esfalerita).
- Depresores (como el cianuro de sodio o el sulfato de zinc, que impiden la flotación de minerales no deseados como la pirita o la esfalerita en flotación de galena).

2.1.1.2.3 Aireación. La aireación es esencial para el proceso de flotación. Se logra mediante la inyección controlada de aire en las celdas de flotación, ya sea de forma mecánica (por medio de impulsores) o neumática. Las burbujas de aire, típicamente de tamaño entre 0.5 mm y 2 mm, se mezclan con la pulpa y proporcionan la superficie a la cual se adhieren las partículas hidrofóbicas.

La eficiencia de esta etapa depende del tamaño de burbuja, la tasa de aireación y la agitación, que debe ser suficiente para mantener las partículas en suspensión sin romper las burbujas. Una buena aireación mejora la cinética de flotación y la recuperación metalúrgica.

2.1.1.2.4 Formación y recolección de la espuma. Las partículas minerales hidrofóbicas que se han adherido a las burbujas ascienden hasta la superficie, formando una espuma mineralizada. Esta espuma, que contiene el concentrado, debe ser estable el tiempo suficiente para su recolección, pero no tan persistente como para dificultar su remoción.

La recolección de la espuma se realiza mecánicamente mediante paletas o por desborde continuo. La calidad de esta espuma (en términos de ley y recuperación) puede ser modificada mediante ajustes en la dosificación de espumante, velocidad de rasquetas y altura de la columna de pulpa.

En muchas plantas, el proceso incluye etapas de limpieza o recleaner, donde la espuma recolectada pasa por nuevas celdas de flotación para mejorar la ley del concentrado, eliminando contaminantes arrastrados en etapas previas.

2.1.1.3 Tipos de flotación. El proceso de flotación puede clasificarse en diversos tipos, dependiendo de varios criterios técnicos como el tipo de mineral tratado, el objetivo metalúrgico, la secuencia del tratamiento y la tecnología de celda utilizada. A continuación, se describen los tipos más relevantes:

2.1.1.3.1 Flotación según el tipo de mineral.

▪ **Flotación de sulfuros metálicos:**

Es la más común y se aplica a minerales como calcopirita, galena, esfalerita y pirita. Utiliza principalmente xantatos como colectores y se opera en ambientes de pH alcalino o neutro.

▪ **Flotación de óxidos y no metálicos:**

Se aplica a minerales como hematita, casiterita, fosfatos, fluorita, cuarzo o barita. Debido a su naturaleza más hidrofílica, requiere colectores más específicos (como aminas, ácidos grasos o sulfonatos) y un control más estricto del pH y activadores.

▪ **Flotación de minerales industriales y no metálicos:**

Utilizada en arenas silíceas, feldespatos, caolines, etc. En este tipo, la selectividad se logra mayormente con el uso de colectores catiónicos y depresores orgánicos.

2.1.1.3.2 Flotación según el número de etapas.

- **Flotación rougher (primaria):**

Es la etapa inicial donde se busca recuperar la mayor cantidad posible de mineral valioso con un concentrado de ley baja. Es una etapa de alta carga y alta recuperación.

- **Flotación cleaner (limpia):**

Trata el concentrado rougher con el objetivo de aumentar su ley, eliminando ganga residual. Puede incluir una o varias etapas sucesivas.

- **Flotación scavenger (recolector):**

Trata los relaves del rougher para recuperar minerales que no flotaron inicialmente. Suele generar un concentrado que se retorna al circuito principal.

- **Flotación recleaner (limpieza fina):**

Se aplica al concentrado del cleaner para obtener un producto de alta pureza. Es especialmente importante en minerales complejos o polimetálicos.

Estas etapas se combinan estratégicamente según la mineralogía del yacimiento y los objetivos económicos, metalúrgicos y ambientales del proyecto.

2.1.1.3.3 Flotación según la tecnología empleada

- **Flotación mecánica (convencional):**

Utiliza celdas agitadas mecánicamente (impulsor y estator) para mantener la suspensión de la pulpa y dispersar aire. Son las más comunes en plantas industriales debido a su flexibilidad operativa.

- **Flotación en columnas:**

Utiliza una columna vertical sin partes móviles internas. Permite una mejor separación por contracorriente y se utiliza principalmente para etapas de limpieza por su alta selectividad y baja turbulencia. Requiere control fino de caudales y aire.

- **Flotación neumática:**

Se basa en la inyección de aire en una pulpa sin necesidad de agitadores mecánicos. Un ejemplo es la celda Jameson, que combina alta eficiencia de contacto burbuja-partícula con simplicidad de diseño.

- **Flotación flash:**

Se realiza en una etapa temprana del circuito, directamente después de la molienda. Busca recuperar partículas gruesas y liberadas, antes de que se recubran de lamas o se contaminen.

2.1.1.3.4 Flotación diferencial y secuencial

- **Flotación diferencial:**

Separa varios minerales valiosos contenidos en un mismo mineral, como ocurre con la separación secuencial de plomo y zinc, o cobre y molibdeno.

- **Flotación colectiva:**

Flotan juntos varios minerales valiosos para luego ser separados en etapas posteriores.

- **Flotación inversa:**

En lugar de recuperar el mineral valioso, se flota la ganga y se deja el mineral útil en el fondo. Es común en el tratamiento de hierro (por ejemplo, hematita) donde se elimina sílice.

2.1.1.4 Factores que afectan la flotación. El proceso de flotación es altamente sensible a una serie de factores que determinan la recuperación, selectividad y calidad del concentrado. Estos factores pueden agruparse en tres categorías principales: factores físicos, químicos y operacionales. Una comprensión integral de estas variables permite optimizar el rendimiento del circuito y minimizar pérdidas metalúrgicas.

2.1.1.4.1 Factores físicos

- **Tamaño de partícula:**

La flotación es más eficiente dentro de un rango de tamaños óptimos, generalmente entre 20 μm y 150 μm . Las partículas demasiado gruesas tienden a desprenderse

de las burbujas por su peso, mientras que las partículas muy finas (menores a 10 μm) presentan una flotación pobre por su baja energía cinética y alta tendencia a formar lamas, afectando la selectividad.

- **Forma y densidad de las partículas:**

Las partículas más angulosas tienen menos capacidad de adherencia a las burbujas, y las de mayor densidad pueden requerir mayor energía de agitación o colectores más efectivos.

- **Grado de liberación:**

Una adecuada liberación mineralógica es crítica. Las partículas que contienen mezcla de mineral valioso y ganga flotan ineficientemente o arrastran impurezas, reduciendo la ley del concentrado.

2.1.1.5.2 Factores químicos

- **pH de la pulpa:**

Influye directamente en la carga superficial de las partículas y en la ionización de los reactivos. Cada sistema mineralógico tiene un rango de pH óptimo; por ejemplo, la flotación de sulfuros de cobre generalmente se optimiza en pH 9–11, mientras que el zinc necesita pH más alto (~11–12). El control del pH se logra mediante cal, soda cáustica o ácido sulfúrico.

- **Concentración y tipo de reactivos:**

- Colectores en exceso pueden generar flotación de ganga; en déficit, reducen la recuperación.
- Espumantes afectan la estabilidad y textura de la espuma.
- Modificadores permiten o inhiben flotación selectiva; su dosificación y secuencia de adición son clave.

- **Contaminación iónica del agua:** La presencia de iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} puede interferir con la acción de los reactivos y modificar las condiciones

superficiales de los minerales. Esto es especialmente crítico en plantas que reutilizan agua o emplean agua de origen industrial.

2.1.1.5.3 Factores operacionales

- **Tiempo de residencia:**

Afecta directamente la recuperación; un tiempo muy corto no permite el contacto suficiente burbuja-partícula, mientras que uno muy largo puede reducir la ley del concentrado por arrastre de ganga.

- **Velocidad de agitación:**

Debe ser suficiente para mantener la suspensión de partículas sin generar excesiva turbulencia que rompa burbujas o despegue partículas adheridas. También influye en la dispersión del aire y en la eficiencia de la mezcla reactivo-mineral.

- **Tasa de aireación:**

Una aireación insuficiente reduce la formación de burbujas y su superficie de contacto, mientras que un exceso puede generar burbujas grandes y turbulencia excesiva, afectando la flotabilidad.

- **Altura de espuma y control de nivel:**

Afecta la estabilidad y recuperación del concentrado. Una columna de espuma muy alta puede arrastrar partículas de ganga; una espuma inestable, en cambio, puede perder mineral valioso.

- **Secuencia de flotación y diseño del circuito:**

La configuración de rougher, cleaner y scavenger, así como la recirculación de relaves y concentrados intermedios, impacta directamente en la recuperación global y la calidad del producto.

2.1.1.6 Importancia y aplicación industrial. La flotación es el método de concentración más utilizado en la minería metálica, especialmente en la recuperación de cobre, plomo, zinc, molibdeno y oro. Su capacidad para tratar minerales complejos y obtener concentrados de alta ley lo convierte en una tecnología fundamental para la industria minera moderna. Su uso intensivo en plantas concentradoras de todo el mundo

ha permitido mejorar la eficiencia económica de operaciones de mediana y gran escala (Wills & Finch, 2016).

2.1.2 Relaves mineros

Los relaves mineros son los residuos sólidos y líquidos que resultan del procesamiento y concentración de minerales en las plantas de beneficio de las operaciones mineras. Cuando el mineral extraído de la mina es triturado y molido para liberar los minerales valiosos, se realiza un proceso de concentración (como la flotación, gravedad, o separación magnética) para separar dichos minerales útiles de la ganga o material estéril.

El material que no contiene suficiente valor económico y que es descartado se denomina relave. Estos relaves están compuestos principalmente por partículas finas de roca triturada, mezcladas con agua y residuos de los reactivos químicos usados durante el proceso de concentración, como colectores, espumantes, y floculantes.

Por lo general, los relaves tienen un alto contenido de agua —puede ser entre un 50% y hasta un 90% en volumen— y varían en granulometría desde finos hasta medios, lo que hace que su manejo y disposición requiera técnicas específicas para garantizar la seguridad, estabilidad y minimizar los impactos ambientales.

2.1.2.1 Composición. La composición de los relaves mineros es compleja y depende directamente del tipo de mineral procesado, el método de concentración aplicado y los reactivos químicos utilizados durante el proceso. Sus principales componentes son:

2.1.2.1.1 Sólidos finos. Estos constituyen la mayor parte de los relaves en peso y volumen. Están compuestos por partículas minerales provenientes de la molienda y trituración del mineral original que no contienen suficiente valor económico para ser recuperados. La granulometría de estas partículas puede variar considerablemente, pero típicamente están en el rango de partículas finas o ultrafinas, con tamaños que van desde micrómetros hasta decenas de micrómetros. La finura afecta directamente la estabilidad y la permeabilidad de los depósitos de relaves.

2.1.2.1.2 Agua. El agua es un componente esencial y voluminoso de los relaves, con un porcentaje que suele oscilar entre el 50% y el 90%, dependiendo del tipo de relave

(húmedo, espesado o seco). Esta agua puede contener sales disueltas, reactivos residuales y otros contaminantes que influyen en el comportamiento químico y ambiental del relave. La presencia de agua facilita el transporte de los relaves en suspensión, pero también implica riesgos de infiltración y contaminación de acuíferos si no se maneja adecuadamente.

2.1.2.1.3 Reactivos químicos residuales. Durante el procesamiento mineralúrgico se emplean diferentes reactivos para mejorar la separación y concentración de minerales valiosos. Entre estos se encuentran colectores (como xantatos), espumantes, depresores y floculantes. Tras el proceso, una parte de estos reactivos queda adsorbida en las partículas del relave o en la fase líquida, lo que puede representar un riesgo ambiental, ya que algunos de estos químicos pueden ser tóxicos o persistentes en el medio ambiente.

2.1.2.1.4 Metales residuales y otros compuestos químicos. Aunque los relaves no contienen una concentración económicamente viable de metales, sí pueden incluir metales pesados residuales (como arsénico, cadmio, mercurio, plomo, zinc, cobre, etc.) en forma de minerales no recuperados o contaminantes, así como otros compuestos químicos presentes en la ganga mineralógica o generados por procesos químicos posteriores (como la oxidación de sulfuros). Estos metales y compuestos pueden representar un potencial contaminante para el agua y suelo circundantes.

Importancia de la composición

- El conocimiento detallado de la composición de los relaves es fundamental para:
- Diseñar sistemas seguros de almacenamiento y disposición.
- Evaluar riesgos ambientales y desarrollar planes de mitigación.
- Implementar tecnologías de recuperación secundaria o valorización.
- Prevenir impactos como el drenaje ácido de mina (DAM) o la contaminación por metales pesados.

2.1.2.2 Clasificación y características. Los relaves mineros pueden clasificarse y caracterizarse según diferentes criterios que permiten determinar su comportamiento físico, químico y ambiental, lo cual es esencial para su manejo adecuado y seguro.

2.1.2.2.1 Clasificación según granulometría. La granulometría de los relaves se refiere al tamaño de las partículas que los componen, y es uno de los aspectos más importantes debido a su influencia en la estabilidad del depósito y en el manejo del agua. Se pueden distinguir tres categorías principales:

- **Relaves finos:**

Partículas menores a 75 micrómetros, que suelen ser los más difíciles de manejar por su alta capacidad de suspensión y riesgo de contaminación por polvo.

- **Relaves medios:**

Partículas entre 75 y 150 micrómetros, que presentan una mejor sedimentación pero aún requieren técnicas específicas para su almacenamiento.

- **Relaves gruesos:**

Partículas mayores a 150 micrómetros, con buena capacidad de drenaje y menor riesgo de contaminación, aunque pueden ser más difíciles de transportar por su peso.

2.1.2.2.2 Clasificación según composición química. La composición química de los relaves influye en su potencial impacto ambiental, especialmente en relación con la generación de drenaje ácido de mina (DAM) o la liberación de metales pesados:

- **Relaves ácidos:**

Aquellos que contienen minerales sulfurados susceptibles a oxidación, generando aguas ácidas con alta concentración de metales.

- **Relaves neutros o básicos:**

Compuestos mayormente por minerales carbonatados o silíceos que no presentan riesgo significativo de acidificación.

2.1.2.2.3 Clasificación según tipo de disposición. La disposición de los relaves puede ser clasificada en función del estado físico y contenido de agua, lo que afecta la estabilidad del depósito y la recuperación de agua:

- **Relaves húmedos:**

Deposición en forma de suspensión líquida, con alta cantidad de agua, que requiere presas de contención.

- **Relaves espesados:**

Relaves con reducción significativa del contenido de agua mediante espesadores, mejorando la estabilidad.

- **Relaves paste:**

Relaves con contenido de agua reducido al punto de formar una masa pastosa, facilitando el manejo y la estabilidad.

- **Relaves secos:**

Relaves deshidratados, que pueden ser manejados como sólidos secos, reduciendo riesgos ambientales y costos.

2.1.2.2.4 Características adicionales.

- **Densidad y permeabilidad:**

Dependen de la granulometría y contenido de agua, afectando la estabilidad mecánica y el drenaje.

- **Contenido químico residual:**

Influye en las medidas de control ambiental y tratamientos necesarios.

- **Comportamiento geotécnico:**

Fundamental para el diseño de presas y depósitos.

2.1.2.3 Manejo y disposición. El manejo y disposición de los relaves mineros es una etapa crítica dentro de la operación minera, debido a la gran cantidad de material residual generado y al potencial impacto ambiental que pueden ocasionar si no se controlan adecuadamente. Existen diversas técnicas y métodos que buscan garantizar la seguridad, estabilidad y minimizar riesgos ambientales.

2.1.2.3.1 Presas de relaves. Las presas de relaves son estructuras diseñadas para almacenar relaves en forma líquida o pastosa. Su diseño debe considerar factores geotécnicos, hidrológicos y sísmicos para evitar fallas catastróficas. Las presas pueden clasificarse según el método de construcción:

- **Presas por avance ascendente:**

Donde la presa se eleva progresivamente con materiales propios del relave o del entorno.

- **Presas por contrafuerte o Downstream:**

Construidas en dirección descendente, con mayor estabilidad.

- **Presas por contrafuerte o Upstream:**

Construidas en dirección ascendente, con menor costo pero mayor riesgo.

La operación segura de estas presas requiere monitoreo constante, mantenimiento y planes de contingencia ante emergencias (Lottermoser, 2010).

2.1.2.3.2 Disposición en tajo abierto. En algunos casos, especialmente cuando se manejan relaves secos o semi-secos, es posible disponer los residuos directamente en el tajo minero. Esta técnica puede reducir la necesidad de presas, disminuir la huella ambiental y facilitar la rehabilitación del área (Castillón & Pérez-López, 2018).

2.1.2.3.3 Relaves espesados y paste. El espesamiento de relaves reduce el contenido de agua, formando una masa más densa y estable, conocida como "paste" o pasta. Esto mejora la estabilidad de los depósitos, facilita la recuperación de agua para su reutilización y disminuye el riesgo de filtraciones o rupturas. Esta tecnología es cada vez más adoptada por la industria minera como medida de mitigación ambiental (Bussièrè & Adams, 2013).

2.1.2.3.4 Disposición submarina. La disposición submarina se refiere al vertido de relaves en cuerpos de agua profunda, con el objetivo de reducir impactos superficiales. Esta práctica es muy controvertida y está regulada estrictamente, dado que puede afectar ecosistemas acuáticos y la calidad del agua (Van Zyl, 2014).

2.1.2.3.5 Otras técnicas y tendencias. Se están desarrollando nuevas técnicas para minimizar la generación de relaves, como el procesamiento en seco, la valorización de residuos y el reciclaje de materiales. Además, la implementación de sistemas de monitoreo avanzados permite una mejor gestión y respuesta ante riesgos (Lottermoser, 2010).

2.1.2.4 Impacto ambiental. Los relaves mineros representan uno de los mayores desafíos ambientales en la industria minera debido a su volumen, composición química y la complejidad de su manejo. Cuando no se controlan adecuadamente, pueden causar efectos adversos significativos en los ecosistemas y en la salud humana.

2.1.2.4.1 Contaminación del agua y suelo. Los relaves contienen metales pesados y sustancias químicas residuales que pueden lixiviarse y contaminar aguas superficiales y subterráneas. En particular, la presencia de sulfuros en los relaves puede generar el fenómeno conocido como drenaje ácido de mina (DAM), donde la oxidación de minerales sulfuroso produce aguas ácidas que movilizan metales tóxicos (Lottermoser, 2010; Jambor & Blowes, 1998). Esta contaminación puede afectar la calidad del agua potable, la biodiversidad acuática y la agricultura en zonas cercanas.

2.1.2.4.2 Emisión de polvo. En condiciones secas o cuando los relaves se encuentran expuestos sin cubiertas vegetales o barreras, las partículas finas pueden ser dispersadas por el viento, generando contaminación atmosférica y riesgos para la salud respiratoria de las comunidades aledañas (Castillón & Pérez-López, 2018).

2.1.2.4.3 Riesgos geotécnicos y sociales. Las fallas o rupturas de presas de relaves pueden tener consecuencias catastróficas, causando pérdidas humanas, daños a la infraestructura y contaminación ambiental masiva. Estos eventos, como el caso de la represa de Brumadinho en Brasil (2019), evidencian la necesidad de un manejo riguroso, monitoreo continuo y planes de emergencia (Bussière & Adams, 2013).

2.1.2.4.4 Impacto en la biodiversidad y ecosistemas. Los cambios en la calidad del agua y suelo, junto con la alteración del paisaje, pueden afectar la flora y fauna local,

alterando los ecosistemas naturales y la capacidad de recuperación de las áreas afectadas (Van Zyl, 2014).

2.1.2.4.5 Medidas de mitigación. Para minimizar los impactos, se implementan diversas estrategias como el diseño seguro de presas, tratamiento de aguas contaminadas, revegetación, monitoreo ambiental y desarrollo de tecnologías para la reducción y valorización de relaves (Lottermoser, 2010).

2.1.3 Recirculación de agua en minería

Debido a la creciente escasez de recursos hídricos y las presiones ambientales, la industria minera ha adoptado la recirculación de agua como una estrategia crucial para minimizar el consumo de agua fresca y reducir los impactos ambientales asociados. La recirculación de agua se define como el proceso mediante el cual el agua usada en los procesos mineros es capturada, tratada y reutilizada en el circuito productivo, con el objetivo de optimizar el uso del recurso hídrico y cumplir con normativas ambientales (Akcil, 2006; Flores, 2019).

Esta práctica permite reducir significativamente la demanda de agua fresca, disminuir la generación de efluentes contaminantes y mejorar la sostenibilidad operativa de las minas, especialmente en zonas áridas o con restricciones hídricas. Además, la implementación de sistemas de recirculación requiere una adecuada infraestructura de tratamiento y monitoreo para garantizar que la calidad del agua reutilizada sea compatible con los procesos y no afecte la eficiencia ni la seguridad ambiental (Gómez, 2020).

Figura 2

Tratamiento de aguas en minería



Fuente: Google

2.1.3.1 Importancia y beneficios. La recirculación de agua en la minería representa una estrategia fundamental para la gestión sostenible del recurso hídrico, aportando múltiples beneficios tanto ambientales como económicos. Entre las principales ventajas se encuentran (Akcil, 2006; Flores, 2019; Quispe, 2021):

- **Reducción del consumo de agua fresca:**

La reutilización del agua disminuye la demanda de captación o compra de agua nueva, lo cual es crítico en regiones con escasez hídrica o restricciones legales.

- **Disminución de la contaminación ambiental:**

Al evitar descargas directas de aguas residuales, se minimiza la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

- **Optimización económica:**

La reducción en la compra y tratamiento de agua fresca se traduce en menores costos operativos y de tratamiento.

- **Mejora en la gestión ambiental:**

Facilita el cumplimiento de normativas ambientales y contribuye a la sostenibilidad de las operaciones mineras.

- **Conservación de recursos naturales:**

Promueve el uso eficiente y responsable del agua, un recurso limitado y vital para diversas actividades humanas.

- **Reducción de riesgos operacionales:**

La gestión controlada del agua mejora la estabilidad de procesos y disminuye riesgos asociados a la gestión de efluentes.

2.1.3.2 Componentes de un sistema de recirculación de agua. Un sistema eficiente de recirculación de agua en minería está compuesto por varios elementos clave que permiten la captación, tratamiento y reutilización del agua en los procesos productivos. Estos componentes aseguran la continuidad operativa y la calidad del agua reutilizada, minimizando impactos ambientales (Flores, 2019; Pérez, 2018; Quispe, 2021):

- **Recolección y almacenamiento:**

Incluye tanques, estanques, presas o reservorios diseñados para captar y almacenar el agua proveniente de los procesos mineros, drenajes y aguas residuales.

- **Tratamiento del agua:**

Procesos físicos, químicos y biológicos que permiten eliminar sólidos suspendidos, contaminantes disueltos y ajustar las características fisicoquímicas del agua para cumplir con los requerimientos de reutilización.

- **Sistemas de distribución:**

Redes de tuberías, bombas y válvulas que facilitan el transporte y suministro del agua tratada a los diferentes puntos del proceso minero donde será reutilizada.

- **Monitoreo y control:**

Equipos y sistemas para la medición continua de la calidad del agua y el estado operativo del circuito, permitiendo la detección temprana de fallas o desviaciones.

- **Mantenimiento y gestión operativa:**

Protocolos y actividades destinadas a asegurar el correcto funcionamiento y la eficiencia del sistema de recirculación a lo largo del tiempo.

2.1.3.3 Tecnologías utilizadas para la recirculación de agua. La eficiencia de los sistemas de recirculación de agua en minería depende en gran medida de las tecnologías empleadas para el tratamiento y purificación del agua usada, con el fin de garantizar su calidad y adecuación para la reutilización en los procesos productivos. Entre las tecnologías más comunes se encuentran (Flores, 2019; Pérez, 2018; Akcil, 2006):

- **Sistemas de sedimentación y espesamiento:**

Permiten la separación y concentración de sólidos suspendidos, reduciendo la turbidez y facilitando la clarificación del agua.

- **Filtración y separación sólido-líquido:**

Incluye el uso de filtros prensa, centrífugas y ciclones para eliminar partículas finas y sólidos, mejorando la calidad del agua reciclada.

- **Tratamiento químico:**

Aplicación de reactivos para precipitación, coagulación y floculación de contaminantes, metales y materia orgánica presente en el agua.

- **Tratamiento biológico:**

Utilización de procesos biológicos para degradar materia orgánica y contaminantes específicos, en sistemas como lagunas aireadas o biorreactores.

- **Tecnologías avanzadas de purificación:**

Desalinización mediante ósmosis inversa, nanofiltración y otras técnicas de membranas para obtener agua de alta pureza cuando se requiere.

- **Sistemas de monitoreo y control automatizado:**

Para optimizar el funcionamiento de los procesos de tratamiento, garantizar la calidad del agua y responder rápidamente ante variaciones.

2.1.4 Tratamiento físico-químico de aguas

El tratamiento físico-químico de aguas es un conjunto de procesos esenciales en la gestión de efluentes industriales y mineros, especialmente en situaciones donde las aguas residuales contienen altas concentraciones de sólidos suspendidos, metales pesados, compuestos inorgánicos, aceites o materiales no biodegradables. A diferencia

del tratamiento biológico, que se basa en microorganismos para descomponer materia orgánica, el tratamiento físico-químico emplea mecanismos físicos y reacciones químicas para remover contaminantes y acondicionar el agua para su reutilización o disposición final segura (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2003).

Estos tratamientos resultan especialmente útiles en sectores como la minería, donde los efluentes suelen presentar características que dificultan o imposibilitan el uso de tratamientos convencionales, como pH extremos, elevada conductividad eléctrica, presencia de cianuros, arsénico u otros metales pesados. Por ello, el tratamiento físico-químico se configura como una solución efectiva y adaptable, que permite cumplir con los estándares ambientales establecidos, mejorar la eficiencia de los procesos y reducir el impacto ambiental de las actividades productivas (EPA, 1999; Sosa et al., 2021).

2.1.4.1 Objetivos del tratamiento físico-químico de aguas. El tratamiento físico-químico de aguas tiene como propósito principal acondicionar el agua residual para su reutilización o descarga segura al medio ambiente, mediante la remoción o transformación de contaminantes específicos. Este tipo de tratamiento es crucial en industrias como la minería, donde el agua puede contener elevadas cargas de sólidos, metales pesados o sustancias químicas tóxicas (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2003). A continuación, se describen los objetivos principales:

- **Remoción de sólidos suspendidos y sedimentos:**

Utilizando procesos como la sedimentación, la flotación y la filtración para clarificar el agua.

- **Eliminación de contaminantes inorgánicos y orgánicos no biodegradables:**

A través de técnicas como la coagulación-floculación, la oxidación química o la precipitación.

- **Neutralización del pH:**

Para ajustar el nivel de acidez o alcalinidad del agua y prevenir daños en equipos o efectos ambientales adversos.

- **Reducción de la toxicidad del agua:**

Mediante la eliminación de metales pesados como arsénico, plomo, zinc o cadmio, comunes en efluentes mineros.

- **Mejora de la calidad del agua para su reutilización:**

Ya sea en el mismo proceso industrial, en operaciones auxiliares o para cumplir con normativas de descarga.

- **Cumplimiento de la normativa ambiental vigente:**

Al permitir que el efluente tratado cumpla con los límites legales de vertimiento establecidos por las autoridades (EPA, 1999).

2.1.4.2 Principales procesos del tratamiento físico-químico de aguas. El tratamiento físico-químico de aguas combina mecanismos físicos con reacciones químicas para remover contaminantes presentes en aguas residuales. Estos procesos están diseñados para tratar eficazmente aguas con altos niveles de sólidos, metales pesados, materia orgánica no biodegradable y compuestos tóxicos, como suele ocurrir en actividades industriales y mineras (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2003). A continuación se detallan los procesos más relevantes:

2.1.4.2.1 Procesos físicos.

- **Sedimentación:**

Proceso mediante el cual las partículas sólidas suspendidas en el agua se depositan por acción de la gravedad. Es una técnica básica pero fundamental en el tratamiento primario de efluentes (Tchobanoglous et al., 2003).

- **Filtración:**

Se utiliza para remover partículas finas y sólidos que no fueron eliminados durante la sedimentación. Los filtros pueden ser de arena, grava, carbón activado u otros medios (Metcalf & Eddy, 2014).

- **Flotación:**

Técnica que separa materiales livianos mediante la introducción de burbujas de aire. Las partículas se adhieren a las burbujas y flotan a la superficie, donde son retiradas mecánicamente (EPA, 1999).

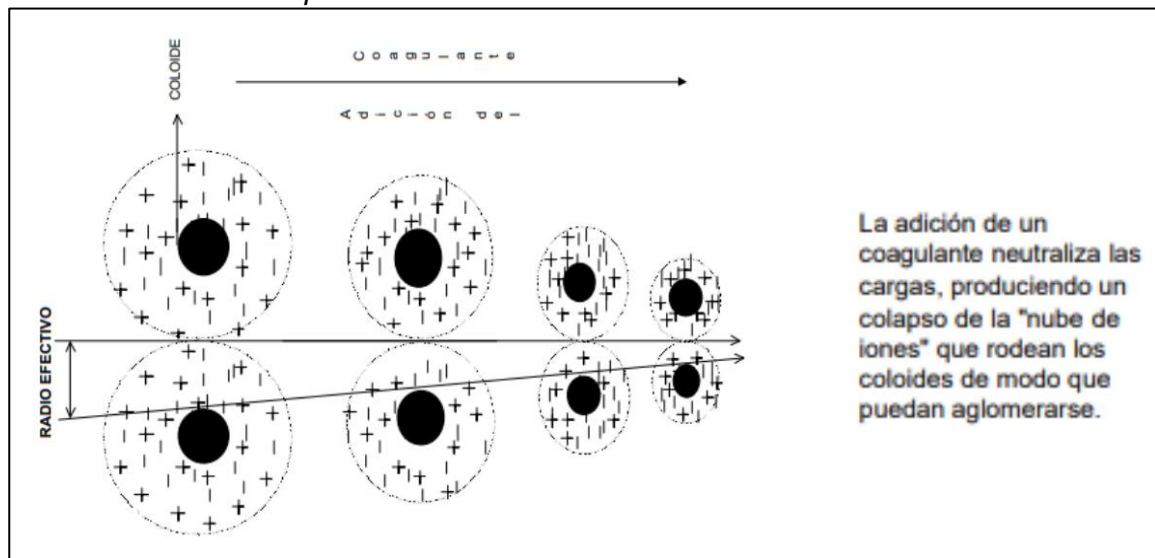
2.1.4.2.2 Procesos químicos.

- **Coagulación y floculación:**

Consiste en la adición de sustancias químicas (como sulfato de aluminio o cloruro férrico) para desestabilizar partículas coloidales y formar flóculos más grandes que sedimentan fácilmente (Tchobanoglous et al., 2003).

Figura 3

Formación de coloides por uso de floculantes



Fuente: Tchobanoglous et al., 2003

- **Neutralización:**

Implica el ajuste del pH del agua mediante la adición de ácidos o bases, como ácido sulfúrico o hidróxido de calcio, para alcanzar niveles neutros y seguros para el proceso o el medio ambiente (Metcalf & Eddy, 2014).

- **Precipitación química:**

Reacción en la que los contaminantes solubles, especialmente metales pesados, se transforman en compuestos insolubles (como hidróxidos metálicos) que se eliminan mediante sedimentación (EPA, 1999).

- **Oxidación-reducción (Redox):**

Se emplean agentes oxidantes (como cloro, permanganato de potasio o peróxido de hidrógeno) para transformar compuestos tóxicos o difíciles de eliminar en formas menos dañinas o fácilmente separables (Sosa et al., 2021).

2.1.4.3 Ventajas y limitaciones. El tratamiento físico-químico de aguas presenta una serie de ventajas que lo hacen especialmente útil para industrias que generan efluentes con alta carga de contaminantes no biodegradables, como la minería, la metalurgia y algunas manufacturas. No obstante, también existen limitaciones técnicas, económicas y ambientales que deben ser consideradas al diseñar e implementar estos sistemas. A continuación se describen las principales ventajas y desventajas del tratamiento físico-químico (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2003; EPA, 1999):

2.1.4.3.1 Ventajas.

- **Alta eficiencia en la remoción de contaminantes específicos:**

El tratamiento físico-químico es muy efectivo para eliminar metales pesados, sólidos en suspensión, aceites y grasas, así como compuestos que no pueden ser tratados biológicamente (Sosa et al., 2021).

- **Rapidez en el tratamiento:**

A diferencia de los procesos biológicos que requieren tiempos prolongados de retención, los procesos físico-químicos son generalmente más rápidos en alcanzar resultados significativos.

- **Flexibilidad del sistema:**

Estos tratamientos pueden adaptarse a variaciones en la calidad del agua, caudal y tipo de contaminante, lo que los hace viables en entornos industriales de operación variable.

- **Posibilidad de integración con otros métodos:**

Pueden ser utilizados como pretratamiento o tratamiento complementario a procesos biológicos u otros métodos avanzados.

2.1.4.3.2 Limitaciones.

- **Generación de lodos y residuos secundarios:**

La coagulación, floculación y precipitación química generan lodos con alta concentración de contaminantes que requieren tratamiento o disposición especial, incrementando los costos operativos.

- **Alto consumo de reactivos químicos:**

La necesidad de coagulantes, agentes neutralizantes u oxidantes puede incrementar significativamente los costos de operación y mantenimiento.

- **Requiere control constante:**

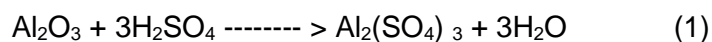
La efectividad del tratamiento depende de un monitoreo continuo de parámetros como pH, dosis química, y temperatura, lo cual exige personal capacitado y sistemas de control automatizados.

- **Impacto ambiental potencial si no se maneja adecuadamente:**

Si los subproductos del tratamiento no son bien gestionados, podrían representar riesgos para el ambiente o la salud humana.

2.1.5 Reactivos empleados en el tratamiento de aguas

2.1.5.1 Sulfato de aluminio. El sulfato de aluminio, conocido químicamente como $Al_2(SO_4)_3$, es uno de los coagulantes más utilizados en el tratamiento físico-químico de aguas residuales y potables. Su función principal es la coagulación, que consiste en la desestabilización y aglomeración de partículas coloidales y sólidos en suspensión presentes en el agua, facilitando así su sedimentación y eliminación. Cuando se adiciona al agua, el sulfato de aluminio reacciona formando hidróxidos de aluminio que actúan como agentes floculantes, atrapando las impurezas y generando flóculos más grandes y densos. Es ampliamente valorado por su alta eficiencia, bajo costo y disponibilidad, siendo efectivo en un amplio rango de pH, aunque se requiere un control adecuado para evitar variaciones significativas en el pH del agua tratada. Además, su uso puede contribuir a la eliminación de materia orgánica y fósforo, mejorando la calidad del efluente final (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2003).



2.1.5.2 Policloruro de aluminio. El policloruro de aluminio (PAC) es un coagulante inorgánico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales y potables debido a su alta eficiencia para eliminar turbidez, sólidos suspendidos, materia orgánica y algunos metales pesados. Se caracteriza por ser un polímero de aluminio con diferentes grados de polimerización y contenido de cloro, lo que le confiere una capacidad superior para la coagulación en comparación con coagulantes tradicionales como el sulfato de aluminio. El PAC actúa neutralizando las cargas negativas de las partículas coloidales en suspensión, favoreciendo su aglomeración en flóculos más grandes que sedimentan rápidamente. Además, presenta la ventaja de generar menores volúmenes de lodos y de ser efectivo en un amplio rango de pH, lo que facilita su aplicación en distintas condiciones de tratamiento. Por estas razones, el policloruro de aluminio es un reactivo muy valorado en procesos industriales y municipales para el mejoramiento de la calidad del agua (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2003).

2.1.5.3 Floquat FL 4440. Floquat FL 4440 es un floculante sintético catiónico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales e industriales para mejorar la sedimentación y clarificación de sólidos suspendidos y coloides. Se trata de un polímero orgánico diseñado para atraer y aglomerar partículas con carga negativa, facilitando la formación de flóculos más grandes y densos que pueden separarse fácilmente por sedimentación o filtración. Este tipo de floculante es especialmente eficaz en procesos donde se requiere un rápido asentamiento de sólidos y una reducción significativa de la turbidez, además de mejorar la eficiencia general de los sistemas de tratamiento físico-químico. Su uso contribuye a optimizar el consumo de reactivos y a disminuir la generación de lodos, lo que lo hace una opción favorable en la industria minera, papelera y de aguas residuales municipales (Sosa et al., 2021; Metcalf & Eddy, 2014).

2.1.5.4 Zufloc 400. Zufloc 400 es un floculante catiónico comercial utilizado principalmente en el tratamiento de aguas residuales industriales y mineras para mejorar la sedimentación y clarificación de sólidos en suspensión. Está compuesto por polímeros

orgánicos que actúan promoviendo la aglomeración de partículas finas y coloides con cargas negativas, facilitando la formación de flóculos estables y densos que pueden ser fácilmente separados del agua mediante procesos de sedimentación o filtración. Zufloc 400 es valorado por su alta eficiencia incluso en condiciones de aguas con alta carga contaminante y su capacidad para reducir significativamente la turbidez y los sólidos suspendidos, contribuyendo a mejorar la calidad del efluente tratado y a optimizar el rendimiento de los sistemas de tratamiento físico-químico (Metcalf & Eddy, 2014; Sosa et al., 2021).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Recirculación de agua

Proceso mediante el cual el agua utilizada en las operaciones mineras es tratada y reutilizada dentro del mismo sistema, con el objetivo de reducir el consumo de agua fresca, minimizar la generación de efluentes y mejorar la sostenibilidad ambiental.

2.2.2 Coagulación

Proceso químico que desestabiliza las partículas coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes, favoreciendo la formación de pequeños agregados (flóculos) que pueden ser removidos por sedimentación o filtración.

2.2.3 Floculación

Etapa posterior a la coagulación, en la que se agregan floculantes para agrupar los pequeños flóculos en partículas más grandes y pesadas, facilitando su separación del agua.

2.2.4 Coagulantes

Sustancias químicas, como sulfato de aluminio o policloruro de aluminio, que neutralizan las cargas eléctricas de las partículas suspendidas para permitir su aglomeración y posterior remoción.

2.2.5 Floculantes

Polímeros orgánicos, naturales o sintéticos, que promueven la formación de flóculos grandes y compactos, mejorando la eficiencia de sedimentación y clarificación.

2.2.6 Neutralización

Proceso químico que ajusta el pH del agua mediante la adición de ácidos o bases, para optimizar la efectividad de los procesos de tratamiento subsiguientes.

2.2.7 Precipitación química

Reacción química mediante la cual contaminantes solubles, especialmente metales pesados, se transforman en compuestos insolubles que pueden ser separados del agua.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Unidad de estudio

La planta de beneficio Gabriel se encuentra ubicada en el distrito de San Juan de Tantarache, provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima. Esta instalación minera está situada en la parte alta de la cuenca del río Mala.

En la siguiente tabla se muestra la localización geográfica en sistema de coordenadas UTM de la planta de beneficio.

Tabla 2

Área de concesión de planta de beneficio Gabriel

UTM WGS 84 Zona: 18 S			ÁREA TOTAL (Ha)	PERÍMETRO TOTAL (m)
VÉRTICE	NORTE	ESTE		
1	8682434.00	372357.00	6.83 Ha	1046.02
2	8682435.00	372615.00		
3	8682171.00	372618.00		
4	8682172.00	272356.00		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

Accesibilidad a la planta de beneficio

DESDE	HASTA	TIPO DE VÍA	DISTANCIA (KM)	TIEMPO (HORAS)
Lima	San Jerónimo de Surco	Asfaltado	76.7	2 h
San Jerónimo de Surco	Matucana	Asfaltado	16.0	15 min
Matucana	San Mateo	Asfaltado	18.0	32 min
San Mateo	Lugar denominado Rio Blanco	Asfaltado	7.7	18 min
Lugar denominado Rio Blanco	Cruce acceso interno mina Gabriel	Trocha	28.0	1 h 30 min
Cruce acceso interno mina Gabriel	U.M. Gabriel	trocha	5.0	30 min
Total			151.4	5 h 5 min

Fuente: Elaboración propia

Figura 4

Área efectiva de operación de planta de beneficio



Fuente: Planta de beneficio Gabriel

3.2 Descripción de la actividad de beneficio

En la planta se realiza concentración por flotación. Con una capacidad de 350 TM/día, se realiza el siguiente procedimiento:

Sección de recepción y almacenamiento:

El mineral calibrado menor de 12" será almacenado en una tolva de gruesos de 150 TMH, la cual alimentará al área de chancado.

El sistema de alimentación se da mediante equipo línea amarilla.

Trituración:

El material menor 12" es triturado por una chancadora primaria de quijadas de 16"x24" de 75 HP y una chancadora cónica de 4'-1/4" de 300 HP. El sistema de trituración reduce el mineral de 12" a 1/2" para luego ser depositado en las tolvas de finos de 100 TMH. El equipo que cierra el circuito es la zaranda vibratoria 5'x10' de 20 HP.

Procedimiento:

- Tolva de gruesos Cap. 150 Tn. → Grizzly vibratorio 2' x 4' → Chancadora de quijada 16" x 24" → Faja transportadora N°1 → Zaranda vibratoria 5' x 10' (El mineral chancado de diámetro de 0" < 1" (fino) se dirige a las tolvas de finos N°1 y N°2, y mineral de mayor diámetro de 1" < 2" (carga circulante) se dirige → faja transportadora N°2 → Chancadora cónica 4' x 1 1/4". → Faja transportadora N°3 → Faja transportadora N°1 – Zaranda vibratoria 5' x 10' → Tolva de finos.

Molienda:

El circuito molienda está constituido por dos molinos de bolas 6'x10' de 280 HP, los cuales son alimentados de material fino (<1/2") por sus respectivas fajas transportadoras N° 04 y N° 05 de 11 KW. Cada circuito de molienda cuenta con un hidrociclón D10 y la pulpa es empujada por su respectiva bomba de pulpa 4"x3" de 25 HP y luego el fino (overflow 60%-m200) pasa al circuito de flotación.

Procedimiento:

- Tolva de finos N°1 → Faja transportadora N°4 → Molino de bolas 6' x 10' N°1 (Mediante proceso de mezcla de agua y mineral se genera la pulpa) se dirige

→ Bomba de pulpa de 4"x 3" N°1 → Hidrociclón D10 N°1. (Proceso de clasificación donde los gruesos (underflow) retornan al molino de bolas y los finos (overflow) se dirige al circuito de frotación.

- Tolva de finos N°2 → Faja transportadora N°5 → Molino de bolas 6'x 10' N°2(Mediante proceso de mezcla de agua y mineral se genera la pulpa) se dirige → Bomba de pulpa de 4"x 3" N°2 → Hidrociclón D10 N°2. (Proceso de clasificación donde los gruesos (underflow) retornan al molino de bolas y los finos (overflow) se dirige al circuito de frotación.

Flotación:

La pulpa de molienda alimenta a la celda unitaria dúplex 38"x38" de 45 HP, luego pasa a las 4 celdas serranas 7'x8' de 30 HP, de ahí al banco de 04 celdas 42"x42", el producto obtenido es concentrado de plata.

Procedimiento:

- La pulpa fina (60% - malla 200), pasa al proceso de concentración → Ver diagrama de flujo. (Donde se aprecia que el concentrado final lo genera la celda unitaria dúplex 38" x 38" y la celda serrana 7'x8' N°1).

Filtrado y/o secado:

El concentrado pasa al holding tank donde se acumula y espesa, luego con la bomba de pulpa 3"x2" de 25 HP es bombeado al filtro prensa. El concentrado queda con una humedad de 12%.

Procedimiento:

- Filtro prensa de 50 placas de 80cm. x 80cm. (Secado de concentrado con una humedad hasta el 12% a 14%).
- Holding tank 4'x10' (Homogeniza el concentrado).
- Bomba de pulpa 3"x2" (Bombea el concentrado al filtro prensa.).

Relavera:

El relave es bombeado a la relavera por una bomba de pulpa 4"x3" de 25 HP.

Se ha diseñado una relavera con el siguiente volumen: 138,437.00 m³.

3.2.1 Sistema del diseño de relaves

La infraestructura de presa de relaves se encuentra construido en una zona de roca volcánica. Proceso constructivo de depósito de relaves:

- Limpieza desbroce y eliminación de material orgánico.
- Excavación eliminación de material inadecuado.
- Mejoramiento de fundación de dique. - Excavación de zanja ancho 6.0 mt. profundidad 2.0 mt. y enrocado.
- Instalación de sistema de subdrenaje, dren colchón en base de dique de arranque espesor de capa 0.50 mt.
- Conformación de dique de arranque con material de préstamo.
- Instalación de sistema de subdrenaje de agua subterránea.
- Impermeabilización de vaso de relave HDPE 1.5 mm.

Método de disposición:

Riego por aspersión (Mitigación de polvo de relave grueso en infraestructura de dique). Evaporación de humedad.

Método de recrecimiento:

Recrecimiento aguas abajo.

Etapa I - Dique de arranque construido con material de préstamo.

Etapa II – Según diseño, dique se conformará con material de relave grueso relave grueso o pre mezclado con material de préstamo.

Configuración de los embalses:

- Sistema de sub drenaje para agua subterránea.
- El sistema de uso de agua para el proceso de minerales es circuito cerrado. (recirculación de agua 100%).
- Sistema de riego por aspersión (Mitigación de polvo de relave grueso).

Método de descarga de relaves:

Sistema de bombeo → Sistema de clasificación de relave con hidrociclón D10, en plataforma de clasificación de relave

Forma de distribución :

El relave grueso por encima de malla N°200 (60%), se utiliza para conformación de dique etapa II, relave fino por debajo de malla N°200 (40%), se realiza la disposición al vaso.

- Área del depósito : 12200 m²
- Ancho de cresta de la presa : 6m
- Longitud de cresta de la presa : 100 m
- Cota de nivel de almacenamiento : 4742 m.s.n.m.
- Cota nivel del suelo : 4730 m.s.n.m.
- Altura máxima a almacenar : 12 m
- Talud aguas arriba : 1.0 DH: 1.0 DV.
- Talud aguas abajo : 1.5 DH: 1.0 DV.
- Capacidad de almacenamiento : 138437.00 m³.
- Borde libre : 1.00 m
- Espesor de la geomembrana : Geomembrana HDPE 1.5 mm.

Tabla 4

Ubicación de componentes principales

ÍTEM	COMPONENTES	Coordenadas UTM WGS84 Zona 18		CANTIDAD		
		Norte	Este			
1	Cancha de mineral (planta)	8682246.95	372528.96	1		
2	Tolva de gruesos (planta)	8682277.02	372524.91	1		
3	Área de chancado (planta)	8682289.57	372533.96	1		
4	Área de tolva de finos (planta)	8682298.79	372520.26	1		
5	Área de molienda (planta)	8682311.36	372518.83	1		
6	Cochas (planta)	8682318.98	372494.15	1		
7	Área de concentración gravimétrica (planta)	8682309.33	372503.62	1		
8	Área de celdas de flotación (planta)	8682309.66	372485.96	1		
9	Almacén de concentrado (planta)	8682326.19	372491.97	1		
10	Área de filtrado (planta)	8682320.00	372493.00	1		
11	Relavera	Vértices	01	8682345.04	372551.92	1
			02	8682371.84	372484.05	
			03	8682395.76	372474.50	
			04	8682422.95	372488.26	
			05	8682458.16	372505.52	
			06	8682457.29	372578.18	
			07	8682447.67	372591.44	
			08	8682380.60	372605.68	
			09	8682374.31	372601.65	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5*Ubicación de componentes auxiliares*

ÍTEM	COMPONENTES	COORDENADAS UTM WGS84 Zona 18 Sur		CANTIDAD
		NORTE	ESTE	
		12	Tanque cisterna de agua - consumo uso doméstico	
13	Área de preparación de reactivos	8682287.26	372513.29	1
14	Laboratorio metalúrgico y análisis químico (planta)	8682306.62	372560.51	1
15	Almacén de cal (planta)	8682290.82	372466.44	1
16	Área almacén de reactivos (planta)	8682304.79	372456.58	1
17	Almacén de paso de combustible	8682314.00	372565.00	1
18	Taller de maestranza (planta)	8682316.00	372476.00	1
19	Cuarto de control	8682315.26	372538.06	1
20	Casa fuerza	8682330.52	372583.16	1

Fuente: Elaboración propia

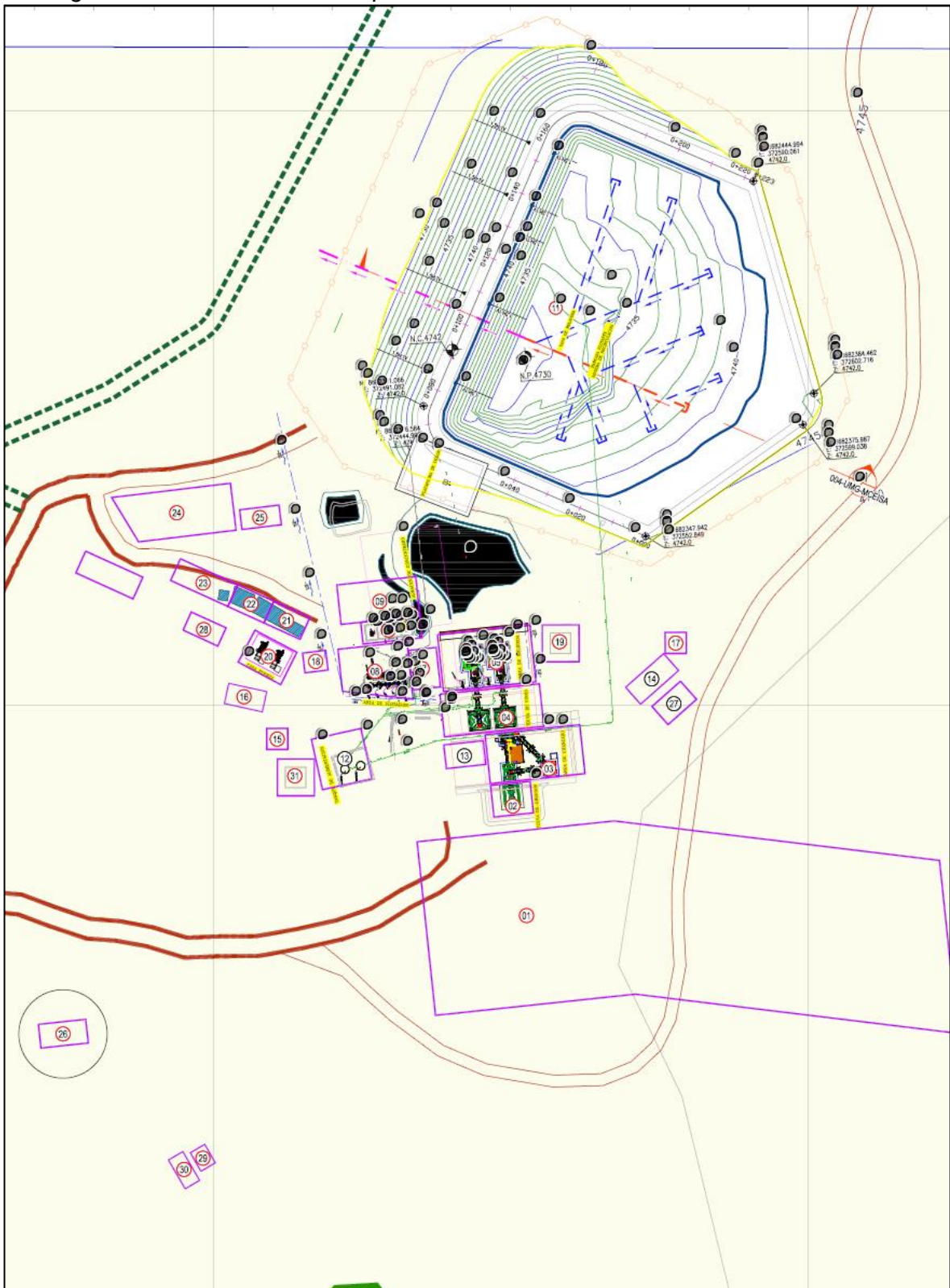
Tabla 6*Ubicación de componentes auxiliares – proyectados*

ÍTEM	COMPONENTES	COORDENADAS UTM WGS84 Zona 18 Sur		CANTIDAD
		NORTE	ESTE	
		21	Vestuario de obreros y supervisores (planta)	
22	Comedor de obreros y supervisores (planta)	8682325.50	372459.50	1
23	Oficinas (planta)	8682330.85	372447.41	1
24	Depósito temporal de residuos	8682348.53	372440.76	1
25	Campamento	8682347.34	372461.73	1
26	Cancha de volatilización (planta)	8682216.73	372411.85	1
27	Almacén de insumos fiscalizados (planta)	8682300.38	372564.34	1
28	Área de mantenimiento de equipos	8682328.00	372445.00	1
29	Pozo séptico	8682187.75	372445.81	1
30	Poza de sedimentación	8682185.00	372443.00	1
31	Reservorio N° 1	8682273.00	372472.00	1

Fuente: Elaboración propia

Figura 5

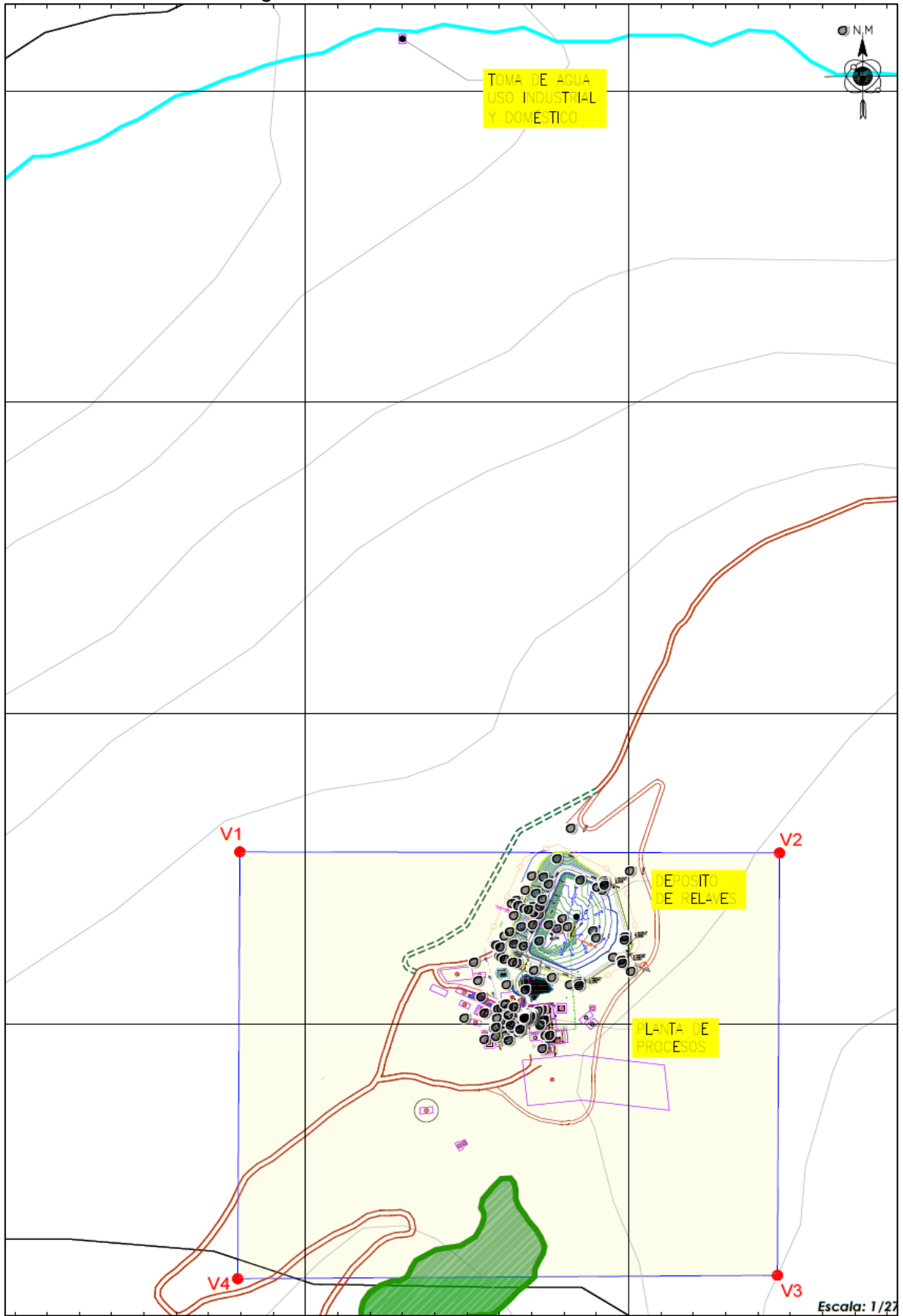
Plano general de ubicación de componentes



Fuente: Planta de beneficio Gabriel

Figura 6

Ubicación de la toma de agua fresca



Fuente: Planta de beneficio Gabriel

3.2.2 Relación de equipos

Tabla 7

Equipos del área de chancado

EQUIPO	FUNCIÓN
Tolva de gruesos 150 TMH	Alojamiento de mineral grueso
Grizzly vibratorio	Alimenta a la chancadora primaria.
Chancadora	Reducción del mineral de 12" a 2"
Faja transportadora de 24" N° 01	Alimenta a la zaranda vibratoria.
Zaranda vibratoria 5'x10'	Clasifica el producto a $\frac{1}{2}$". Alimenta a Molienda.
Faja transportadora de 24" N° 02	Alimenta a la chancadora cónica.
Chancadora cónica 4'-1/4"	Reducción del mineral de 2" a $\frac{1}{2}$ "
Faja transportadora de 24" N° 03	Alimenta a la Faja transportadora de 24" N° 01
Tolva de finos de 100 TMH	Finos para molienda

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Equipos del área de molienda

EQUIPO	FUNCIÓN
Tolva de finos de 100 TMH N° 01	Alojamiento de mineral fino.
Tolva de finos de 100 TMH N° 02	Alojamiento de mineral fino.
Faja transportadora de 24" N° 04	Alimenta al molino N° 01.
Faja transportadora de 24" N° 05	Alimenta al molino N° 02.
Molino de bolas 6'x10' N° 01	Muele el mineral.
Molino de bolas 6'x10' N° 02	Muele el mineral.
Bomba de pulpa 4"x3" N° 01	Bombea la pulpa al hidrociclón D10 N° 01
Bomba de pulpa 4"x3" N° 02	Bombea la pulpa al hidrociclón D10 N° 02
Hidrociclón D10 N° 01	Separación de finos a 60% -m200.
Hidrociclón D10 N° 02	Separación de finos a 60% -m200.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Equipos del área de flotación

EQUIPO	FUNCIÓN
Celda serrana 7'x8' N° 01	Obtiene concentrado de plata.
Celda serrana 7'x8' N° 02	Obtiene concentrado de plata.
Celda serrana 7'x8' N° 03	Alimenta a la celda serrana N° 02.
Celda serrana 7'x8' N° 04	Alimenta a la celda serrana N° 03.
Banco de 04 celdas 42"x42"	Alimenta a la celda serrana N° 02.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10*Equipos del área de filtrado*

EQUIPO	FUNCIÓN
Filtro Prensa de 50 placas 80x80	Seca el concentrado hasta 12% humedad.
Holding tank 4'x10'	Homogeniza el concentrado.
Bomba de pulpa 3"x2"	Bombea el concentrado al filtro prensa.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11*Equipos del área de relavera*

EQUIPO	FUNCIÓN
Bomba de pulpa 4"x3"	Bombea el relave a la relavera.

Fuente: Elaboración propia

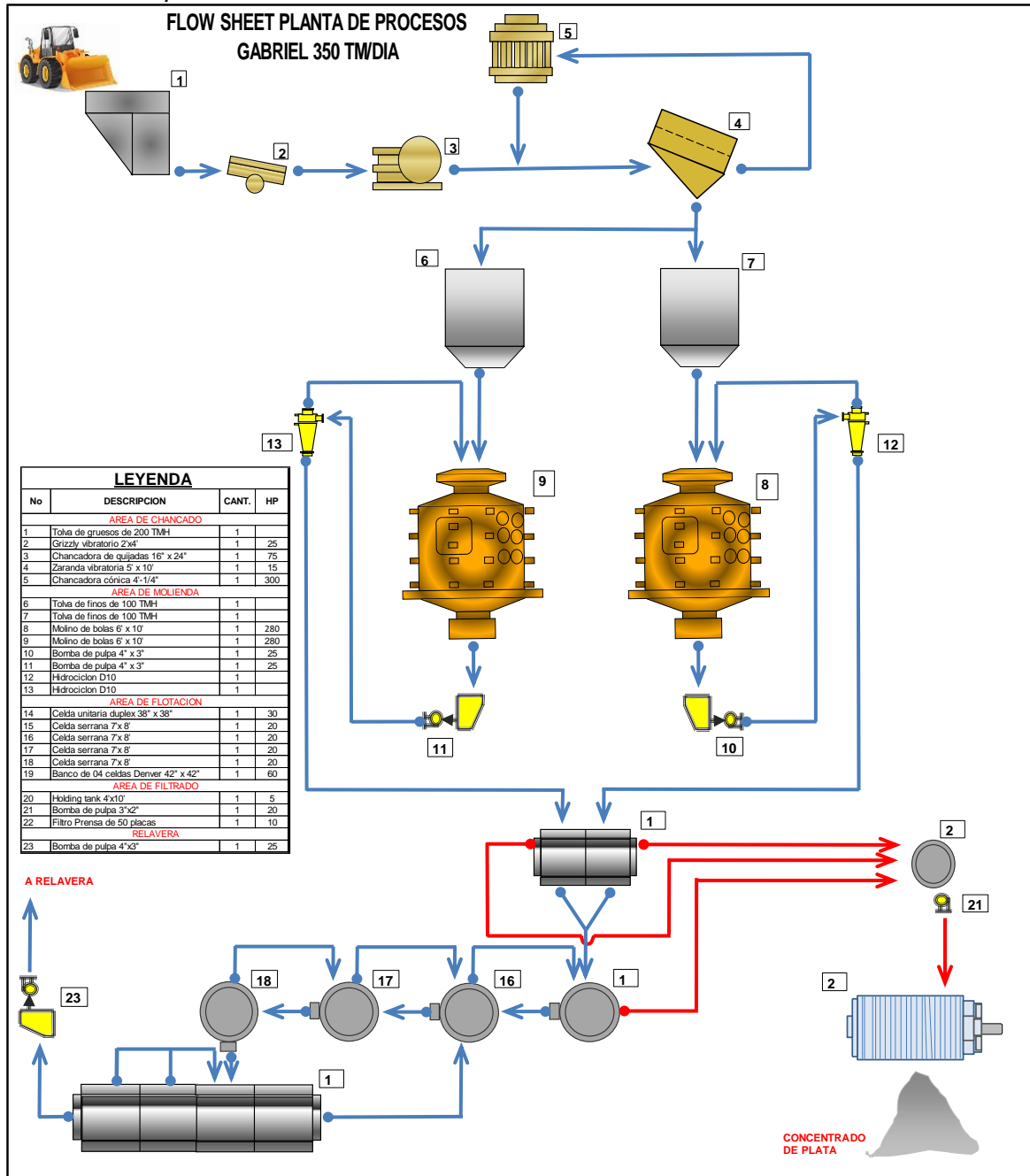
Tabla 12*Otros equipos*

EQUIPO	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	CANTIDAD
Compresor de aire	Motor Gasolinero – Honda 390. Compresor de Aire de 03 pistones. Tanque de 0.64 m de Diámetro y 1.30 m de largo. Polea de 02 fajas B69 Flexdrive	01
Grupo Electrónico	Generador de 75 Kw. - Cummins de 6 cilindros con turbo Serie 87894650 86 kW a 1500 RPM. Generador marca KAIJIELI serie 1306432334 de 1500 RPM 50 Hz 75 Kw	01
Grupo Electrónico	Generador Diesel 20 kw	01
Tablero eléctrico	Marca Rita Serie 143554. Tablero General de Arranque de 2.10 m x 0.79 m x 0.56	01
Red de cables eléctricos 220 v	Material: cobre Amperaje 220 v	250 m
Red de cables eléctricos 380 v	Material: cobre Amperaje 38 v	300 m
Bomba de Agua	Bomba de Agua de 2" de succión x 1.5" de descarga. Motor de 10 Hp	1
Bomba de Agua	Bomba de Agua de 2" de succión x 2" de descarga. Motor de 10 Hp	1
Bomba de Agua	Bomba de Pulpa de 3" Succión x 2" de descarga. Motor Trifásico de 3Hp	1
Bomba de Agua	Bomba de Pulpa de 2 1/2" Succión x 2" de descarga. Motor trifásico de 7.5 Hp.	1

Fuente: Elaboración propia

Figura 7

Flowsheet de planta de beneficio Gabriel



Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Balance metalúrgico

- En el balance metalúrgico presentado se tiene una ley promedio de cabeza de mineral de 7 oz/Tm., y 1 grado de concentrado de 230 oz/tm. Y el relave obtenido con 0.8 oz/Tm.
- Con esta data se obtiene la recuperación de 89%, y una ratio de 37.
- Ingreso a planta 350 Tn/día, donde se obtiene 9.5 toneladas de concentrado.

Tabla 13*Balance metalúrgico*

DIA	PESO TMS	LEYES		CONTENIDO METÁLICO		RECUPERACIÓN %		RATIO
		Ag oz/Tm	Au oz/Tm	Ag oz	Au oz	Ag	Au	
Cabeza ensayada	350.000	7.000	0.000	2,450.000	0.000	100.00	0.00	36.968
Concentrado Ag/Au	9.468	230.000	0.000	2,177.574	0.000	88.88	0.00	
Relave	340.532	0.800	0.000	272.426	0.000	11.12	0.00	
Cabeza calculada	350.000	7.000	0.000	2,450.000	0.000	100.00	0.00	

Fuente: Elaboración propia

Balance de agua empleado:

- Consumo de agua: 3 m³ por tonelada.
- Si se trabaja 29 días al mes: 30,450.00 m³ mensuales.
- Pero se va a recircular casi el 80%, entonces el consumo sería 6,090.00 m³ mensuales.

3.2.4 Insumos

Se muestra los insumos que se utilizan para el desarrollo de la actividad de beneficio en la planta Gabriel.

- **Espumante F-23:**

Es un espumante de baja viscosidad y muy selectivo, da altas recuperaciones de mineral.

- **DP-160:**

Es un excelente depresor de arcillas. Limpia el mineral para que entre en contacto con los reactivos.

- **C-238:**

Es un promotor altamente selectivo contra minerales arsénicos y minerales no activos de zinc. Es un excelente colector de plata y oro.

- **C-282:**

Es un promotor selectivo para minerales de cobre, plata y oro nativo.

- **Z-14:**

Es un colector usado frecuentemente en los procesos de flotación de oro, ya que es un colector no selectivo.

- **Agua:**

Consumo de agua: 3 m³ por tonelada.

Consumos varios:

- **Petróleo:**

Aproximadamente 30 galones por hora. Al mes 20,880.00 galones. Depende del grupo electrógeno que se adquiera.

- **Aceites varios:**

1,000.00 galones mensuales.

Tabla 14

Resumen del uso de insumos

N°	INSUMOS	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA
1	Espumante F-23	0.03	Kg/Tm
2	DP-160	0.03	Kg/Tm
3	C-238	0.03	Kg/Tm
4	C-282	0.03	Kg/Tm
5	Z-14	0.20	Kg/Tm
6	Petróleo	30.00	Gal/h
7	Aceites	1,000	Gal/mensual
8	Agua	3.00	m ³ /Tm

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Recursos humanos

La planta de beneficio Gabriel opera de manera continua los 29 días efectivos del mes, con un régimen de trabajo de 24 horas diarias distribuidas en tres turnos o guardias. En total, laboran 33 trabajadores que se turnan para asegurar la continuidad operativa de los procesos durante todo el día. Adicionalmente se tiene un día de parada de planta.

Tabla 15*Recursos humanos de la planta de beneficio*

PERSONAL	CANTIDAD
Jefe de Planta	01
Molinero	03
Chancador	12
Flotador	03
Reactivero	03
Relavero	03
Filtrero	03
Mecánico	03
Electricista	02
Total	33

Fuente: Elaboración propia

3.3 Pruebas de sedimentación

El objetivo de las siguientes pruebas es evaluar la eficiencia de sedimentación de aguas de relave mediante pruebas comparativas, con y sin la adición de floculante, y analizar la concentración de sólidos totales en suspensión (STS) como indicador de rendimiento.

Preparación de muestras:

- Se recolectarán 6 muestras de agua de relave, cada una de 1000 ml, representativas del relave generado de la planta de beneficio.
- Las muestras deberán homogenizarse antes del ensayo para asegurar una distribución uniforme de partículas en suspensión.

Diseño experimental:

- Grupo 1: Pruebas sin floculante (control): 3 muestras (M1, M2, M3) se someterán a observación sin adición de reactivos.
- Grupo 2: Pruebas con floculante: 3 muestras (M4, M5, M6) se dosificarán con un floculante específico.
 - Se disolvieron 3 mg del floculante CT-3561 en 25 litros de agua potable, y posteriormente se extrajeron 5 ml de esta solución con una jeringa para ser añadidos a 1 litro de la muestra a tratar.

El floculante se añadirá bajo agitación lenta (50–80 rpm) durante 1 minuto para simular condiciones de floculación en planta.

Observación de sedimentación:

- Se verterán las muestras en cilindros de sedimentación transparentes.
- Se registrarán los siguientes parámetros:
 - Tiempo de inicio y final de sedimentación observable.
 - Altura del manto de lodo formado a diferentes tiempos (cada 5 minutos hasta 60 minutos).
 - Claridad visual del sobrenadante.

Análisis de sólidos totales en suspensión (STS):

- Después de 60 minutos de sedimentación, se tomará una alícuota del sobrenadante de cada muestra.
- Se analizará el contenido de sólidos totales en suspensión (STS) según el método gravimétrico estándar:
 - Filtrar un volumen conocido (por ejemplo, 100 ml) a través de un filtro de fibra de vidrio previamente secado y pesado.
 - Secar el filtro con muestra a 103–105 °C durante 1 hora.
 - Pesar y calcular la concentración de STS en mg/L con la fórmula:

$$\text{STS} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial del filtro}}{\text{Volumen de muestra filtrada (mL)}} \times 1000 \quad (2)$$

Análisis de resultados

- Comparar los valores de STS entre muestras con y sin floculante.
- Evaluar la eficiencia de sedimentación a partir de:
 - Reducción porcentual de STS.
 - Tiempos de sedimentación.
 - Claridad del agua tratada.
- Representar los resultados en tablas y gráficos para facilitar la interpretación.

3.3.1 Resultados de sedimentación sin floculante

Tabla 16

Resultados de muestra M1 – sin floculante

MUESTRA M1 – SIN FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000
5	915
10	875
15	715
20	595
25	565
30	445
35	395
40	275
45	115
50	90
55	45
60	35

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17

Resultados de muestra M2 – sin floculante

MUESTRA M2 – SIN FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000
5	935
10	800
15	755
20	695
25	615
30	495
35	425
40	375
45	215
50	85
55	70
60	40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18*Resultados de muestra M3 – sin floculante*

MUESTRA M3 – SIN FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000
5	860
10	785
15	695
20	675
25	595
30	475
35	325
40	195
45	155
50	105
55	90
60	30

Fuente: Elaboración propia

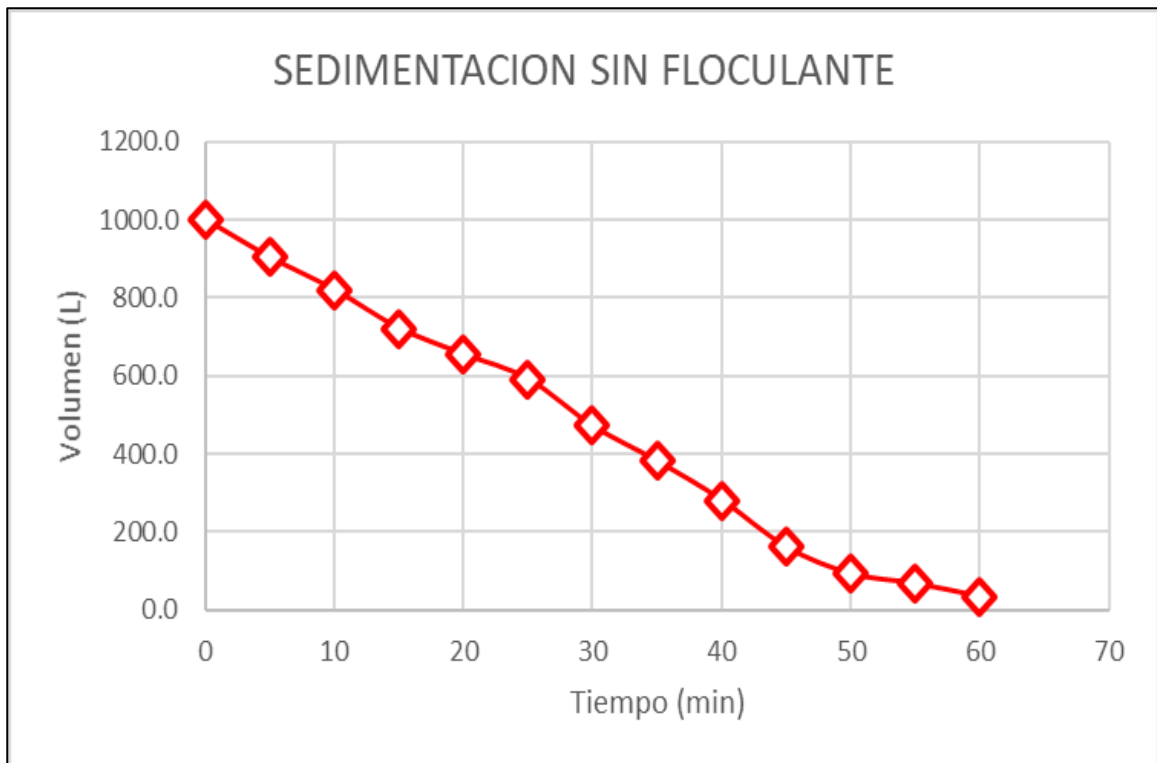
Tabla 19*Promedio general de resultados sin floculante*

PROMEDIO GENERAL – SIN FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000.0
5	903.3
10	820.0
15	721.7
20	655.0
25	591.7
30	471.7
35	381.7
40	281.7
45	161.7
50	93.3
55	68.3
60	35.0

Fuente: Elaboración propia

Figura 8

Sedimentación sin floculante



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20

STS de muestras sin floculante

MUESTRA	RESULTADO	UNIDAD
M1	180.5	mg/L
M2	175.6	mg/L
M3	182.2	mg/L
Promedio	179.4	mg/L

Fuente: Elaboración propia

El agua que será recirculada para el proceso de flotación requiere una concentración de STS debe ser menor a 100 mg/L para no saturar el sistema de flotación. Según los resultados de la tabla anterior el agua sedimentada sin floculantes excede dicho valor.

3.3.2 Resultados de sedimentación sin floculante

Tabla 21

Resultados de muestra M4 – con floculante

MUESTRA M4 – CON FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000
5	665
10	545
15	465
20	295
25	110
30	35
35	27
40	22
45	18
50	16
55	16
60	16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

Resultados de muestra M5 – con floculante

MUESTRA M5 – CON FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000
5	655
10	575
15	480
20	315
25	280
30	100
35	50
40	45
45	43
50	43
55	43
60	43

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23*Resultados de muestra M6 – con floculante*

MUESTRA M6 – CON FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000
5	645
10	465
15	342
20	215
25	180
30	75
35	40
40	53
45	35
50	35
55	35
60	35

Fuente: Elaboración propia

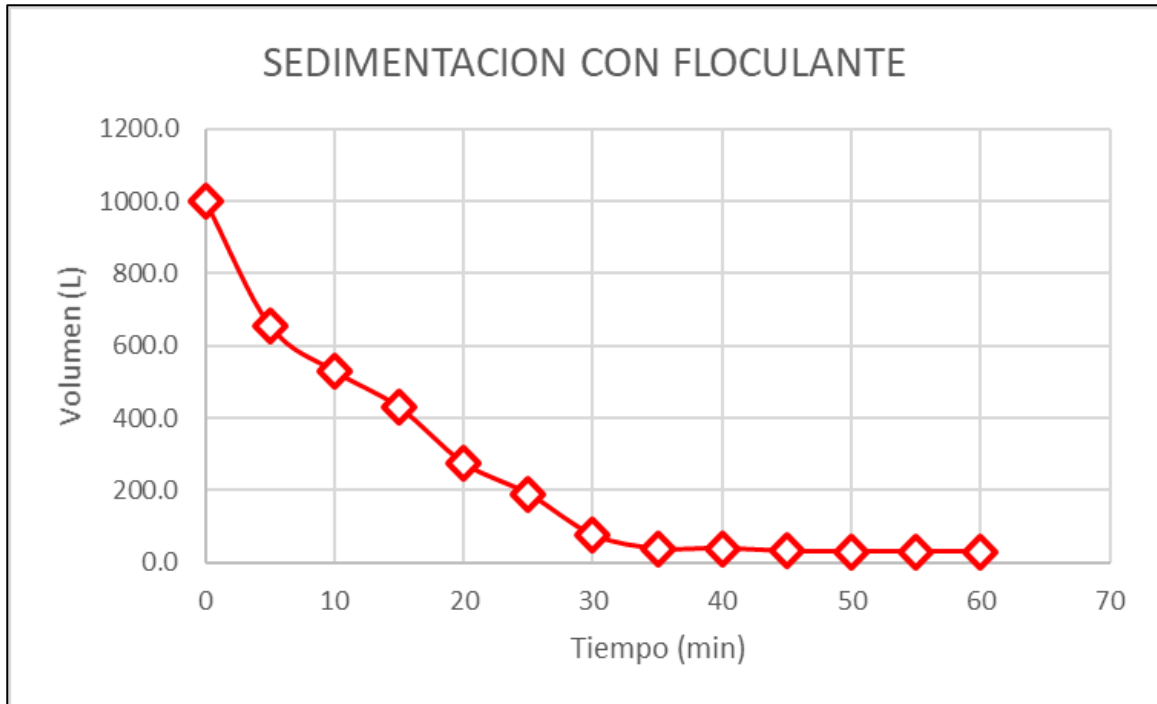
Tabla 24*Promedio general de resultados con floculante*

PROMEDIO GENERAL – CON FLOCULANTE	
TIEMPO (min)	VOLUMEN (L)
0	1000.0
5	655.0
10	528.3
15	429.0
20	275.0
25	190.0
30	76.7
35	39.0
40	40.0
45	32.0
50	31.3
55	31.3
60	31.3

Fuente: Elaboración propia

Figura 9

Sedimentación con floculante



Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

STS de muestras con floculante

MUESTRA	RESULTADO	UNIDAD
M4	55.4	mg/L
M5	50.8	mg/L
M6	47.8	mg/L
Promedio	51.3	mg/L

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla anterior muestran una concentración de STS menor al LMP (100 mg/L), por lo que el agua es adecuada para la recirculación.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de resultados

Se realizará un análisis estadístico para evaluar los parámetros obtenidos en el capítulo anterior, para garantizar que el agua para la recirculación cumpla con los parámetros físico-químicos y no afecten el proceso de flotación.

Para ello se realiza la validación de hipótesis, planteamos la hipótesis nula y alternativa.

H_0 : La caracterización del agua de proceso actual y del relave generado no revelaría la presencia de parámetros críticos que requerirán el uso de floculante para su aprovechamiento.

H_A : La caracterización del agua de proceso actual y del relave generado revelaría la presencia de parámetros críticos que requerirán el uso de floculante para su aprovechamiento.

La data a analizar serán los promedios de parámetros de agua sedimentada con y sin floculante.

Prueba de normalidad:

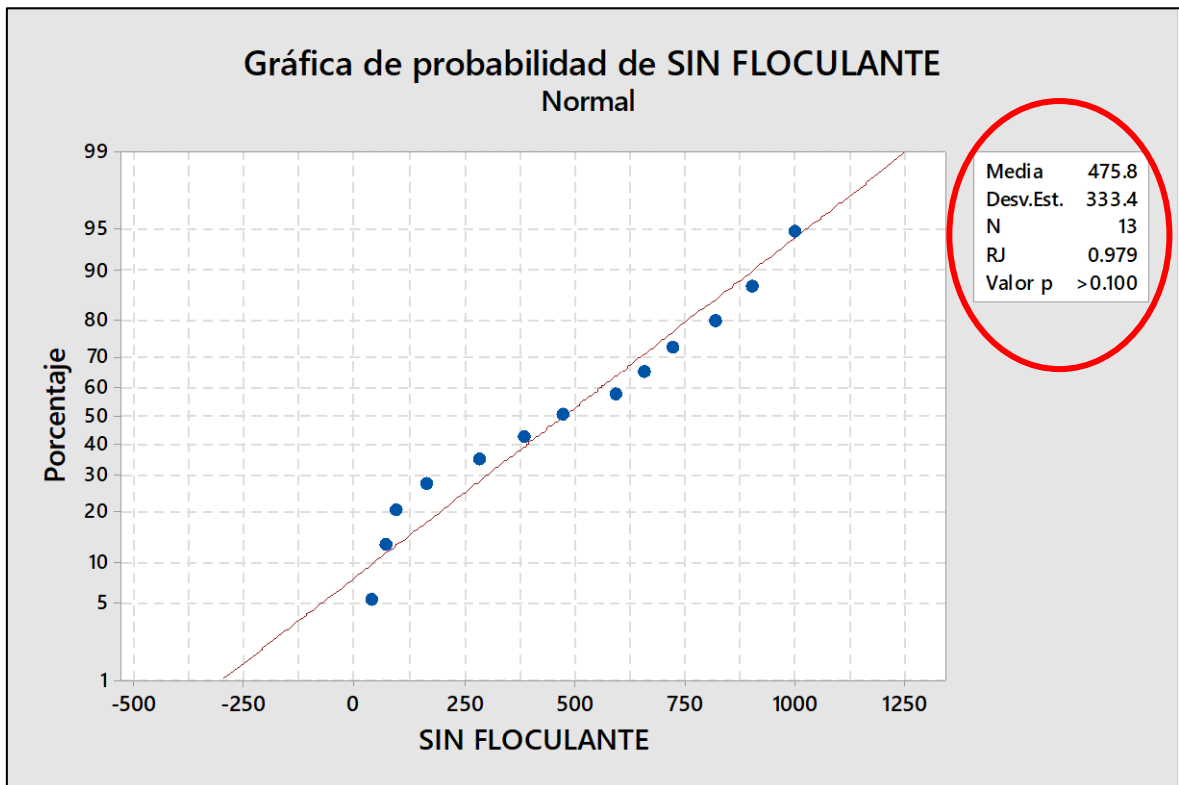
- Nivel de confianza: 95%
- Grado de significancia: 0.05

Esta prueba se realiza para determinar el comportamiento de los datos, esto sirve para elegir la prueba estadística adecuada.

Para asegurar que los datos tienen una distribución normal el valor de p tiene que ser mayor al grado de significancia asignado ($p > 0.05$).

Figura 10

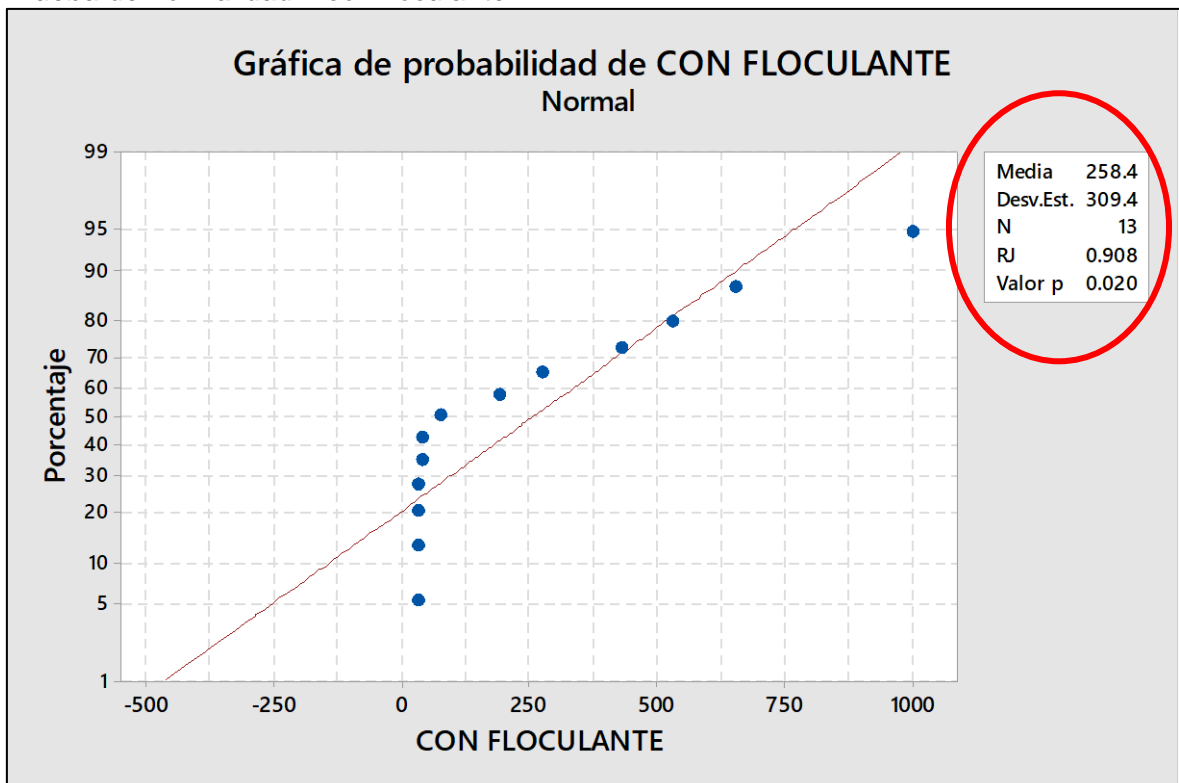
Prueba de normalidad – sin floculante



Fuente: Elaboración propia

Figura 11

Prueba de normalidad – con floculante



Fuente: Elaboración propia

De las figuras anteriores, se concluye que los datos de las muestras sedimentadas sin floculante tienen distribución normal, ya que el valor de $p > 0.10 > 0.05$. Por otro lado los datos de las muestras sedimentadas con floculante no tienen distribución normal, el valor de $p = 0.02 < 0.05$.

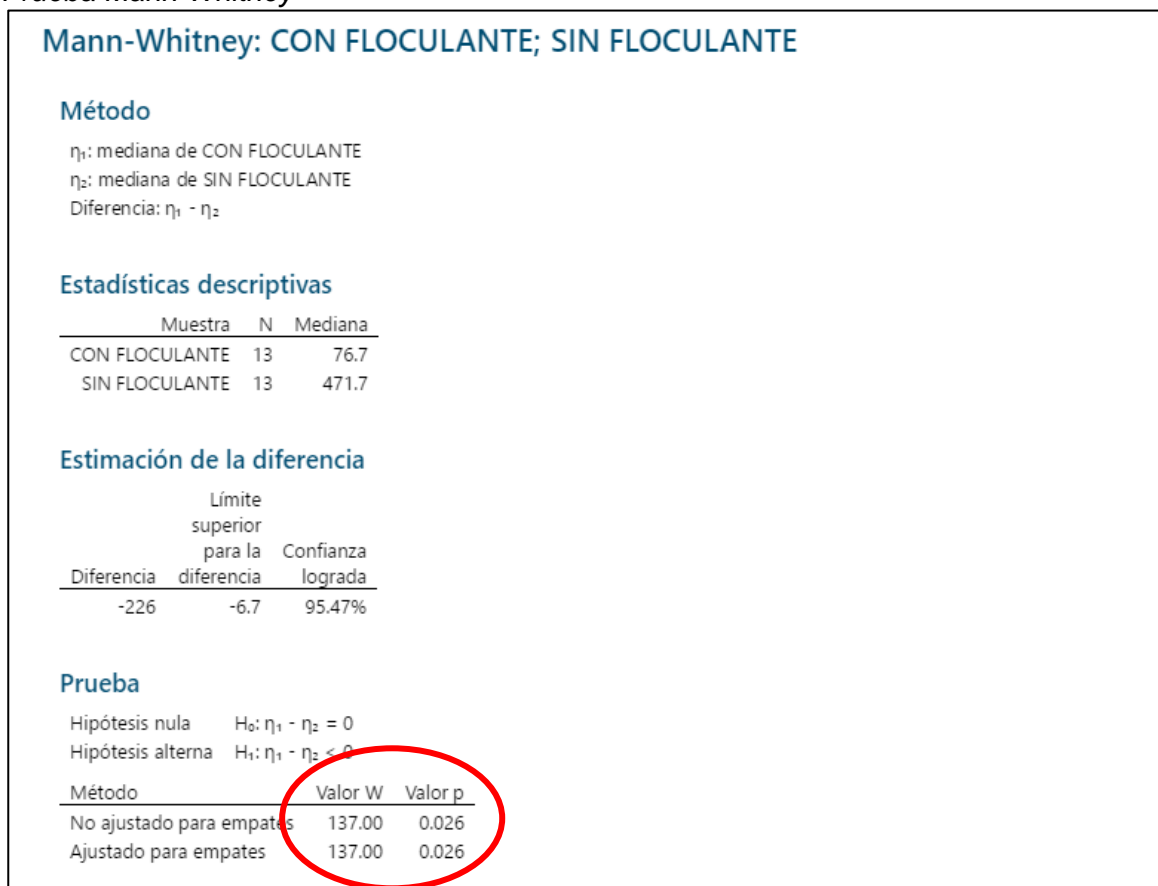
Estadístico de prueba:

Debido a que solo una muestra tiene distribución normal, se utilizara un estadístico no paramétrico.

Para este caso la prueba estadística elegida es la prueba de Mann-Whitney, que es una prueba equivalente a la t-student para no paramétricos ($n < 30$).

Figura 12

Prueba Mann-Whitney



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se puede apreciar que el valor del estadístico de prueba correspondiente a la prueba, que compara el volumen de sedimento sin floculante con el obtenido utilizando floculante, presenta un p-valor de 0.026. Dado que este valor es inferior

al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se procede a rechazar la hipótesis nula y a aceptar la hipótesis alternativa. Por lo tanto, La caracterización del agua de proceso actual y del relave generado revelaría la presencia de parámetros críticos que requerirán el uso de floculante para su aprovechamiento.

4.2 Sistema de recirculación de agua

Para este proceso se cuenta con una bomba de agua con salida de 4" en la relavera, en el espejo de agua. La cual funcionará 9-10 horas al día, deberá llenar los geotanques de 100 m³ en una hora, estos geotanques nos dan agua para 4 horas de operación de los diferentes circuitos de la Planta de beneficio.

Se debe controlar el nivel del espejo de agua a 1 metro del rebose de la relavera, para esto se controla el ingreso de agua nueva al circuito.

Antes debe llenarse la relavera de agua para que la línea de la laguna al geotanque sea de 3" y no tener problemas con el volumen de agua.

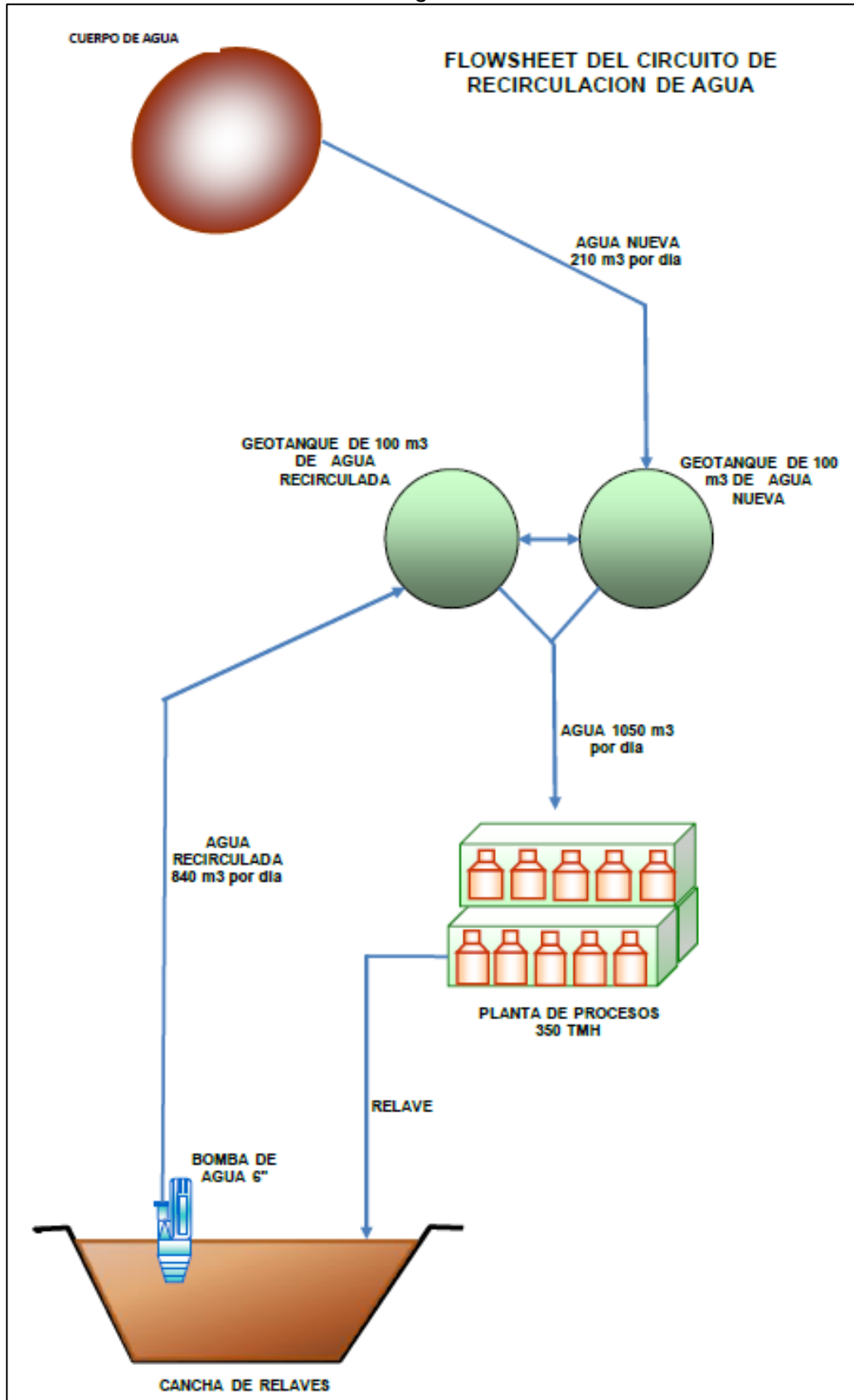
El volumen de agua que se va a recircular es de 24,360.00 m³ mensuales y el volumen de agua nueva que se necesita es de 6,090.00 m³, considerando 29 días trabajados al mes. Lo que representa una reducción en 80% de consumo de agua fresca.

El costo del sistema de recirculación aproximado será de:

▪ Bomba Grindex	US\$	4000.00
▪ Plataforma flotante	US\$	1500.00
▪ Geotanques de 100 m ³ x2	US\$	10000.00
▪ Tuberías de HDP 4":	US\$	1000.00
▪ Otros	US\$	2000.00
▪ Total	US\$	18500.00

Figura 13

Flowsheet del circuito de recirculación de agua



Fuente: Elaboración propia

Figura 14

Bomba Grindex con salida de 4" en plataforma flotante



Fuente: Elaboración propia

Figura 15

Geotanques de 100 m³ de capacidad



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La implementación de una planta de recirculación de agua en el procesamiento de minerales polimetálicos ha demostrado ser altamente efectiva para reducir el consumo de agua fresca, disminuyéndolo de 30,450 m³ a 6,090 m³ mensuales, lo que representa una reducción del 80%, favoreciendo así la sostenibilidad hídrica del proceso.

El uso del floculante seleccionado permite una sedimentación eficiente de los sólidos en aproximadamente 30 minutos, generando un agua tratada con parámetros físico-químicos adecuados para su reutilización en flotación, optimizando la calidad del proceso metalúrgico sin comprometer su eficiencia.

Se evidenció una mejora significativa en la calidad del agua tratada, reduciendo los sólidos totales en suspensión (STS) de 179.4 mg/L a 51.3 mg/L al aplicar floculante, valor que se encuentra por debajo del Límite Máximo Permisible (LMP) de 100 mg/L, cumpliendo así con los estándares ambientales y operacionales vigentes.

El sistema de recirculación requiere una inversión accesible de 18,500 dólares estadounidenses, lo cual es viable en términos económicos considerando los beneficios operacionales, ambientales y regulatorios que conlleva.

El relave generado durante la flotación bulk de plata y oro presenta un comportamiento químico favorable, ya que la presencia de caliza en la roca (>15%) actúa como agente neutralizante natural, lo que minimiza la generación de aguas ácidas y reduce el riesgo ambiental asociado a la disposición de relaves.

En conjunto, la aplicación de este sistema de tratamiento y recirculación no solo mejora la eficiencia del proceso de concentración de minerales, sino que también contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental, alineando la operación minera con principios de responsabilidad ambiental y uso racional de recursos hídricos.

Recomendaciones

Se recomienda continuar con la operación y optimización del sistema de recirculación de agua, dado su impacto positivo en la reducción del consumo de agua fresca y en el cumplimiento de los parámetros ambientales exigidos para procesos mineros.

Es aconsejable realizar un monitoreo continuo de los parámetros físico-químicos del agua recirculada, a fin de asegurar que se mantengan dentro de los límites aceptables para el proceso de flotación y prevenir acumulaciones indeseadas de contaminantes o reactivos residuales.

Se sugiere implementar un programa de análisis periódico del agua recirculada, con énfasis en la presencia de reactivos como colectores, espumantes o depresores, ya que estos podrían mantener cierto grado de efectividad en circuitos cerrados. Este análisis podría permitir ajustar las dosis de insumos químicos, generando potenciales ahorros económicos en el proceso.

Referencias bibliográficas

- Akcil, A. (2006). *Water reuse and recycling in mining operations*. Resources, Conservation and Recycling, 49” (2), 155-176.
- Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice* (Vol. 1). Elsevier.
- Bussière, B., & Adams, M. (2013). *Tailings management*. SME Mining Engineering Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Castillón, J. M., & Pérez-López, R. (2018). *Manejo ambiental de relaves mineros*. Editorial Universidad de Chile.
- Contreras, L. (2015). *Design and Operation of a Zero-Discharge Water Circuit in a Copper Mine*. Desalination and Water Treatment, 53*(10), 2768-2775.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (1999). *Wastewater Technology Fact Sheet: Chemical Precipitation*. EPA 832-F-00-018.
- Flores, M. (2019). *Análisis comparativo de tecnologías de tratamiento para la recirculación de agua en la industria minera del cobre*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Gaudin, A. M. (1939). *Flotation*. McGraw-Hill Book Company.
- Gómez, A. (2020). *Evaluación del impacto de la calidad del agua reciclada en la eficiencia del proceso de flotación de minerales sulfurados*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Jambor, J. L., & Blowes, D. W. (1998). *Environmental aspects of mine wastes*. In *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (pp. 373–432). Mineralogical Association of Canada.
- Johnson, P., & Smith, R. (2010). “*Case studies of water recycling in mineral processing*.” Journal of Cleaner Production, 18*(9), 874-880.

- Laskowski, J. S. (2001). *Fundamentals of flotation*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Leiva, G., & Wills, B.A. (2007). *The impact of water quality on the performance of flotation circuits with recycled water*. *Minerals Engineering*, 20*(12), 1115-1121.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Pérez, J. (2018). “*Diseño e implementación de un sistema de recirculación de aguas industriales en la planta concentradora de la Compañía Minera X*”. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Quispe, R. (2021). “*Factores críticos para la implementación exitosa de sistemas de recirculación de agua en pequeñas y medianas empresas mineras*”. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Sosa, L., Gutiérrez, R., & Morales, F. (2021). *Tratamiento de efluentes mineros mediante procesos físico-químicos: caso de estudio en una mina polimetálica del sur del Perú*. *Revista Peruana de Ingeniería Ambiental*, 25(1), 45–56.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Van Zyl, D. (2014). *Tailings Disposal: A Review of Practices and Challenges*. *Minerals Engineering*, 65, 89-101.
- Vargas, L. (2022). “*Modelo conceptual para la implementación de un circuito cerrado de agua en plantas de procesamiento de minerales metalíferos*”. Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC, Lima, Perú.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Informe de análisis de agua de relave de la planta de beneficio Gabriel	1
Anexo 2: Informe de análisis de agua de relave después de la prueba de sedimentación sin floculante.....	2
Anexo 3: Cadena de custodia de monitoreo de agua de relave sin floculante.....	3
Anexo 4: Informe de análisis de agua de relave después de la prueba de sedimentación con floculante	4
Anexo 5: Cadena de custodia de monitoreo de agua de relave con floculante.....	5
Anexo 6: Pruebas de sedimentación sin floculante	6
Anexo 7: Pruebas de sedimentación con floculante.....	9

Anexo 1: Informe de análisis de agua de relave de la planta de beneficio Gabriel



**LABORATORIO DE ENSAYOS
"AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C"**

INFORME DE ENSAYO N° AL/IE-045-21

NOMBRE DEL CLIENTE : Luis Ángel Navarro Poma.
Karen Paola Aguilar Limache.
DOMICILIO LEGAL : Jr. Manuel Scorza N° 195 el Tambo.
Jr. Pedro Galvez N° 2110 el Tambo.
SOLICITADO POR : Karen Paola Aguilar Limache.
REFERENCIA DEL CLIENTE : Análisis de Agua Superficial Cantera Encanto Blanco Lyof – Chongos Alto.
PROCEDECENCIA : Cantera Encanto Blanco Lyof – Chongos Alto.
ORDEN DE SERVICIO N° : AL/OS – 027 – 2021.
CANTIDAD DE MUESTRAS : 1 Frasco de Plástico.
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRA : 19/04/2021.
PERIODO DE ENSAYO : 19/04/2021 – 20/04/2021.
TOMA DE MUESTRA : Por el cliente.
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : Los resultados de análisis se aplican a la muestra(s) tal como se recibió.

I. DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL MONITOREO:

Código del Cliente	Código de Laboratorio	Coordenadas		Fecha de Monitoreo	Hora de Monitoreo	Producto Declarado
		Este	Norte			
PM-01	M-21-81	—	—	19/04/2021	13.00	Agua Superficial

II. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método de Referencia	Descripción
Sólidos Totales en Suspensión	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23rd Ed.2017	Total Solids in Suspension Dried at 103-105 ° C

III. RESULTADOS:

Código del Cliente	Ensayo	Resultado	Unidad
PM-01	Sólidos Totales en Suspensión	205.5	mg/L



Huancayo, 21 de Abril del 2021

[Handwritten Signature]
Ing. Evelyn H. Luaces Galarza
 JEFE DE LABORATORIO
 CIP N° 175012


LAB-FR-004/ VERSIÓN 01/ F.E.: 12/2020

El presente informe es redactado íntegramente en AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C, su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública. Está prohibido la reproducción parcial o total salvo autorización escrita de AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C. Las muestras serán conservadas en un periodo máximo de 30 días de haber ingresado al laboratorio, excedido el tiempo se procede a su eliminación. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Página 1 de 1

Oficina principal: Av. Ferrocarril N° 661 – Chilca – Huancayo. Laboratorio: Av. Ferrocarril S/N – Barrio Chanchas - Huayucachi

Anexo 2: Informe de análisis de agua de relave después de la prueba de sedimentación sin floculante



LABORATORIO DE ENSAYOS "AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C"

INFORME DE ENSAYO N° AL/IE-059-21

NOMBRE DEL CLIENTE	: Luis Angel Navarro Poma
DOMICILIO LEGAL	: Karen Paola Aguilar Limache Jr. Manuel Scorza N° 195 el Tambo
SOLICITADO POR	: Karen Paola Aguilar Limache
REFERENCIA DEL CLIENTE	: Análisis de Agua Superficial Cantera Encanto Blanco Lyof - Chongos Alto
PROCEDENCIA	: Cantera Encanto Blanco Lyof - Chongos Alto
ORDEN DE SERVICIO N°	: AL/OS - 045 - 2021.
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 1 Frasco de Plástico.
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	: 13/05/2021.
PERIODO DE ENSAYO	: 14/05/2021 - 16/05/2021.
TOMA DE MUESTRA	: Por el cliente.
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Los resultados de análisis se aplican a la muestra(s) tal como se recibió.

I. DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL MONITOREO:

Código del Cliente	Código de Laboratorio	Coordenadas		Fecha de Monitoreo	Hora de Monitoreo	Producto Declarado
		Este	Norte			
PRUEBA 1	M-21-100	_____	_____	13/05/2021	13:00	Agua Superficial
PRUEBA 2	M-21-101	_____	_____	13/05/2021	13:00	Agua Superficial
PRUEBA 3	M-21-102	_____	_____	13/05/2021	13:00	Agua Superficial


II. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método de Referencia	Descripción
Sólidos Totales en Suspensión	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23rd Ed.2017	Total Solids in Suspension Dried at 103-105 ° C

III. RESULTADOS:

Código del Cliente	Ensayo	Resultado	Unidad
PRUEBA 1	Sólidos Totales en Suspensión	152.2	mg/L
PRUEBA 2	Sólidos Totales en Suspensión	145.7	mg/L
PRUEBA 3	Sólidos Totales en Suspensión	150.5	mg/L





Ing. Fredy H. Navarro Colarza
JEFE DE LABORATORIO
EP 1° 17812


Huancayo, 17 de Mayo del 2021

El presente informe es redactado íntegramente en AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C, su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública. Está prohibido la reproducción parcial o total salvo autorización escrita de AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C. Las muestras serán conservadas en un periodo máximo de 30 días de haber ingresado al laboratorio, excedido el tiempo se procede a su eliminación. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Página 1 de 1

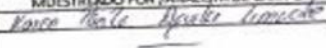
Oficina principal: Av. Ferrocarril N° 661 – Chilca – Huancayo. Laboratorio: Av. Ferrocarril S/N – Barrio Chanchas - Huayucachi
 Cel.: 988900666 - 956000691 Email: ambiental.lab@ambientallaboratorios.com.pe

Anexo 3: Cadena de custodia de monitoreo de agua de relave sin floculante

		AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C				CÓDIGO: LAB-FR-001		
		CADENA DE CUSTODIA DE MONITOREO – AGUA Y SUELO				VERSION: 01 F.E: 12/2020		
Cliente:	Karen Paola Aguilar Lirioche			Lugar de muestreo:	Cartera Ferrocarril Blanco Llag - Chugra Alto		N° de Informe de ensayo (1):	04/FE-059-01
RUC:				Proyector:	Análisis de Agua Superficial Cartera Ferrocarril Blanco Llag - Chugra Alto			
N° de cotización (2):	AL/Car-2021-119-1			Tel: 965683321	PARAMETROS (3)			
e-mail:								


N° DE MUESTRA	CÓDIGO DE LABORATORIO (4)	PUNTO DE MONITOREO O CÓDIGO DEL CLIENTE	MUESTREO		MATEZ (5)	UBICACIÓN UTM (6)	N° DE FRASCOS POR PUNTO DE MUESTREO		VOLUMEN TOTAL	SOL	OBSERVACIONES	
			FECHA (6-m-a)	HORA (24:00)			P	V				
			1	M-21-100			Punto 1	13/04/21				13:00
2	M-21-101	Punto 2	13/04/21	13:00	AS	---	1	-	1L	X		
3	M-21-102	Punto 3	13/04/21	13:00	AS	---	1	-	1L	X		
TOTAL							1					

(1) Campo exclusivo para el laboratorio.
 (2) Parámetros según requerimiento del cliente.
 (3) Tener las coordenadas UTM utilizando un GPS.
 (4) AP(Agua Potable); AR(Agua Residual); AS(Agua Superficial); AT(Agua Subterránea); AM(Agua de Mar); AL(Agua Pluvial); DP(Dueros); VE(Variación); SS(Sedimentos); BV(Banco Vapor); DP(Dueros); SC(Sanco de Campo)

DATOS		MUESTREADO POR ANALISTA DE CAMPO		RESPONSABLE O SUPERVISOR EN CAMPO		LABORATORIO – RECEPCION DE MUESTRAS	
NOMBRES Y APELLIDOS:		Karen Paola Aguilar Lirioche				MUESTRAS RECIBIDAS INTACTAS	
FIRMA:						TIPO DE RECIENTE ADECUADO	
OBSERVACIONES:						MUESTRAS DENTRO DEL PERIODO DE ANALISIS	
						CONSERVACION DE MUESTRAS	
						FRIO: <input checked="" type="checkbox"/> AMBIENTE: <input type="checkbox"/>	

Oficina principal: Av. Ferrocarril N° 661 – Chica – Huancayo. Laboratorio: Av. Ferrocarril S/N – Barrio Chinchas - Huzayachi
 Cel.: 95800666 - 95600691 Email: ambiental.lab@ambientallaboratorios.com.pe

Anexo 4: Informe de análisis de agua de relave después de la prueba de sedimentación con floculante



**LABORATORIO DE ENSAYOS
"AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C"**

INFORME DE ENSAYO N° AL/IE-088-21

NOMBRE DEL CLIENTE	: Luis Ángel Navarro Poma. Karen Paola Aguilar Limache.
DOMICILIO LEGAL	: Jr. Manuel Scorza N° 195 el Tambo. Jr. Pedro Galvez N° 2110 el Tambo.
SOLICITADO POR	: Karen Paola Aguilar Limache.
REFERENCIA DEL CLIENTE	: Análisis de Agua Superficial Cantera Encanto Blanco Lyof – Chongos Alto.
PROCEDENCIA	: Cantera Encanto Blanco Lyof – Chongos Alto.
ORDEN DE SERVICIO N°	: AL/OS – 072 – 2021.
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 3 Frasco de Plástico.
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	: 30/06/2021.
PERIODO DE ENSAYO	: 30/06/2021 – 03/07/2021.
TOMA DE MUESTRA	: Por el cliente.
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Los resultados de análisis se aplican a la muestra(s) tal como se recibió.

I. DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL MONITOREO:


Código del Cliente	Código de Laboratorio	Coordenadas		Fecha de Monitoreo	Hora de Monitoreo	Producto Declarado
		Este	Norte			
PRUEBA 1	M-21-151	_____	_____	30/06/2021	12:00	Agua Superficial
PRUEBA 2	M-21-152	_____	_____	30/06/2021	12:00	Agua Superficial
PRUEBA 3	M-21-153	_____	_____	30/06/2021	12:00	Agua Superficial


II. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método de Referencia	Descripción
Sólidos Totales en Suspensión	SMEVWV-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23rd Ed.2017	Total Solids in Suspension Dried at 103-105 ° C

III. RESULTADOS:

Código del Cliente	Ensayo	Resultado	Unidad
PRUEBA 1	Sólidos Totales en Suspensión	52.2	mg/L
PRUEBA 2	Sólidos Totales en Suspensión	50.4	mg/L
PRUEBA 3	Sólidos Totales en Suspensión	47.9	mg/L






Huancayo, 05 de Julio del 2021

El presente informe es redactado íntegramente en AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C, su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública. Está prohibido la reproducción parcial o total salvo autorización escrita de AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C. Las muestras serán conservadas en un periodo máximo de 30 días de haber ingresado al laboratorio, excedido el tiempo se procede a su eliminación. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Página 1 de 1













Oficina principal: Av. Ferrocarril N° 661 – Chilca – Huancayo. Laboratorio: Av. Ferrocarril S/N – Barrio Chanchas - Huayucachi
Cel.: 998900666 - 956000691 Email: ambiental.lab@ambientallaboratorios.com.pe

Anexo 5: Cadena de custodia de monitoreo de agua de relave con floculante

		AMBIENTAL LABORATORIOS S.A.C CADENA DE CUSTODIA DE MONITOREO – AGUA Y SUELO		CÓDIGO: LAB-FR-001							
				VERSION: 01 F.E: 12/2020							
Cliente: <u>Las Azules Nueva Pasa / Santa Cruz</u>		Lugar de muestreo: <u>Cuartera Encanto Sibario Luz - Chapas Alto</u>		N° de informe de ensayo: <u>AY/E-088-2</u>							
RUC: _____		Proyecto: <u>Análisis de Agua Superficial Cuartera Encanto Sibario Luz - Chapas Alto</u>									
N° de cotización: <u>PL/CT-221-163-1</u>		Tel: <u>95668321</u>		PARAMETROS: _____							
E-mail: _____											
N° DE MUESTRA	CÓDIGO DE LABORATORIO ⁽¹⁾	PUNTO DE MONITOREO O CÓDIGO DEL CLIENTE	MUESTREO			UBICACIÓN UTM ⁽²⁾	N° DE TRAMOS POR PUNTO DE MUESTREO		VOLUMEN TOTAL	OBSERVACIONES	
			FECHA (d-m-a)	HORA (24 HOR)	MATIZ ⁽³⁾		P	C			
01	11-21-151	Punto 1	30/06/21	12:00	AS	==	01	1L	X	31 JUN 2021 13:00	
02	11-21-152	Punto 2	30/06/21	12:00	AS	==	01	1L	X		
03	11-21-153	Punto 3	30/06/21	12:00	AS	==	01	1L	X		
TOTAL							03				
(1) Campo exclusivo para el laboratorio. (2) Puntos según requerimiento del cliente. (3) Tener las coordenadas UTM utilizando un GPS. AS(Agua Superficial); AR(Agua Residual); AT(Agua Subterránea); AM(Agua de Mar); AL(Agua Pluvial); EF(Efluentes); VE(Vertimientos); SS(Sedimentos); BV(Barridos Viales); DP(Duplicado); DC(Barco de Cerros)											
DATOS MUESTREO POR ANALISTA DE CAMPO		RESPONSABLE O SUPERVISOR EN CAMPO		LABORATORIO – RECEPCION DE MUESTRAS							
NOMBRES Y APELLIDOS: <u>Las Azules Nueva Pasa</u>		<u>Kevin Ayala Lora</u>		MUESTRAS RECIBIDAS INTACTAS				SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>			
FIRMA: _____		_____		TIPO DE RECIPiente ADECUADO				SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>			
OBSERVACIONES: _____		_____		MUESTRAS DENTRO DEL PERIODO DE ANALISIS				SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>			
				CONSERVACION DE MUESTRAS				SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>			
				MONITOREO por:				AMBIENTE: _____			
				Ambiental Laboratorios							
				Cliente							













Oficina principal: Av. Ferrocarril N° 661 – Chica – Huancayo. Laboratorio: Av. Ferrocarril 5/N – Barrio Chanchas - Huayucacha
 Cel. 98990066 - 955000691 Email: ambiental.lab@ambientallaboratorios.com.pe
















Anexo 6: Pruebas de sedimentación sin floculante



Tiempo (min)	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
0			
5			
10			
15			

20			
25			
30			
35			
40			

Anexo 7: Pruebas de sedimentación con floculante

Tiempo (min)	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
0			
5			
10			
15			

20			
25			
30			
35			
40			

45			
50			
55			
60			