



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión  
**Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica**  
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para mejorar la  
precisión y velocidad**

**Tesis**  
**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico**

**Autores**  
**Jordan Luis Mora Vasquez**  
**Jeremias Vicente Calzado Cusma**

**Asesor**  
**Dr. Joaquín José Abarca Rodríguez**



JOAQUIN JOSE  
ABARCA RODRIGUEZ  
INGENIERO METALURGICO  
Reg. CIP Nº 108833

**Huacho - Perú**

2026



### **Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

**Reconocimiento:** Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN**  
**LICENCIADA**

*(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)*

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

**INFORMACIÓN DE METADATOS**

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Jordan Luis Mora Vasquez	72410880	10 – 03 - 2026
Jeremias Vicente Calzado Cusma	48306000	10 – 03 - 2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Joaquín José Abarca Rodríguez	15740291	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1004-3824">https://orcid.org/0000-0003-1004-3824</a>
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Maximo Tomas Salcedo Meza	15602588	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1993-2513">https://orcid.org/0000-0003-1993-2513</a>
Fredy Roman Paredes Aguirre	15859960	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3829-9541">https://orcid.org/0000-0002-3829-9541</a>
Helen Analí Zapata Del Solar	44067559	<a href="https://orcid.org/0000-0002-5347-6155">https://orcid.org/0000-0002-5347-6155</a>

## 2026-007944 MORA VASQUEZ 2026 - 008260 CALZA...

### Clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para mejorar la precisión y velocidad

UNIDAD DE INVESTIGACION FIQyM - PREGRADO 2026

Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3477383145

Fecha de entrega

9 feb 2026, 4:34 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 feb 2026, 4:40 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS\_Mora\_V\_squez\_-\_Calzado\_Cusma.docx

Tamaño del archivo

2.2 MB

84 páginas

16.878 palabras

95.280 caracteres



Página 2 de 89 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3477383145

## 13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

#### Filtrado desde el informe

► Bibliografía

#### Fuentes principales

13% Fuentes de Internet

4% Publicaciones

7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

#### Marcas de integridad

##### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguir de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **DEDICATORIA**

Dedicamos esta tesis a nuestros padres, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional. A mis docentes, por su sabiduría y guía. A mi familia y amigos, por su paciencia y aliento. Este logro es fruto de su constante respaldo y fe en mí. Con profundo agradecimiento.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos primeramente a Dios por bendecirnos con la salud, el entendimiento y la perseverancia para culminar este trabajo. A nuestros padres, por su amor inquebrantable, sacrificio y apoyo incondicional. Gracias por creer en nosotros en cada paso. Este logro es también fruto de sus oraciones y esfuerzos. Con profundo agradecimiento.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	5
AGRADECIMIENTO .....	6
ÍNDICE GENERAL .....	7
ÍNDICE DE TABLA .....	10
ÍNDICE DE FIGURA.....	11
ANEXO.....	12
RESUMEN .....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCION .....	15
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	17
1.2 Formulación del problema.....	18
1.2.1 Problema general.....	18
1.2.2 Problemas específicos.....	18
1.3 Objetivos de la investigación .....	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivo específico.....	19
1.4 Justificación de la investigación.....	19
1.5 Delimitación del estudio.....	21
1.5.1 Delimitación de territorio .....	21
1.5.2 Delimitación tiempo y espacio.....	22
CAPITULO II MARCO TEÓRICO .....	23

2.1.	Antecedentes de la investigación .....	23
2.1.1.	Investigación internacional .....	23
2.1.2.	Investigación nacional. ....	25
2.2.	Bases teóricas. ....	27
2.2.1.	La clasificación de partículas de minerales de cobre. ....	27
2.2.2.	Fundamentos de los sistemas de clasificación de minerales. ....	28
2.2.3.	Mejora de la precisión en la clasificación de partículas. ....	34
2.2.4.	Aumento de la velocidad de clasificación. ....	41
2.2.5.	Sistemas Ro-Tap y clasificación práctica de partículas de minerales de cobre. ....	42
2.3.	Definiciones conceptuales. ....	44
2.4.	Hipótesis de la investigación. ....	48
2.4.1.	Hipótesis general. ....	48
2.4.2.	Hipótesis específicas. ....	48
2.5.	Operacionalización de variables e indicadores. ....	49
CAPITULO III METODOLOGÍA .....		50
3.1.	Diseño metodológico. ....	50
3.2.	Población y muestra. ....	51
3.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos. ....	51
3.4.	Técnicas para el procesamiento de la información. ....	52
CAPITULO IV RESULTADOS. ....		54
4.1.	Análisis de resultados. ....	54
4.1.1.	Condiciones de la parte experimental .....	54
4.1.2.	Resultados. ....	55

4.1.3. Procesamiento de los resultados .....	57
4.2. Contratación de hipótesis.....	60
2.5.1. Contratación de hipótesis general.....	60
2.5.2. Contratación de hipótesis específicas.....	61
CAPÍTULO V DISCUSIÓN.....	63
5.1. Discusión de resultados .....	63
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	65
6.1. Conclusiones .....	65
6.2. Recomendaciones.....	66
CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
5.1. Referencias bbibliográficas .....	67
ANEXOS .....	78

**ÍNDICE DE TABLA**

Tabla 1	Operacionalización de las variables e indicadores .....	49
Tabla 2	Parámetros de las pruebas experimentales.....	54
Tabla 3	Condiciones de la prueba experimental .....	54
Tabla 4	Análisis de malla de la primera prueba.....	55
Tabla 5	Resultados de las 11 pruebas experimentales .....	56
Tabla 6	Análisis de varianza para el porcentaje pasante a la malla 200 .....	57
Tabla 7	Análisis de varianza para los gramos en el tiempo pasante a la malla 200 .....	59

**ÍNDICE DE FIGURA**

Figura 1: Serie de tamiz 8" ASTM E11 .....	31
Figura 2: Tamiz vibratorio .....	32
Figura 3 Diagrama de proceso de clasificación .....	55
Figura 4 Curva de partición del pasante y retenido en la primera prueba .....	56
Figura 5 Diagrama de Pareto para el porcentaje pasante a la malla 200 .....	58
Figura 6 Diagrama de Pareto para gramos en relación del tiempo pasante a la malla200 .....	60

**ANEXO**

Anexo 1 localización.....	79
Anexo 2 Matriz de consistencia.....	80
Anexo 3 Análisis granulométrica P2 .....	81
Anexo 4 Análisis granulométrica P3 .....	81
Anexo 5 Análisis granulométrica P4 .....	82
Anexo 6 Análisis granulométrica P5 .....	82
Anexo 7 Análisis granulométrica P6 .....	83
Anexo 8 Análisis granulométrica P7 .....	83
Anexo 9 Análisis granulométrica P8 .....	84
Anexo 10 Análisis granulométrica P9 .....	84
Anexo 11 Análisis granulométrica P10 .....	85
Anexo 12 Análisis granulométrica P11 .....	85

## RESUMEN

El objetivo fue determinar si el control de la amplitud, el tiempo y el peso en una tamizadora Ro-Tap mejoraba la precisión (porcentaje de material que pasa a través de la malla de 200) y la velocidad (g/min) al clasificar un mineral de cobre. Para ello, se llevó a cabo una investigación aplicada y experimental con un diseño factorial  $2^3$ . El mineral, triturado a malla 10 y secado durante 12 horas a 105 °C, se tamizó con la serie ASTM, con la malla 20 a 400, bajo nueve combinaciones: 14, 16 y 18 minutos; 0,4, 0,6 y 0,8 mm/g; y 200, 300 y 400 g, incluyendo tres réplicas centrales. La condición óptima (18 min, 0,8 mm/g y 400 g) alcanzó un 25,36 % de finos y 5,78 g/min, superando el 3,77 % y 0,54 g/min de la combinación mínima. El ANOVA puso de manifiesto que la amplitud influye de forma significativa en la precisión ( $p = 0,009$ ) y, junto con el peso, en la velocidad ( $p = 0,026$ ), mientras que el tiempo no tuvo un efecto aislado ( $p > 0,05$ ). El modelo de regresión explicó el 98,4 % de la variabilidad de los finos y el 98,9 % del rendimiento, lo que demuestra la solidez estadística del experimento. Se concluye que la amplitud significativa ( $p < 0,01$ ) y el peso en la velocidad confirmaron que un control preciso del Ro-Tap mejora simultáneamente la precisión granulométrica y la productividad de la clasificación del cobre.

**Palabra clave:** Ro-Tap, granulometría, amplitud, eficiencia.

## ABSTRACT

The objective was to determine if controlling amplitude, time and weight on a Ro-Tap sieve shaker improved the accuracy (percentage of material passing through the 200 mesh) and speed (g/min) when classifying a copper ore. For this purpose, an applied and experimental investigation was carried out with a  $2^3$  factorial design. The ore, crushed at 10 mesh and dried for 12 hours at 105 °C, was sieved with the ASTM series, with 20 to 400 mesh, under nine combinations: 14, 16 and 18 min; 0.4, 0.6 and 0.8 mm/g; and 200, 300 and 400 g, including three central replicates. The optimum condition (18 min, 0.8 mm/g and 400 g) achieved 25.36 % fines and 5.78 g/min, exceeding the 3.77 % and 0.54 g/min of the minimum combination. ANOVA revealed that amplitude significantly influenced precision ( $p = 0.009$ ) and, together with weight, speed ( $p = 0.026$ ), while time had no isolated effect ( $p > 0.05$ ). The regression model explained 98.4 % of the variability of the fines and 98.9 % of the yield, demonstrating the statistical robustness of the experiment. It is concluded that the significant amplitude ( $p < 0.01$ ) and weight on velocity confirmed that precise control of the Ro-Tap simultaneously improves granulometric accuracy and copper grading productivity.

**Keyword:** Ro-Tap, granulometry, amplitude, efficiency.

## INTRODUCCION

La preparación granulométrica eficiente de los minerales es un paso crítico para maximizar la recuperación metalúrgica en los circuitos de trituración, molienda y concentración. En los yacimientos de cobre, la presencia de distribuciones de tamaño inadecuadas provoca pérdidas de cobre liberado y una sobrecarga innecesaria en las etapas posteriores, lo que afecta directamente a los costes operativos y a la rentabilidad del proceso. La forma tradicional de clasificar partículas en el laboratorio ha sido mediante el tamizado manual o con equipos de baja repetitividad. Esto ha resultado en una alta dispersión de los resultados, lo que ha llevado a retrasos en la obtención de datos y en las decisiones en planta que se toman basándose en información poco fiable.

Con el fin de afrontar este dilema, el presente análisis sugiere examinar minuciosamente la tamizadora mecánica Ro-Tap como instrumento para potenciar la exactitud y la celeridad de la categorización de partículas de un mineral sulfurado de cobre. La investigación se fundamenta en la teoría de que una supervisión apropiada de la amplitud de vibración, el tiempo de funcionamiento y la masa de alimentación posibilita la obtención de una distribución granulométrica más uniforme en menos tiempo, lo que aumenta la confiabilidad de los exámenes y la productividad del laboratorio.

Para comprobar esta idea, se hizo un estudio con un diseño factorial 2<sup>3</sup>. Este diseño combina tres niveles de cada variable operativa y mide su efecto sobre dos respuestas importantes: el porcentaje de material que pasa a través de la malla 200 y el rendimiento en gramos por minuto. La selección de los factores y niveles se fundamenta en las especificaciones de los fabricantes de tamizadores y en los criterios de vacío establecidos en la literatura especializada, tanto a nivel nacional como internacional, sobre los métodos de clasificación vibratoria de la mineralogía del cobre.

El propósito de la investigación es crear pautas prácticas que posibiliten la normalización de los procesos de preparación granulométrica en plantas y laboratorios metalúrgicos, con el objetivo de disminuir el error analítico, el tiempo de prueba y, en consecuencia, los gastos relacionados. El objetivo es también mostrar que la tamizadora Ro-Tap es una buena opción en comparación con los métodos tradicionales y que se pueden hacer prácticas más sólidas y que cumplan con lo que pide la industria moderna.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción de la realidad problemática.

La minería del cobre siempre tiene el problema de mejorar cómo separa y analiza los minerales para sacarlos de la mejor forma posible. La calidad del producto final, los costes operativos y la productividad general de la planta procesadora se ven afectados directamente por la precisión en la clasificación de las partículas (Wills & Finch, 2016).

El sistema Ro-Tap ha sido desarrollado como un método de clasificación granulométrica que representa un avance significativo en los métodos establecidos de tamizado. Este sistema ofrece una combinación de movimientos que hace posible una clasificación tanto más eficiente como reproducible de esas partículas para las que se ha buscado un uso concreto en el procesamiento de minerales (ASTM International, 2021). El procesamiento de minerales de cobre se ve notablemente favorecido por la implementación de este sistema, ya que la distribución del tamaño de las partículas es un factor determinante en las etapas posteriores de concentración y refinación (Gupta & Yan, 2016).

En el contexto mundial actual de extracción de minerales, donde el consumo global de cobre continúa creciendo y los depósitos muestran leyes cada vez más bajas, es crucial considerar estrategias que promuevan la eficiencia y la sostenibilidad en la extracción y procesamiento de este material (World Copper Council, 2023). Es fundamental optimizar los sistemas de clasificación. La utilización de la tecnología Ro-Tap no solo garantiza una mayor exactitud en la clasificación de partículas, sino que también puede aumentar la rapidez del procesamiento, lo que podría generar beneficios significativos en términos económicos y operativos (Sbárbaro & Del Villar, 2010).

Esta investigación se centra en el análisis y evaluación del rendimiento de los sistemas Ro-Tap en la clasificación de partículas de minerales de cobre, con especial énfasis en la mejora de la precisión y velocidad del proceso. El estudio aborda tanto los aspectos técnicos de la operación como su impacto en la eficiencia global del proceso minero (King R. P., 2012).

Por lo que es necesario que los estudios realizados de clasificación sean un trabajo precisa y eficiente que reflejen los datos realizados a nivel laboratorio reflejen lo que ocurre a nivel industrial por lo que plantea el trabajo de investigación con el tema “clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para mejorar la precisión y velocidad” del equipo se encuentre en el laboratorio de Ingeniería Metalúrgica.

## **1.2 Formulación del problema.**

### **1.2.1 Problema general.**

¿Será factible la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para mejorar la precisión y velocidad?

### **1.2.2 Problemas específicos.**

¿En qué medida el peso alimentado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200?

¿En qué medida la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200?

¿En qué medida el tiempo empleado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap mejora el efecto en la eficiencia?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 *Objetivo general.***

Evaluar la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para ver cómo mejorar la precisión y velocidad.

#### **1.3.2 *Objetivo específico***

Evaluar en qué medida el peso alimentado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.

Evaluar en qué medida la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.

Evaluar en qué medida el tiempo de la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap mejora el efecto en la eficiencia.

### **1.4 Justificación de la investigación**

Se justifica desde múltiples dimensiones, cada una de las cuales contribuye a un entendimiento más integral de la importancia de la clasificación de minerales en la minería moderna. Esta investigación no solo aborda problemas técnicos y operativos, sino que también tiene implicaciones sociales, ambientales y económicas, lo que la convierte en un aporte valioso para el campo.

Desde una perspectiva teórica, la categorización de partículas constituye un procedimiento significativo en el ámbito de la minería y el procesamiento de minerales. La teoría subyacente a la categorización se fundamenta en principios físicos y químicos que influyen en la conducta de las partículas en diversos ambientes. Usar sistemas Ro-Tap en este método facilita una comprensión más exhaustiva de los factores que afectan a la división de partículas, lo que ayuda a crear teorías más sólidas sobre su conducta. Se prevé que los resultados de esta investigación conduzcan a

nuevos hallazgos sobre el comportamiento de las partículas de cobre, un mineral de suma importancia en el ámbito industrial.

En el terreno práctico, la implementación de sistemas Ro-Tap en la categorización de partículas de cobre tiene un efecto inmediato en la eficacia del proceso minero. La optimización de la recuperación del mineral, la reducción del tiempo de procesamiento y la minimización de los costes operativos son algunos de los beneficios que se esperan obtener al mejorar la precisión y la velocidad de la separación. Este estudio proporcionará una metodología práctica para que las empresas mineras puedan implementar y mejorar su competitividad en un mercado global que presenta desafíos cada vez mayores.

En cuanto al enfoque metodológico, la metodología que se ha usado en esta tesis se basa en un enfoque experimental que permite la validación de hipótesis a través de la recolección y el análisis de datos. La utilización de sistemas Ro-Tap como instrumento de categorización brinda un esquema normalizado para valorar distintas variables, como el tamaño de las partículas y la rapidez de funcionamiento. Esta perspectiva metodológica no solo asegura la replicabilidad de los resultados, sino que además es posible ajustarla a otros escenarios dentro del procesamiento mineral.

Desde una perspectiva técnica, la aplicación de sistemas Ro-Tap para la categorización de partículas de cobre constituye una mejora notable en el ámbito de la tecnología de separación. Estos sistemas se caracterizan por su habilidad para ofrecer resultados que son siempre similares y exactos. Optimizar la técnica de clasificación tiene beneficios múltiples. Por un lado, mejora la recuperación de mineral. Por otro, reduce los fallos operativos y aumenta la vida útil de los equipos.

En el ámbito social, el aumento de la eficacia en el proceso de clasificación de minerales no solo es favorable para las compañías mineras, sino que también tiene un efecto social positivo. El aumento de la producción de cobre puede traducirse en más puestos de trabajo y en el crecimiento económico de las comunidades vecinas a las explotaciones mineras, siempre y cuando se optimicen los procesos de extracción. Además, si se usan mejor los recursos de la naturaleza, se necesitará menos explotación, lo que ayudará a cuidar el medio ambiente local.

En cuanto al respeto al medio ambiente, la utilización de sistemas Ro-Tap para la clasificación de minerales también tiene un impacto positivo. Al incrementar la exactitud en la división de partículas, disminuye la cantidad de residuos generados durante el procesamiento. Este enfoque no solo mitiga el impacto ambiental de las operaciones mineras, sino que también fomenta prácticas más sostenibles en el sector. Asimismo, un aprovechamiento más eficaz de los recursos contribuye a la preservación de los ecosistemas circundantes.

Finalmente, desde el punto de vista económico, la optimización en la clasificación de partículas de cobre puede traducirse en ahorros significativos para las empresas mineras. La mejora en la velocidad y precisión de la separación puede resultar en una reducción de costos operativos y un aumento en la rentabilidad. Este estudio puede servir como base para futuras investigaciones que busquen innovaciones en el campo de la minería, contribuyendo al crecimiento económico del sector.

## **1.5 Delimitación del estudio**

### ***1.5.1 Delimitación de territorio***

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Huacho, ubicada en la provincia de Huaura en la región de Lima Provincia, Perú, específicamente en las instalaciones de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Esta ubicación nos permite ubicar al laboratorio de Preparación

mecánica de minerales y geometalurgia con coordenada latitud 11°7'34.06"S, longitud 77°36'33.15"O (google earth pro, 2025), donde se encuentran los equipos adecuados para realizar los experimentos de clasificación de minerales. El laboratorio, está situada a aproximadamente a 30 metros sobre el nivel del mar, presenta un entorno geográfico con una temperatura promedio que oscila entre 18°C y 25°C (Weather Spark, 2025), una humedad relativa de aproximadamente 75% y una presión atmosférica promedio al alrededor de 1013 hPa (Tablademareas, 2025).

### **1.5.2 *Delimitación tiempo y espacio.***

El estudio se desarrollará a lo largo de seis meses durante el 2025, lo que permitirá una recolección de datos exhaustiva y un análisis detallado de los resultados, asegurando que se aborden adecuadamente las variables que afectan la clasificación de partículas de cobre.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### ***2.1.1. Investigación internacional***

Entre los trabajos realizados sobre la clasificación, para Lv y otros (2023) en su artículo sobre “Mejora del proceso de clasificación y recuperación de partículas minerales finas mediante un hidrociclón con alimentación de voluta de nuevo desarrollo”, depositado en la página Reseach squere, es una investigación experimental en los que se realizaron una evaluación de alimentación de voluta del clasificación de partículas finas de relaves de hierro en un hidrociclón convencional y una simulación numérica experimental, con la finalidad de evaluar algunos parámetros de operación como flujo de alimentación, movimiento de partícula y rendimiento de la clasificación. Como resultado de la evaluación se obtuvieron mediante el analizador laser de tamaño de partícula del SEM, la nueva estructura de alimentación voluta demostró ser más eficiente que los alimentadores de hidrociclones tradicionales, reduciendo la turbulencia y mejorando la clasificación de partículas entre 10% a 18%. Los ajustes en los parámetros operativos como diámetro y presión aún más el rendimiento, sentando las bases para el desarrollo de futuros hidrociclones mejorados. Concluyendo que el alimentador voluta del hidrociclón mejora significativamente la eficiencia de clasificación de partículas de mineral finas, optimizando el proceso y estableciendo las bases para un futuro desarrollo de hidrociclones.

La vibración para, Yu y otros (Yu y otros, 2024) en el trabajo respecto a “Investigación sobre la mejora de la clasificación de material húmedo mediante cribado elástico de intensidad de vibración variable”, el artículo se encuentra publicado en la página del elsevier, es una investigación experimental, donde se emplean una zaranda vibratoria que tiene un sensor de

aceleración con cámara de alta velocidad y una computadora. Como resultado se obtuvieron que la superficie de la zaranda logra una elasticidad de vibración que supera la adhesión de material húmeda, resolviendo la acumulación del material y alcanzando una eficiencia de clasificación máxima de 10 t/h.m<sup>2</sup>. concluyendo que los parámetros de amplitud, frecuencia y la velocidad de alimentación afectan significativamente en el rendimiento de la clasificación elástica con una vibración variable.

Referente a la clasificación de tipo de minerales Shanmugam y otros (2023) en el artículo denominado “Análisis experimental de la eficiencia de la criba vibratoria en función de la variación de la densidad para el cribado de carbón y mineral de hierro”, publicado en Taylor & Francis, este trabajo se realizó experimentalmente para la comprobación de la clasificación de mineral de carbón y hierro. Donde el mineral de carbón y mineral de cobre se llevaron a una zaranda vibratoria para ver la eficiencia de clasificación en relación a la vibración de mineral humedad y densidad. Los resultados que obtuvieron de las pruebas experimentales de la zaranda vibratorio permitieron una alta recuperación de minerales fino y alta eficiencia de clasificación para minerales de hierro en comparación del carbón. La alta eficiencia se obtiene para el mineral de hierro con un ángulo de pendiente entre los 3 grados a 5 grados, mientras que para los minerales de carbón se tiene un pendiente de 1 grado. Concluyendo que la zaranda vibratoria es más eficiente para minerales de hierro que para minerales de carbón, permitiendo una alta recuperación de minerales finos.

### ***2.1.2. Investigación nacional.***

En el trabajo realizado por Rodríguez (2024) respecto a “Simulación DEM de una zaranda vibratoria para mejorar la eficiencia de selección de partículas en la gran minería peruana”, publicado en la página del repositorio de la Universidad del Centro del Perú, es un trabajo experimental, la información de datos se obtuvo del proceso real luego se llevaron a la evaluación donde la desviación de los finos en el overflow tenía una eficiencia del 82.04%, en base a ello se realizaron una investigación experimental mediante el método de elementos discretos (MED) para la zaranda vibratoria. Para ello se recopilaron datos de la zaranda como la geometría, mediante el escaneo en 3D, parámetro de operación y partículas, el procesamiento de dato se realizó mediante la estadística descriptiva, la simulación mediante Rocky DEM, procesamiento de nubes de punto mediante Fro Scene 3D, mientras que para ingeniería inversa la Geomagic Desing X. obteniendo como resultado el incremento de la eficiencia de la zaranda vibratoria en un promedio de 86.37%. concluyendo que el enfoque integral mejora significativamente la producción.

Para Ticona (2024) en su aporte de investigación respecto a “Incremento de la productividad parcial del trabajo evaluando la configuración de aberturas de la superficie de cribado de una zaranda vibratoria de clasificación húmeda instalada en una planta industrial de concentración de minerales” publicado en el página de la Universidad Continental, es una investigación no experimental, donde se estudia el incremento de la producción para ello se tiene dos propuesta para el caso del proveedor A con 873.921 t/h del segundo proveedor B a 996.218 t/h, teniendo un incremento de 14%. La mejor propuesta recae en la propuesta B con un incremento de 55 a 62 mil t/d, que representa un aumento de 7 mil t/d por una modificación de los paneles de la malla de 6 mm a 8mm, lo que lo hace factible. El material de fabricación para este material tiene diferentes durezas al ser fabricado con poliuretano lo que permite 6 beses el cambio con una

operación 60 días sin ninguna interrupción. Resultado que el material empleado no permite pasar material mayor a 8 mm y el empleo de software permite ajustar el rendimiento del molino de bolas, lo que mejora la granulometría del mineral y su eficiencia del molino. En lo económico tiene un VAN de S/. 77 010 112.96 con una TIR de 35.64%, lo que lo hace viable el proyecto. Concluyendo el proveedor B con sus paneles de la malla es viable y rentable, por su incremento de su productividad y su factibilidad económica.

En la evaluación de tamaño para Alca (2021) en su “Informe técnico de evaluación de hidrociclones para mejora en el desempeño de circuitos de molienda”, almacenado en su repositorio de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, donde el trabajo pertenece a una investigación no experimental, con fines de mejorar la molienda y clasificación empleando hidrociclón con núcleo de aire reforzado, en base a la información recopilado del proceso antes y después, se obtuvieron los resultados en un incremento de 7.17 t/h (+1.19%), respecto al tonelaje real que se procesa, respecto a la presión de clasificación se incrementa en un 18.34% en promedio de 1.2 PSI, la energía disponible del molino se incrementa en un 4.14%, mientras que el P(80) incrementa en 5  $\mu\text{m}$  en relación de las real. Concluyendo que logro incrementar en 7.17 t/h toneladas métricas por hora con una producción de cobre fino de 241055 libras (p. 62).

## **2.2. Bases teóricas.**

### **2.2.1. La clasificación de partículas de minerales de cobre.**

La clasificación de partículas de mineral en el procesamiento de minerales de cobre influye en la eficiencia y efectividad de la recuperación de metales. Este proceso es vital para optimizar las etapas posteriores de procesamiento, como la flotación y lixiviación, ya que permite separar las partículas según su tamaño y características físicas. Garantizar la correcta clasificación de las partículas de mineral valioso es esencial para asegurar un tratamiento adecuado de dichas partículas. Esto, a su vez, resulta en un aumento de la recuperación del cobre y en una reducción del desperdicio de recursos ( Iriarte Dávila y otros, 2022); (Ramos Armijos & Calderón Celis, 2022). La clasificación es importante porque ayuda a que los minerales se liberen mejor mientras se procesan. De acuerdo con Dávila y otros autores, la caracterización de los componentes mineralógicos y el nivel de liberación son aspectos fundamentales para la recuperación de minerales de cobre. Una clasificación apropiada permite optimizar la exposición de las partículas valiosas a los reactivos utilizados en los procesos de flotación ( Iriarte Dávila y otros, 2022). El enfoque geometalúrgico propuesto por Armijos ofrece un método para cuantificar la variabilidad geológica, facilitando una planificación y ejecución más eficiente de las operaciones mineras (Ramos Armijos & Calderón Celis, 2022). Esto significa que el proceso metalúrgico es más eficiente y los costos operativos bajan. No obstante, los enfoques convencionales de clasificación se ven confrontados por múltiples obstáculos y restricciones. Una de las cuestiones más relevantes que se plantean es la variabilidad en el tamaño y la forma de las partículas, lo cual puede repercutir en la exactitud de la clasificación (Valderrama y otros, 2022). Los procedimientos más usados, como la separación mediante zaranda vibratoria, no siempre son prácticos para partículas extremadamente finas o ultrafinas, ya que estas tienden a comportarse de manera distinta en lo que

respecta a su acumulación y separación (Mamani-Quispe y otros, 2022). Esta circunstancia puede acarrear una escasa recuperación de minerales de alto valor y la merma de recursos financieros. La capacidad de adaptarse a las características individuales de los minerales de cobre, que pueden diferir significativamente entre depósitos, es otro desafío importante. La clasificación y el procesamiento de los pórfidos de cobre, que son minerales, requieren un enfoque más complejo debido a su naturaleza compleja (Espinoza S. y otros, 2021) ; (Kenji, 2023). La aplicación de tecnologías de vanguardia, tales como la clasificación por imagen y el modelado matemático, puede resultar onerosa y demandar una formación especializada (López Martínez y otros, 2023). La clasificación de las partículas es, por tanto, un componente indispensable en el tratamiento de minerales de cobre, lo que repercute directamente en la recuperación y en la eficiencia operativa. A pesar de los avances en la tecnología de clasificación, los métodos tradicionales aún enfrentan limitaciones que deben ser abordadas para mejorar la sostenibilidad y rentabilidad de la minería de cobre.

### **2.2.2. Fundamentos de los sistemas de clasificación de minerales.**

La clasificación, consiste en separar mezclas de minerales en dos o más grupos basados en la velocidad de caída de las partículas a través de un medio fluido, que puede ser líquido o gas (Heiskanen, 1993).

La separación de partículas minerales mediante cribado o zarandas industriales suele emplearse para clasificar tamaños que van desde 300 mm hasta aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ . No obstante, la eficiencia de este proceso disminuye considerablemente a medida que se reduce el tamaño de las partículas. Por lo general, el cribado en seco se utiliza para materiales mayores a 5 mm, mientras que el cribado en húmedo es más habitual para partículas de hasta 250  $\mu\text{m}$  (Wills & Finch, 2016, p. 181). En el ámbito del procesamiento de minerales, este medio suele ser agua,

por lo que la clasificación húmeda se utiliza principalmente para partículas muy finas (menores a 200  $\mu\text{m}$ ), las cuales no pueden ser separadas eficientemente.

El procesamiento de minerales está en relación a las principales características del cribado de minerales incluyen:

- El cribado es un método de clasificación por tamaño, donde se producen productos clasificados por grado (Balasubramanian, 2015).
- Los tamices vibratorios son uno de los dispositivos de cribado más comunes en las aplicaciones de procesamiento de minerales (Grewal, 2006).
- El cribado se utiliza para separar los elementos más gruesos de los más finos en el procesamiento de minerales (Bustillo Revuelta, 2018).
- El cribado en seco a gran escala es un método importante en el procesamiento de minerales, como se demuestra en un estudio de caso con espodumeno (Weinan y otros, 2022).
- El cribado se utiliza como una etapa de separación en los circuitos de molienda húmeda en el procesamiento de minerales (Whitworth y otros, 2022).

El cribado o clasificación de minerales es un proceso muy importante en el procesamiento de minerales, que son utilizado para clasificar y separar los materiales por tamaño, lo que permite una mayor eficiencia en las etapas posteriores del procesamiento de los minerales deseados.

#### ***2.2.2.1.Principio de funcionamiento del sistema de clasificación.***

El cribado y el tamizado son métodos de separación mecánica de partículas basados en el tamaño, utilizando superficies perforadas. En el cribado, partículas más grandes que las aberturas se retienen, mientras que las más pequeñas pasan a través de la superficie. El material retenido se clasifica como sobremedida y el que pasa, como infra tamaño. El cribado es un proceso continuo

y se usa en la industria, mientras que el tamizado es intermitente y se aplica para pruebas. Ambos procesos, aunque similares, rara vez logran una separación perfecta, dejando algunas partículas de subtamaño en la fracción de sobremedida (Kelly & Spottiswood , 1990, p. 195).

El cribado es una parte fundamental del procesamiento de minerales, ya que se utiliza para separar y clasificar los minerales por tamaño (Pryor, 2012). El proceso de cribado utiliza tamices vibratorios y otros equipos de clasificación para dividir los minerales en diferentes fracciones de tamaño (Bustillo Revuelta, 2018). Esto permite separar los elementos más gruesos de los más finos, lo que es crucial para las etapas posteriores del procesamiento de minerales (Balasubramanian, 2015). Además, el cribado se utiliza como una etapa de separación en los circuitos de molienda húmeda y seca, lo que mejora la eficiencia general del procesamiento de minerales (Chuanyao & Kuangdi, 2023). Por lo tanto, el cribado y la clasificación son procesos muy importantes en el procesamiento de minerales, ya que permiten separar y preparar los minerales por tamaño para su posterior tratamiento.

#### **2.1.1.1.1. Clasificación a nivel laboratorio.**

Las especificaciones de los productos establecen los tamaños de los materiales en términos de porcentajes que deben atravesar aberturas de tamiz estándar, las cuales pueden ser de alambre tejido o de placa perforada. Un tamiz de laboratorio está compuesto por una superficie de tamizado montada en un marco cilíndrico, con aberturas que varían entre 20 y 90  $\mu\text{m}$  (con una tolerancia de  $\pm 2 \mu\text{m}$ ) para partículas pequeñas. Las muestras se depositan en la parte superior y se someten a un movimiento mecánico que permite la separación de las fracciones según su tamaño. El tamaño promedio de las partículas que quedan retenidas se calcula utilizando la media aritmética de las aberturas de los tamices contiguos. Es fundamental tener en cuenta que el tamaño es solo nominal y relevante si las partículas presentan una forma uniforme. Además, las series de tamices están

diseñadas para seguir una progresión geométrica en los tamaños de las aberturas, dando prioridad a la especificación de la abertura frente al número de malla (Kelly & Spottiswood , 1990).

#### 2.1.1.1.2. Serie de tamices.

Las series de tamices más relevantes se basan en conceptos específicos. La serie de tamices U.S. utiliza telas con aberturas cuadradas de 1 mm, cuyas dimensiones siguen una relación de  $\sqrt[4]{2}$ . Las aberturas mayores a 1 mm se expresan en milímetros, y las inferiores en micrómetros, pudiendo tener también designaciones alternativas. La serie internacional de tamices para pruebas, recomendada por la ISO, corresponde a la serie U.S. Por otro lado, la serie Tyler clasifica las telas por malla, comenzando con una abertura de 0.0029 pulgadas (74  $\mu\text{m}$ ) y un diámetro de alambre de 0.0021 pulgadas (53  $\mu\text{m}$ ). Esta serie tiene 200 aberturas por pulgada lineal y sigue una relación de  $\sqrt{2}$ , y existe una "serie doble" que utiliza relaciones de  $\sqrt[4]{2}$ . Finalmente, la serie británica estándar se ajusta a normas británicas, permitiendo que sus aberturas sean intercambiables con otras series, a pesar de tener diferentes designaciones de malla (Han & Fuerstenau, 2003, p. 125).



Figura 1: Serie de tamiz 8" ASTM E11

### 2.1.1.1.3. Vibradores de tamices.

Las máquinas de tamizado modernas facilitan el proceso y ofrecen resultados más consistentes al combinar un movimiento circular y oscilante. Estos movimientos ayudan a que las partículas se expongan a las aberturas del tamiz, aunque aún pueden producirse cegamientos, especialmente si el material acumulado es mayor a unas pocas partículas. Para lograr resultados precisos, es crucial que la cantidad de material retenido en cada tamiz no exceda este límite. Sin embargo, al no haber un criterio claro para determinar el final del tamizado, se suele trabajar con tiempos preestablecidos. Para mayor exactitud, es recomendable calibrar los tamices, ya que las dimensiones pueden variar debido a las tolerancias de fabricación (Kelly & Spottiswood , 1990).



Figura 2: Tamiz vibratorio

### ***2.2.2.2. Tipos de tamices y configuraciones utilizadas en la clasificación de minerales de cobre***

En la clasificación de minerales se emplean una serie de tamices como: tamices vibratorios, de alta frecuencia, rotativos y trómeles, malla tejido y zaranda multifrecuencia. Los tipos de tamices y configuraciones más utilizados en la clasificación de minerales de cobre incluyen los tamices vibratorios circulares, lineales y multi-frecuencia, los tamices de vaivén, los tamices con múltiples pisos y los tamices de alta frecuencia e inclinados vibratorios.

- Tamices vibratorios circulares y lineales: Estos tamices vibratorios pueden alcanzar rangos de clasificación fina y muy fina.
- Tamices de vaivén (flip-flop): Este tipo de tamiz también se utiliza para la clasificación fina y muy fina de minerales (Achim, 2010).
- Tamices vibratorios multi-frecuencia (MVG): Estos tamices se utilizan como el aparato central en las tecnologías de enriquecimiento de minerales de cobre (Shevchenko y otros, 2019).
- Tamices vibratorios con múltiples pisos: Los tamices vibratorios pueden fabricarse con más de un piso de pantalla, lo cual es común en aplicaciones de minerales de hierro y cobre (Jankovic, 2022).
- Tamices de alta frecuencia: Estos tamices se utilizan en circuitos de molienda cerrada para el control del tamaño máximo de partículas que salen del circuito, especialmente en el procesamiento de minerales de cobre (Albuquerque y otros, 2018).
- Tamices inclinados vibratorios: Este tipo de tamiz es común en el procesamiento de minerales que contienen cantidades económicas de cobre, plomo y zinc (Bustillo Revuelta, 2018).

### 2.2.3. Mejora de la precisión en la clasificación de partículas.

#### 2.2.3.1. Factores que influyen en rendimiento de clasificación.

La eficacia de una criba está ligada a su capacidad, ya que es posible lograr una separación casi completa con una alimentación lenta y un tiempo prolongado de cribado. La eficacia depende de la naturaleza del proceso, que se puede entender como una serie de eventos probabilísticos. Cada vez que una partícula llega a la criba, tiene una probabilidad específica de pasar a través de la abertura. Este enfoque probabilístico se aplica especialmente al considerar partículas esféricas y sus interacciones con las aberturas del tamiz (Wills & Finch, 2016). Donde la probabilidad( $p$ ) de que una partícula( $d$ ), tiene la posibilidad de atravesar una abertura cuadrada  $x$  que se encuentra delimitada de un alambre de diámetro  $w$ , en un solo momento dado.

$$p = \left( \frac{x - d}{x + w} \right)^2$$

Definiendo que la fracción de la abertura del área abierta  $f_0$  esta por:

$$f_0 = \frac{x^2}{(x + w)^2}$$

$$p = f_0 \left( 1 - \frac{d}{x} \right)^2$$

La probabilidad de que pase  $n$  presentaciones se podría calcular por:

$$p' = (1 - p)^n$$

El rendimiento del cribado depende de dos tipos de factores: aquellos que afectan la probabilidad de que las partículas atraviesen la malla y aquellos que determinan cuántas veces tienen la oportunidad de hacerlo. Esto significa que tanto las características de las partículas como las condiciones del proceso influyen en la efectividad del tamizado.

Entre los factores que afecta el rendimiento de clasificación o tamizado del mineral se tiene el tamaño de partícula, velocidad de alimentación, ángulo de tamizado, forma de las partículas, área abierta, vibración, humedad y densidad de mineral (Wills & Finch, 2016).

#### **2.2.3.1.1. Tamaño de partículas.**

El cribado es más eficiente para partículas de tamaño grueso, mientras que las partículas finas son más difíciles de clasificar eficientemente mediante cribado (Bustillo Revuelta, 2018). Por otra parte, Taggart (1945) analizó las probabilidades de que partículas esféricas pasen a través de aberturas cuadradas, mostrando que a medida que el tamaño de la partícula se aproxima al de la abertura, la probabilidad de paso disminuye rápidamente. Esto impacta negativamente la eficacia global del cribado, ya que las partículas cercanas a la malla pueden obstruir las aberturas, reduciendo la superficie disponible. Este problema es común en cribas conectadas a trituradoras, donde la acumulación de material cercano a la malla disminuye la efectividad del proceso (Kelly & Spottiswood , 1990). Las características como la densidad, forma y tamaño de las partículas influyen en la eficiencia de separación durante el cribado (Jezsó y otros, 2023).

#### **2.2.3.1.2. Velocidad de alimentación**

El análisis granulométrico se basa en usar una baja masa de alimentación y un largo tiempo de cribado para lograr separaciones casi perfectas. Sin embargo, en la práctica industrial, se prefieren velocidades de alimentación más altas y tiempos de permanencia cortos, lo que provoca que los finos queden atrapados en el lecho de material. Esto resulta en una menor eficacia del cribado. Así, a menudo se debe encontrar un equilibrio entre alta capacidad y eficacia en la separación deseada (Wills & Finch, 2016). La velocidad de alimentación del material a cribar afecta la eficiencia de separación, siendo necesario encontrar un equilibrio entre la capacidad de procesamiento y la eficiencia de clasificación (Gülcan & Gülsoy, 2017).

### **2.2.3.1.3. Ángulo de tamizado**

Cuando una partícula se aproxima a la abertura de un tamiz en un ángulo poco profundo, percibe una dimensión efectiva más estrecha, lo que reduce la probabilidad de que partículas cercanas a la malla pasen. La inclinación de la superficie de cribado influye en este ángulo y puede utilizarse para lograr separaciones más finas que el tamaño de la abertura. Para maximizar la eficacia del tamizado, se prefieren tamices horizontales, ya que el ángulo de cribado también afecta la velocidad de las partículas y su tiempo de permanencia, incrementando las oportunidades de pasar. Las cribas con pendiente variable, como los tamices en forma de plátano, ayudan a aumentar el caudal (Han & Fuerstenau, 2003).

### **2.2.3.1.4. Forma de las partículas**

La mayoría de las partículas en los materiales granulares no son esféricas, lo que afecta su capacidad para pasar a través de las cribas. A diferencia de las esféricas, las partículas irregulares deben orientarse adecuadamente para atravesar las aberturas. Formas alargadas y planas, como la mica, presentan una baja eficacia de cribado, ya que tienden a "sobre poner" sobre las aberturas en cribas de forma cuadrada (Han & Fuerstenau, 2003).

### **2.2.3.1.5. Área abierta**

La probabilidad de que una partícula pase a través de una abertura en una criba está relacionada con el porcentaje de área abierta en la malla. Este porcentaje se calcula comparando el área neta de las aberturas con el área total de la superficie de cribado. Cuanto menos material ocupe la superficie de cribado, mayor será la probabilidad de que las partículas logren atravesar las aberturas. Sin embargo, a medida que se utilizan aberturas más finas, el área abierta tiende a disminuir. Para mejorar esta área en cribas finas, se recurren a alambres delgados y frágiles, aunque

esto trae consigo problemas de fragilidad y capacidad de paso. Por ello, los clasificadores son a menudo preferidos en lugar de las cribas finas (Wills & Finch, 2016).

#### **2.2.3.1.6. Vibración**

Las cribas vibratorias utilizan la vibración para mover las partículas a lo largo de la superficie de cribado y permitir que se muevan nuevamente las aberturas. Este movimiento induce la estratificación del material, permitiendo que las partículas finas se desplacen hacia la superficie, mientras que las más grandes quedan arriba. La vibración debe ser controlada; si es insuficiente, puede provocar obstrucciones, pero si es excesiva, las partículas pueden rebotar demasiado y perder oportunidades de pasar. Las cribas con aberturas más grandes suelen requerir amplitudes de vibración mayores y frecuencias más bajas, mientras que para aberturas finas se prefieren amplitudes pequeñas y frecuencias altas (Wills & Finch, 2016). La intensidad de vibración esta relacionado por la fuerza  $g$  de vibración( $\Gamma$ ). Donde intervienen la amplitud( $a$ ), velocidad( $v$ ).

$$\Gamma = \frac{a(2\pi v)^2}{9.81}$$

Las fuerzas de vibración oscilan entre 3 y 7 veces la aceleración gravitatoria, y los excitadores que generan estas vibraciones son generalmente motores eléctricos. La energía requerida para operar estas cribas es relativamente baja en comparación con otras operaciones en un concentrador.

Esto nos conlleva que los factores como el tipo de criba, la frecuencia y amplitud de vibración, y la configuración del sistema de accionamiento afectan el rendimiento del cribado (Boitumelo y otros, 2017).

#### **2.2.3.1.7. Humedad**

La humedad superficial en los materiales de alimentación influye en la eficacia del cribado, especialmente cuando hay arcillas y otros materiales pegajosos. Las piensas húmedos tienden a

aglomerarse y obstruir las aberturas de la criba. En general, el cribado en seco con aberturas menores a 5 mm requiere que el material esté completamente seco, a menos que se implementen medidas especiales, como cubiertas calentadas para romper la tensión superficial del agua, plataformas de bolas para añadir vibración, o telas de cribado que no se obstruyan. El cribado húmedo, por otro lado, permite procesar partículas más finas, incluso por debajo de 250  $\mu\text{m}$ , ya que las partículas adheridas se lavan y el tamiz se limpia con un flujo de pulpa y agua adicional. A medida que aumenta la humedad y el contenido de partículas finas, se requieren mayores fuerzas de cribado para lograr una separación eficiente (Achim, 2010).

#### ***2.2.3.2. Factores que afectan la precisión de la clasificación.***

El rendimiento del cribado de minerales es un aspecto crítico en la minería y la metalurgia, y está influenciado por diversos factores que pueden afectar la eficiencia y efectividad del proceso. Entre estas variables se incluyen la naturaleza mineralógica, las particularidades físicas de los minerales, la tecnología utilizada en el proceso de cribado y las variaciones ambientales. El rendimiento del proceso depende en gran medida de la composición mineralógica de los minerales a cribar. Los minerales, al ser compuestos de diferentes elementos químicos, pueden presentar propiedades físicas variables, como su densidad y el tamaño de sus partículas. Esto puede requerir métodos de cribado distintos para que la recuperación de los minerales valiosos sea la más eficiente posible. Los que contienen minerales de óxido de cobre, por ejemplo, muestran ciertas características que se pueden utilizar en el proceso de extracción de metales a través del uso del agua. Esto resalta la importancia de analizar adecuadamente los minerales y las rocas que contienen metales, lo que se conoce como petrominegráfica, para así obtener la mayor cantidad posible de los minerales valiosos (Kenji, 2023). El rendimiento del cribado se ve afectado por las características físicas de los minerales, tales como la granulometría y la forma de las partículas. La

capacidad de separación de los minerales durante el proceso de cribado se ve influenciada por la distribución del tamaño de las partículas. Un análisis de la composición de minerales con alta concentración de metales pesados en sedimentos sugiere que la uniformidad en la distribución de partículas puede optimizar la eficacia del proceso de cribado, ya que facilita una separación más eficiente de los minerales deseados (Velásquez y otros, 2019). Es fundamental llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las características físicas de los minerales antes de poner en marcha un proceso de cribado. La tecnología que se utiliza en el cribado es otro factor determinante que influye en el proceso de selección. Usar máquinas modernas, como sistemas que separan automáticamente y técnicas de separación por gravedad, puede hacer que el proceso funcione mucho mejor. Sin embargo, no se encontraron referencias que apoyen la afirmación sobre la optimización de flujos de trabajo en laboratorios de cribado en el contexto de la minería, lo que hace necesario seguir investigando para encontrar dichas referencias y poder avanzar en el conocimiento de este campo (Conejero y otros, 2020). El rendimiento del cribado puede verse influido por las condiciones ambientales, tales como la humedad del suelo y la temperatura. El rendimiento del proceso de separación de minerales se ve afectado por una serie de factores interdependientes, tales como la composición mineralógica, las propiedades físicas de los minerales y la tecnología empleada. Entender y mejorar cómo funcionan estos factores es muy importante para que el proceso de cribado en la minería sea más eficiente y efectivo.

### ***2.2.3.3. Métodos para mejorar la exactitud del diseño del sistema Ro-Tap.***

La mejora de la exactitud en tamices vibratorios es un tema fundamental en la separación y categorización de materiales, sobre todo en el sector minero. Hay varias técnicas que se pueden usar para mejorar la eficacia de estos sistemas, como ajustar la velocidad de vibración, la carga de la muestra y el diseño del sistema de tamiz. Es crucial ajustar la velocidad de vibración para

optimizar la eficiencia del tamiz. Una celeridad de oscilación idónea posibilita que los elementos particulados se desplacen de manera ventajosa a través de la malla del tamiz, propiciando una segregación más eficiente. El rendimiento de una zaranda vibratoria se ve influido directamente por la excitación del sistema, como muestra la modelación dinámica del mismo (Moncada & Rodríguez, 2016). Un análisis adicional indica que la optimización del control de vibraciones puede lograrse mediante la implementación de algoritmos de optimización, tales como el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO), que facilita la adaptación dinámica de la velocidad para alcanzar resultados óptimos (Zuñiga-Peña y otros, 2022). La muestra a analizar también es un factor determinante que afecta la exactitud del tamiz vibratorio. Si la carga no es la adecuada, puede haber obstrucciones o un flujo de material ineficiente, lo que afecta la calidad de la separación. Es fundamental implementar protocolos claros para la carga de muestras, garantizando que se mantengan dentro de los límites óptimos para cada tipo de material. La investigación resalta la relevancia del tamaño del tamiz en el estudio de la micropartículas, lo que implica que el diseño y la configuración del sistema deben ser evaluados minuciosamente para garantizar resultados confiables (Hernández-Miranda y otros, 2021). La configuración del sistema de filtrado es otro factor que no debe ser pasado por alto. Un esquema efectivo no solo optimiza la eficiencia del proceso de filtrado, sino que además simplifica la conservación y la verificación del mecanismo. Como se indica en el estudio de Orozco y Ospino, la optimización estructural es clave para asegurar que el sistema opere de manera eficiente bajo distintas condiciones de funcionamiento (Orozco & Ospino, 2019). La aplicación de tecnologías de vanguardia, como la simulación por elementos finitos, facilita la identificación y corrección de errores en el diseño antes de iniciar la construcción de un sistema (Fuentes y otros, 2015). La optimización de la precisión en tamices vibratorios implica un enfoque integral que considera el ajuste de la velocidad

de vibración, la carga de muestra y el diseño del sistema. La aplicación de técnicas de optimización y el uso de herramientas avanzadas son estrategias efectivas para mejorar la precisión y la eficiencia de estos sistemas en la industria minera.

#### **2.2.4. Aumento de la velocidad de clasificación.**

En el proceso de clasificación de minerales por medio de criba o zaranda para aumentar la velocidad de clasificación de las zarandas vibratorias de minerales, se pueden tener en consideración las siguientes estrategias:

- Mejorar la eficiencia de clasificación: Las zarandas vibratorias en el procesamiento de minerales, y su eficiencia de clasificación es necesario, por ello es necesario considerar algunos factores clave que afectan la eficiencia incluyen el tamaño de apertura, la inclinación de la pantalla y la vibración (Bustillo Revuelta, 2018).
- Utilizar diseños de zarandas reconfigurables: Los diseños de zarandas vibratorias reconfigurables pueden mejorar la eficiencia al permitir ajustes en los parámetros clave como la apertura, la inclinación y el sistema de vibración (Ramatssetse y otros, 2023).
- Combinar la zaranda vibratoria con otros clasificadores: Acoplar la zaranda vibratoria con clasificadores de aire, tanto internos como externos, puede mejorar la eficiencia general del proceso de clasificación (Little, 2021).
- Optimizar los parámetros de operación: 156 Ajustar factores como la velocidad de vibración, la inclinación de la criba y el flujo de alimentación puede aumentar la eficiencia de clasificación de la zaranda (Grewal, 2006).

La mejora de la eficiencia de clasificación, el uso de diseños reconfigurables, la combinación con otros clasificadores y la optimización de los parámetros de operación son estrategias para aumentar la velocidad de clasificación de las zarandas vibratorias de minerales.

### **2.2.5. Sistemas Ro-Tap y clasificación práctica de partículas de minerales de cobre.**

La categorización de fragmentos de minerales de cobre mediante la implementación de sistemas Ro-Tap constituye una metodología sumamente empleada en el ámbito de la industria minera, con el propósito de optimizar la eficacia en el proceso de separación y examen de minerales. Este sistema, que emplea un desplazamiento de vibración tamizado combinado con un desplazamiento de rotación, posibilita una categorización más exacta y veloz de las partículas, lo cual es fundamental para la optimización de los procedimientos de extracción y procesamiento de minerales. La clasificación de partículas de minerales de cobre tiene una aplicación práctica muy importante: ayuda a que se recuperen más metales durante los procesos de lixiviación. La investigación ha demostrado que la eficiencia de la lixiviación se ve significativamente influida por el tamaño de las partículas. en los estudios hallaron que, al disminuir la dimensión de las partículas, se aumentaba la recuperación del cobre en un proceso de biolixiviación, debido a que se logra una mayor exposición a los agentes lixiviantes (Huarachi-Olivera y otros, 2017). Esto sugiere que un sistema Ro-Tap, al permitir una clasificación precisa de las partículas, puede optimizar la preparación del mineral para dichos procesos, aumentando así el rendimiento de la recuperación de cobre. La separación de partículas también es esencial para la caracterización mineralógica de los yacimientos de cobre. Gracias a las técnicas de análisis, es posible identificar las diferentes especies minerales presentes en un yacimiento, lo que resulta fundamental para diseñar estrategias de procesamiento adecuadas. Los estudios respecto a los minerales de óxido de cobre pueden ayudar a encontrar formas más eficientes de procesar el cobre la lixiviación (Kenji, 2023). Este tipo de análisis requiere fracciones de tamaño específico, que se pueden obtener con un sistema Ro-Tap. La clasificación de partículas tiene otra aplicación práctica: la optimización de la molienda y el procesamiento de minerales. Estudio muestra que la velocidad de descomposición

de la calcopirita (un mineral de hierro) puede mejorarse controlando el tamaño de las partículas. Esto significa que la clasificación de las partículas antes de molerlas puede hacer que el proceso sea más eficiente (Ruiz-Sánchez & Lapidus, 2022). La aplicación de un sistema Ro-Tap podría simplificar esta categorización, garantizando que las partículas se ubiquen dentro del intervalo idóneo para la molienda y subsiguiente lixiviación.

Con el fin de optimizar la clasificación y deshidratación de relaves, así como de disminuir la contaminación, se sugiere implementar una superficie de criba elástica en los clasificadores vibratorios, sustituyendo las pantallas rígidas que suelen obstruirse con facilidad. Este cambio aumenta la energía de salida en un 10 % y facilita la ruptura de la película de agua en las aperturas. Se hallaron los parámetros ideales de fuerza de excitación, frecuencia y concentración de relaves, consiguiendo eficiencias del 80 % y 53 % en clasificación y deshidratación, respectivamente. Esto fomenta una utilización más eficiente de los relaves, lo que resulta en prácticas mineras más respetuosas con el medio ambiente (Pan y otros, 2020).

Los sistemas Ro-Tap son útiles para clasificar partículas de minerales de cobre. Se usan en muchos procesos, como la recuperación en procesos de flotación y lixiviación, y la caracterización mineral y el procesamiento de minerales. La eficiencia y efectividad de las operaciones mineras es significativamente contribuida por la capacidad de estos sistemas para proporcionar clasificaciones precisas y rápidas.

### 2.3. Definiciones conceptuales.

- a) **Análisis de los Resultados:** Conlleva la interpretación de los datos conseguidos mediante la categorización y especificación de minerales. Para optimizar los procesos de flotación y potenciar la recuperación de cobre, es esencial llevar a cabo este análisis, lo que a su vez permite una toma de decisiones informada en la operación minera (Dávila y otros, 2022).
- b) **Análisis de la granulométrico:** "Proceso de caracterización del material mediante la medición de las proporciones de diferentes tamaños de partículas presentes en una muestra mineral" (Napier-Munn y otros, 1996) (Napier-Munn et al., 2019).
- c) **Asociaciones de los minerales:** La expresión en cuestión hace referencia a la disposición conjunta de diferentes minerales en un depósito. Es fundamental entender estas asociaciones si queremos planificar la extracción y el procesamiento de minerales de cobre, ya que pueden afectar a la elección de métodos de separación (Dávila y otros, 2022).
- d) **Caracterización de la mineralogía:** Esta denominación se refiere al análisis minucioso de las características físicas y químicas de los minerales. Para comprender el comportamiento de las partículas en los procesos de flotación y separación, es esencial realizar un análisis de su composición, estructura y tamaño. Este análisis es parte integral del proceso de caracterización (Dávila y otros, 2022).
- e) **Clasificación de las partículas:** El proceso se centra en separar partículas de distintos tamaños o grupos. Es algo súper importante en la minería, porque así se puede aprovechar al máximo los minerales valiosos que se obtienen. La clasificación puede llevarse a cabo de manera mecánica, utilizando sistemas como Ro-Tap, que emplean vibraciones para facilitar la separación (Dávila y otros, 2022).

- f) **Distribución granulométrica:** "Representación matemática y gráfica de la proporción de partículas de diferentes tamaños en una muestra mineral, fundamental para optimizar procesos metalúrgicos (Concha A & Bascur, 2024)" (Morrell, 2017, "The Science and Engineering of Mineral Processing").
- g) **Eficiencia de tamizado:** "Medida de la efectividad del proceso de separación de partículas, expresada como el porcentaje de material correctamente clasificado en relación al tiempo de operación" (Han & Fuerstenau, 2003).
- h) **Factor de forma de partículas:** "Característica geométrica que describe la relación entre las dimensiones de una partícula mineral y su comportamiento durante el proceso de tamizado" (Gupta & Yan, 2016)
- i) **Flotación de Minerales:** Es un proceso fisicoquímico utilizado para separar minerales valiosos de la ganga. La eficacia de este proceso depende en gran medida de la correcta clasificación y liberación de las partículas minerales, lo que a su vez se ve influenciado por la caracterización mineralógica (Dávila y otros, 2022).
- j) **Grado de Liberación:** Este concepto se refiere a la proporción de mineral valioso que se encuentra libre de la ganga en una muestra. Un alto grado de liberación es esencial para maximizar la recuperación durante la flotación, y se puede optimizar mediante una clasificación adecuada de las partículas (Dávila y otros, 2022).
- k) **Granulometría de minerales de cobre:** "Distribución de los tamaños de las partículas de mineral de cobre en una muestra, fundamental para determinar la eficiencia en los procesos posteriores de concentración y refinación" (Gupta & Yan, 2016)

- l) **Mallas Tyler:** Conjunto normalizado de cribas usado en la categorización de fragmentos minerales, donde cada trama posee una abertura concreta medida conforme a normas globales (King R. , 2001)
- m) **Mejora continua:** En el ámbito de la industria minera, se alude a la aplicación de tácticas y avances técnicos que maximizan los procedimientos de extracción y transformación de minerales. El empleo de métodos Ro-Tap para la categorización de partículas constituye una muestra de cómo se puede optimizar la exactitud y la celeridad en la caracterización de minerales de cobre, lo que coopera en una mayor eficacia en la producción (Dávila y otros, 2022).
- n) **Minerales de cobre:** Ciertos minerales que poseen cobre en proporciones considerables, como la calcopirita, la bornita y la malaquita, son ejemplos de esto. Para que los procesos de extracción y flotación sean un éxito, es crucial caracterizar adecuadamente estos minerales, ya que afecta de manera directa a la recuperación del metal (Dávila y otros, 2022).
- o) **Precisión dimensional:** Nivel de precisión en la evaluación y categorización de fragmentos minerales de acuerdo con normas definidas, fundamental para etapas subsecuentes de concentración (Gupta & Yan, 2016).
- p) **Precisión en clasificación de partículas:** El procedimiento descrito permite obtener un alto grado de precisión y repetibilidad en la clasificación granulométrica de minerales, con base en su tamaño, y se ve influenciado por factores como el tiempo de tamizado y la correcta calibración del equipo de tamizado (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2010).
- q) **Sistema Ro-Tap:** Equipo de molienda mecánica estandarizada que emplea un movimiento circular y de percusión vertical para clasificar partículas minerales según su tamaño, utilizando una serie de mallas calibradas superpuestas (Wills & Finch, 2016).

- r) **Sistemas Ro-Tap:** Hace mención a un modelo de tamizadora que fusiona movimientos de rotación y de vaivén, posibilitando una categorización más efectiva de las partículas minerales. Este método se usa mucho en los laboratorios para saber cómo se reparten las partículas en tamaño, algo básico para analizar los minerales de cobre (Dávila y otros, 2022).
- s) **Tamaño de partícula:** Este término se refiere a las medidas de las partículas de los minerales. La eficiencia del proceso de recuperación de cobre puede verse afectada por el tamaño de grano, ya que este influye en la superficie de contacto durante la flotación, pudiendo mejorarla o disminuirla (Dávila y otros, 2022).
- t) **Velocidad de tamizado:** "Tasa a la cual las partículas minerales atraviesan las diferentes mallas del sistema Ro-Tap, influenciada por factores como la amplitud de vibración y frecuencia de golpeteo" (Han & Fuerstenau, 2003)

## **2.4. Hipótesis de la investigación.**

### **2.4.1. *Hipótesis general.***

Con un control adecuado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permitirá mejorar la precisión y velocidad.

### **2.4.2. *Hipótesis específicas.***

Con una adición adecuada del peso en la alimentación en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el porcentaje pasante a la malla200.

Con un control adecuado de la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.

Un control adecuado del tiempo empleado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el efecto en la eficiencia.

## 2.5. Operacionalización de variables e indicadores.

La operación de estudio sobre “*Clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para mejorar la precisión y velocidad*”, se describe en la tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de las variables e indicadores

Variable	Concepto	Dimensiones	Unidad
<b>Independiente</b>			
<i>Clasificación de partículas de minerales</i>	La clasificación de partículas de minerales es el proceso de separar y categorizar las partículas minerales según su tamaño, forma, densidad y otras propiedades físicas. Este proceso es fundamental en la industria minera para optimizar la extracción de minerales valiosos y reducir los impactos ambientales (Gupta & Yan, 2016).	- Peso - Amplitud - Tiempo	- Gramos - mm/g - Minuto
<b>Dependiente</b>			
<i>Mejorar la precisión y velocidad</i>	Es la optimización de los procesos y técnicas para obtener resultados más exactos y eficientes en menos tiempo. Esto implica reducir errores, aumentar la productividad y mejorar la calidad general de los resultados (Triola, 2012).	- Pasante malla 200 - Eficiencia	- Porcentaje
<b>Intervinientes</b>			
Condiciones de tamizado	Son un conjunto de variables que intervienen en la clasificación de minerales por tamaño (Bustillo Revuelta, 2018).	- Mallas - Temperatura - Humedad	- Micra - Grado - Porcentaje

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

#### **3.1. Diseño metodológico.**

##### ***3.1.1. Tipo de investigación.***

Para nuestro trabajo, se aplicó la investigación aplicada, este tipo de investigación se centra en resolver problemas prácticos y mejorar la práctica, la política o la toma de decisiones, utilizando métodos y técnicas sistemáticas para recopilar y analizar datos (Ernández Sampieri et al., 2014).

##### ***3.1.2. Nivel de investigación.***

Respecto el nivel de investigación corresponde a explicativo, ya que busca comprender y explicar fenómenos, relaciones y procesos. Identifica causas y efectos, estableciendo las relaciones entre variables y explica por qué ocurren ciertos hechos. Su objetivo es desarrollar teorías o modelos que expliquen un fenómeno (Hernández Sampieri, 2018).

##### ***3.1.3. Diseño de la investigación.***

El trabajo desarrollado se enmarca en el ámbito del diseño de investigación experimental, ya que dicho enfoque se centra en la identificación de relaciones de causa y efecto entre variables. Conlleva la intervención de una variable independiente y la evaluación de su repercusión en una variable dependiente. Se distingue por la existencia de un conjunto experimental y un conjunto de control. El objetivo principal es determinar si la variable independiente tiene un efecto significativo en la variable dependiente, lo cual se logrará al realizar un análisis exhaustivo de los datos y al aplicar métodos estadísticos avanzados (Balluerka Lasa & Vergara Iraeta, 2002).

##### ***3.1.4. Enfoque de la investigación.***

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión más completa del fenómeno estudiado.

Los datos numéricos son integrados por este enfoque y textuales, utilizando métodos como encuestas, entrevistas y análisis de contenido, para proporcionar una visión más rica y detallada del problema de investigación. El estudio combinado pretende sacar provecho de las ventajas de ambas perspectivas, compensando las desventajas de cada una. Resulta de lo más práctico usar este enfoque a la hora de responder a preguntas de investigación complejas, que necesitan de una visión completa del fenómeno (González Ballesteros y otros, 2024).

### **3.2. Población y muestra.**

#### ***3.2.1. Población de la investigación.***

La población que se considero es el mineral proveniente del proyecto de la Empresa Euromin Perú SAC, ubicado en el departamento de Ancash, provincia de Santa, distrito de Mácate. Representado por las vetas de efloraciones mineralógicas del proyecto.

#### ***3.2.2. Muestra de la investigación.***

En el estudio se extrajeron mineral de las vetas con una distancia aproximadamente de 5 metros, aproximadamente 25 kilos de los cuales se realizaron la preparación mecánica y su clasificación del mineral pasante a la malla 10, los que se prepararan una muestra aproximadamente de 1 kilo cada uno para realizar las pruebas respectiva, contando con 22 muestras.

### **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### ***3.3.1. Técnica empleada para la recolección de datos.***

En el presente estudio se empleó la técnica de observación, esta técnica de recolección de datos en investigación implica la observación sistemática y documentada de comportamientos, eventos o fenómenos relevantes para el estudio. Puede ser participante (el investigador interactúa con el grupo observado) o no participante (el investigador observa desde fuera), estructurada (con

un guion predefinido) o no estructurada (más flexible). La calidad de la observación depende de la capacitación del observador, la claridad de los objetivos y la rigurosa documentación de los datos. La elección del tipo de observación dependerá del diseño de la investigación y del fenómeno a estudiar (Yuni & Urbano, 2007).

### ***3.3.2. Instrumento empleado en la recolección de datos.***

En la indagación empírica, el dispositivo esencial para la obtención de información es la documentación metódica de las variables manejadas y las respuestas observadas. Entre los instrumentos que se pueden utilizar se incluyen plantillas de observación, escalas de medición, grabaciones de audio o vídeo, fotografías y notas de campo. El instrumento fue elegido en función de la naturaleza de las variables y del diseño que fue aplicado en el experimento, con el objetivo de capturar los datos de la manera más precisa y objetiva posible. La clave es asegurar que los datos sean confiables y que reflejen con precisión las relaciones entre las variables manipuladas y las respuestas observadas (Ortiz Ocaña, 2015).

### **3.4. Técnicas para el procesamiento de la información.**

En el procesamiento de los datos obtenidos de la investigación se emplearon la estadística descriptiva y inferencia. La estadística descriptiva organiza y resume datos utilizando medidas como la media, la desviación estándar y gráficos, ofreciendo una visión general del conjunto de datos. La estadística inferencial, por otro lado, utiliza datos de muestra para hacer inferencias sobre una población más amplia, empleando pruebas de hipótesis y estimaciones para sacar conclusiones generales. Ambas técnicas son complementarias en el procesamiento de información, la descriptiva proporciona un panorama inicial, mientras que la inferencial permite generalizar los hallazgos a un contexto más amplio (Álvarez Cáceres, 2007). Para ellos se emplearán paquetes

estadísticos de acceso libre, como Jamovi, Minitab, Excel con la finalidad de acelerar los cálculos deseados.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de resultados

##### 4.1.1. Condiciones de la parte experimental

En las pruebas experimentales se emplearon mineral cobre pasante a la malla 10, para ello primero se clasificaron, luego se secaron en la estufa por un espacio de 12 horas cada muestras antes se ser sometida a la clasificación en el rotap, empleando las malla 20, 30 , 50 , 70 , 100 , 140 , 200 , 325 y 400. Una vez pesado cada muestra se llevó al rotap de acuerdo las condiciones de las pruebas experimentales de acuerdo la tabla 3, una vez completado el tiempo se pesaron cada mineral retenido en cada malla y se registran los pesos.

**Tabla 2**

*Parámetros de las pruebas experimentales*

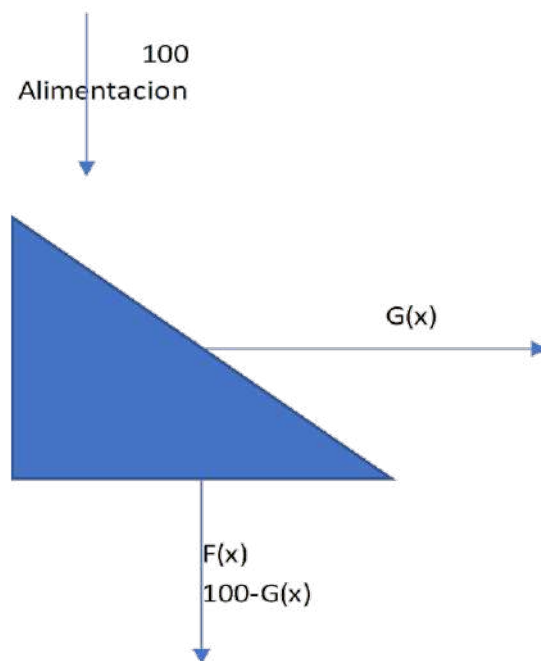
	Min	Max	Central	Min	Max	Central
<b>Tiempo (minutos)</b>	14	18	16	-	+	0
<b>Amplitud (mm/g)</b>	0.4	0.8	0.6	-	+	0
<b>Peso (g)</b>	200	400	300	-	+	0

**Tabla 3**

*Condiciones de la prueba experimental*

Nº	Codificado			Natural			Resultado	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Z <sub>1</sub> (Tiempo, min)	Z <sub>2</sub> (Amplitud, mm/g)	Z <sub>3</sub> (Peso g)	%-200m	g/min
<b>1</b>	-	-	-	14	0.4	200		
<b>2</b>	+	-	-	18	0.4	200		
<b>3</b>	-	+	-	14	0.8	200		
<b>4</b>	+	+	-	18	0.8	200		
<b>5</b>	-	-	+	14	0.4	400		
<b>6</b>	+	-	+	18	0.4	400		
<b>7</b>	-	+	+	14	0.8	400		
<b>8</b>	+	+	+	18	0.8	400		
<b>9</b>	0	0	0	16	0.6	300		
<b>10</b>	0	0	0	16	0.6	300		
<b>11</b>	0	0	0	16	0.6	300		

Figura 3  
Diagrama de proceso de clasificación



#### 4.1.2. Resultados.

En la primera prueba experimental se trabajó con 200 gramos de mineral a una amplitud de 0.4 mm/g en un periodo de 14 minutos y el resultado se detalla en la tabla 3

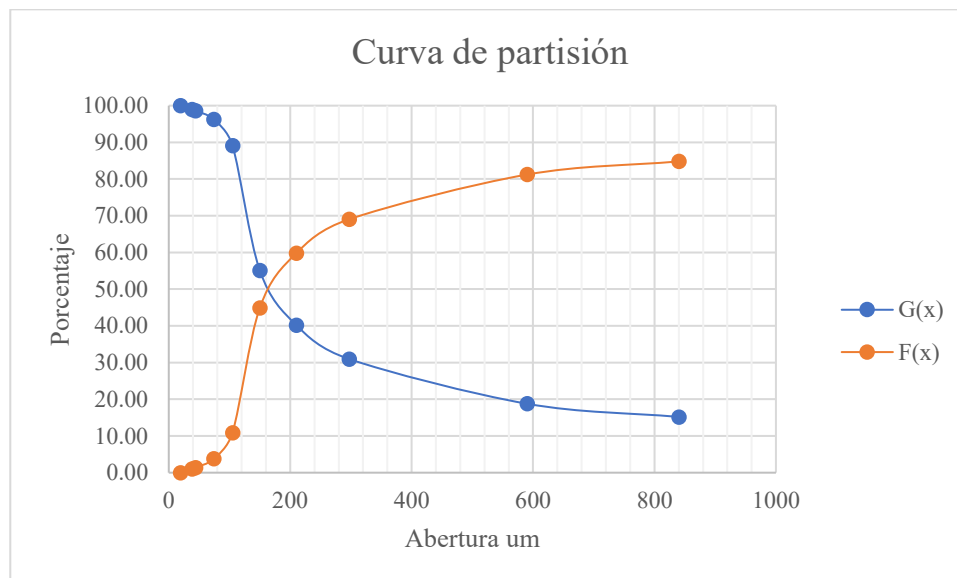
**Tabla 4**

*Análisis de malla de la primera prueba*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	30.38	15.19	15.19	84.81	2.17	169.62	12.116
30	590	7.18	3.59	18.78	81.22	0.51	162.44	11.603
50	297	24.37	12.19	30.97	69.04	1.74	138.07	9.862
70	210	18.5	9.25	40.22	59.79	1.32	119.57	8.541
100	150	29.71	14.86	55.07	44.93	2.12	89.86	6.419
140	105	68.05	34.03	89.10	10.91	4.86	21.81	1.558
<b>200</b>	<b>74</b>	<b>14.27</b>	<b>7.14</b>	<b>96.23</b>	<b>3.77</b>	<b>1.02</b>	<b>7.54</b>	<b>0.539</b>
325	44	4.76	2.38	98.61	1.39	0.34	2.78	0.199
400	38	0.73	0.37	98.98	1.03	0.05	2.05	0.146
-400	19	2.05	1.03	100.00	0.00	0.15	0.00	0.000
		200	100.00					

**Figura 4**

*Curva de partición del pasante y retenido en la primera prueba*



De acuerdo la tabla 3 para la malla 200 con una abertura de 74 micras se tiene un retenido de 14.27 gramos que representa 7.14% en la malla de los cuales el 96.23% se encuentra acumulado en la retención y el pasante solo el 3.77% las cuales lo que representa 1.02 gramos por minutos retenido a la malla, mientras que el pasante representa solo 0.539g/min respecto a la malla 200.

**Tabla 5**

*Resultados de las 11 pruebas experimentales*

N°	Z <sub>1</sub> (Tiempo, min)	Natural		Resultado	
		Z <sub>2</sub> (Amplitud, mm/g)	Z <sub>3</sub> (Peso g)	%-200m	g/min
1	14	0.4	200	3.77	0.54
2	18	0.4	200	4.39	0.49
3	14	0.8	200	15.91	2.27
4	18	0.8	200	18.48	2.05
5	14	0.4	400	2.21	0.63
6	18	0.4	400	5.61	1.25
7	14	0.8	400	15.39	4.28
8	18	0.8	400	25.36	5.78
9	16	0.6	300	8.04	1.51
10	16	0.6	300	10.80	2.03
11	16	0.6	300	6.82	1.28

En la tabla 5 de las 11 pruebas realizadas la prueba 8 tiene mejor resultado donde 25.36% pasa a la malla 200 con 5.78 gramos por minutos en un tiempo de 18 minutos a una amplitud de 0.8 mm/g para 400 gramos de muestra.

#### 4.1.3. *Procesamiento de los resultados*

Para el porcentaje pasante a la malla 200, tiene una variación estándar de 2.04005 con un coeficiente de correlación R cuadrado de 98.44% y R cuadra ajustada del 92.19% con una presentación de ecuación de regresión.

$$\begin{aligned} \% - 200m &= -7.6 + 0.13 \text{ Tiempo, min} + 51.1 \text{ Amplitud, mm/g} + 0.019 \text{ Peso g} \\ &- 1.67 \text{ Tiempo, min} * \text{Amplitud, mm/g} - 0.0023 \text{ Tiempo, min} * \text{Peso g} \\ &- 0.189 \text{ Amplitud, mm/g} * \text{Peso g} \\ &+ 0.0144 \text{ Tiempo, min} * \text{Amplitud, mm/g} * \text{Peso g} \\ &- 2.84 \text{ Pt Ctral} \end{aligned}$$

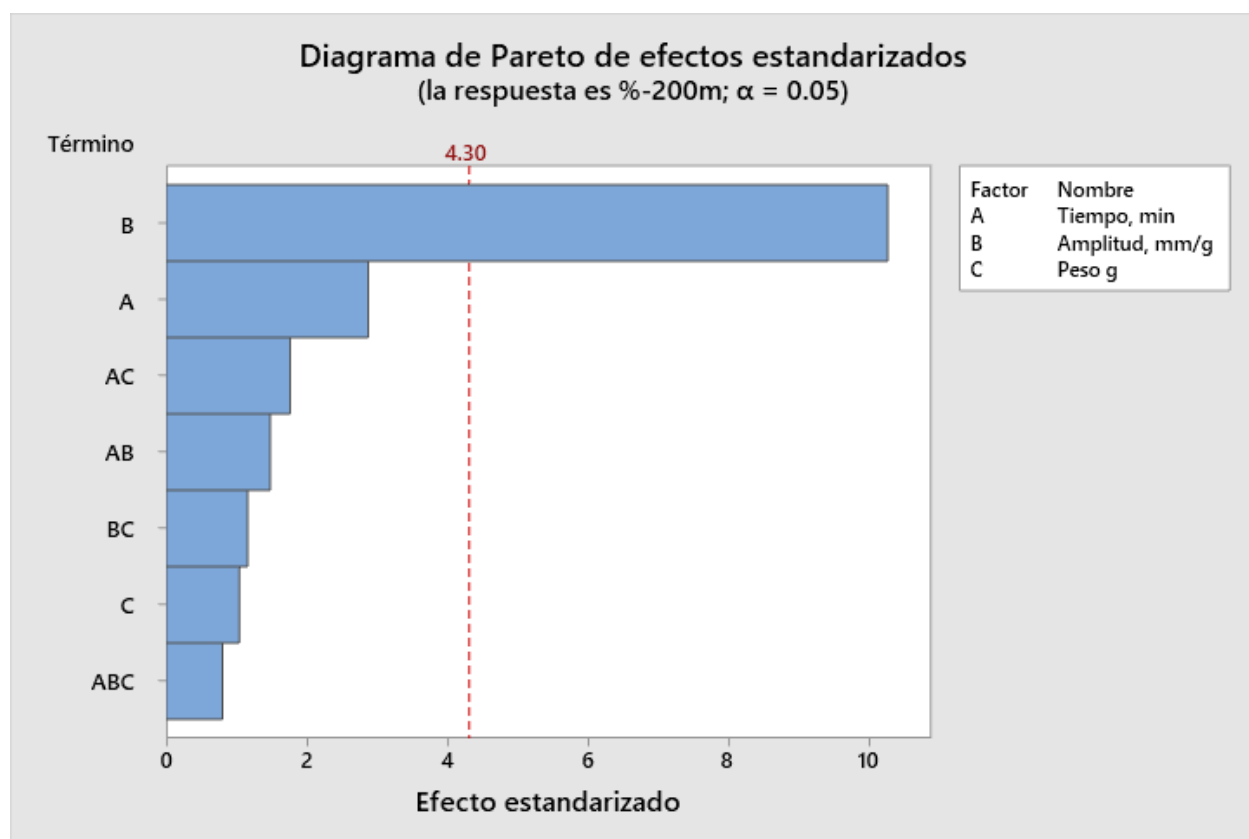
*Tabla 6*  
*Análisis de varianza para el porcentaje pasante a la malla 200*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	524.383	65.548	15.75	0.061
Lineal	3	476.510	158.837	38.17	0.026
Tiempo, min	1	34.262	34.262	8.23	0.103
Amplitud, mm/g	1	437.726	437.726	105.18	0.009
Peso g	1	4.522	4.522	1.09	0.407
Interacciones de 2 términos	3	27.630	9.210	2.21	0.326
Tiempo, min*Amplitud, mm/g	1	9.076	9.076	2.18	0.278
Tiempo, min*Peso g	1	12.944	12.944	3.11	0.220
Amplitud, mm/g*Peso g	1	5.610	5.610	1.35	0.365
Interacciones de 3 términos	1	2.669	2.669	0.64	0.507
Tiempo, min*Amplitud, mm/g*Peso g	1	2.669	2.669	0.64	0.507
Curvatura	1	17.574	17.574	4.22	0.176
Error	2	8.324	4.162		
Total	10	532.706			

En la tabla 6 para el porcentaje pasante a la malla 200 a 74 micras para el modelo lineal y amplitud mm/g los valores de p se tiene 0.026 y 0.009 menor al valor predefinido de 0.05, mientras que en los otros casos son mayores a 0.05.

### Figura 5

Diagrama de Pareto para el porcentaje pasante a la malla 200



Para el porcentaje pasante a la malla 200 a 74 micras en la figura 5 la barra B que representa a la amplitud de vibración en mm/g supera el valor de 4.3 y para los otros casos son inferiores a 4.3.

**En la regresión factorial peso en relación del tiempo:** g/min vs. Tiempo, min; Amplitud, mm/g; Peso g; PtCentral, para los gramos pasante a la malla 200 por minuto tiene una desviación estándar de 0.382510 y un coeficiente de correlación R cuadrado de 98.92% y el ajustado de 94.62%. Para ello se tiene una ecuación obtenida por regresión.

$$\begin{aligned}
 \text{g/min} = & -1.2 + 0.127 \text{ Tiempo, min} + 10.3 \text{ Amplitud, mm/g} - 0.0023 \text{ Peso g} \\
 & - 0.77 \text{ Tiempo, min} * \text{Amplitud, mm/g} - 0.00049 \text{ Tiempo, min} * \text{Peso g} \\
 & - 0.0223 \text{ Amplitud, mm/g} * \text{Peso g} + 0.00330 \text{ Tiempo, min} * \text{Amplitud, mm/g} * \text{Peso g} \\
 & - 0.557 \text{ Pt Ctral}
 \end{aligned}$$

**Tabla 7**

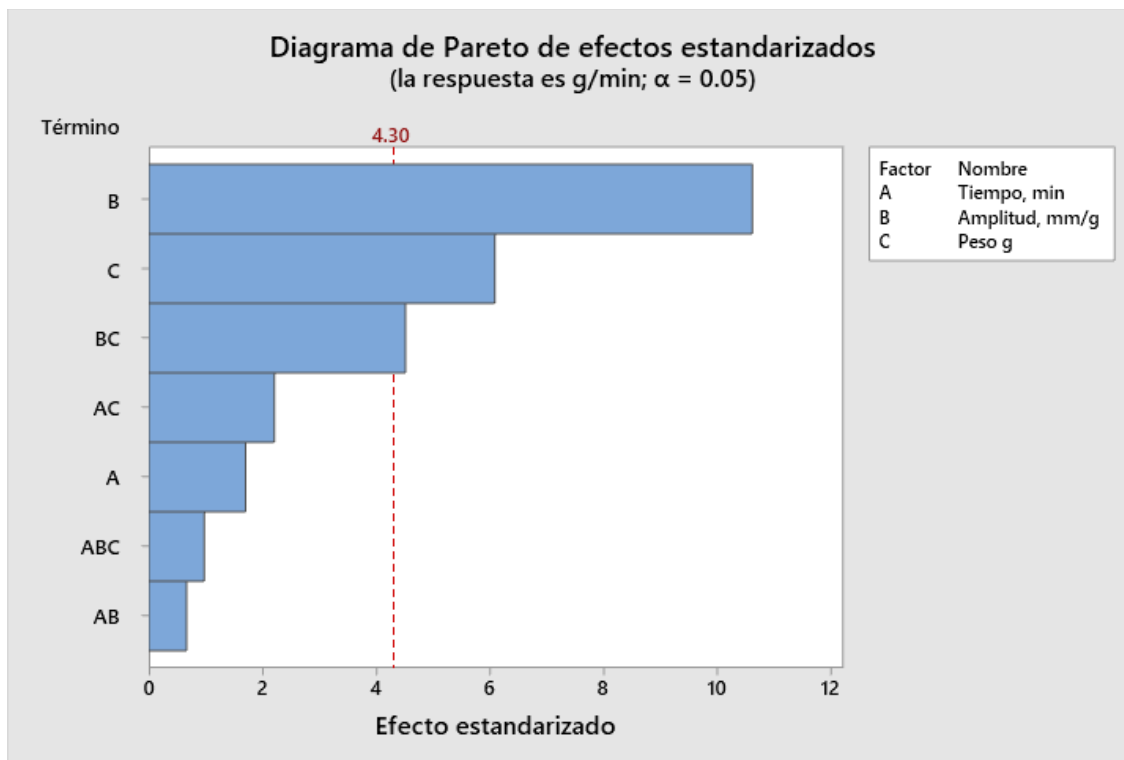
*Análisis de varianza para los gramos en el tiempo pasante a la malla 200*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	26.8842	3.3605	22.97	0.042
Lineal	3	22.3144	7.4381	50.84	0.019
Tiempo, min	1	0.4259	0.4259	2.91	0.230
Amplitud, mm/g	1	16.4727	16.4727	112.58	0.009
Peso g	1	5.4158	5.4158	37.02	0.026
Interacciones de 2 términos	3	3.7531	1.2510	8.55	0.107
Tiempo, min*Amplitud, mm/g	1	0.0645	0.0645	0.44	0.575
Tiempo, min*Peso g	1	0.7120	0.7120	4.87	0.158
Amplitud, mm/g*Peso g	1	2.9767	2.9767	20.34	0.046
Interacciones de 3 términos	1	0.1393	0.1393	0.95	0.432
Tiempo, min*Amplitud, mm/g*Peso g	1	0.1393	0.1393	0.95	0.432
Curvatura	1	0.6773	0.6773	4.63	0.164
Error	2	0.2926	0.1463		
Total	10	27.1768			

Pasante de los gramos de mineral en el tiempo en la tabla 7 a la malla 200 74 micras para el modelo, condiciones lineales, amplitud mm/g, peso g y amplitud mm/g por peso g tiene valores de 0.042, 0.019, 0.009, 0.026, 0.046 menores al valor de 0.05 y respecto a los otros casos supera el valor.

**Figura 6**

*Diagrama de Pareto para gramos en relación del tiempo pasante a la malla200*



En la figura 6 el peso de las partículas pasante a la malla 200 a 74 micras, para la barra B (amplitud mm/g), C (peso g) y BC (amplitud, mm/g) (peso g) superan el valor de 4.3 para los otros casos son inferiores a 4.3.

## 4.2. Contrastación de hipótesis.

### 2.5.1. *Contrastación de hipótesis general.*

**Ha:** Con un control adecuado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permitirá mejorar la precisión y velocidad.

**Ho:** Con un control adecuado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap no permitirá mejorar la precisión y velocidad.

De la tabla 6 y figura 5 el efecto estadísticamente significativo ( $p < 0.05$ ) de los factores tiempo, amplitud y peso sobre la precisión (% -200 mallas) para la amplitud mm/g. mientras que

en la tabla 7 y figura 6 efecto significativo también sobre el rendimiento (g/min), que refleja la velocidad del proceso para la amplitud mm/g, peso g y amplitud y peso tiene efecto significativo ya que valor de p menor a 0.05. Se observó además una interacción positiva entre los factores, especialmente entre tiempo y amplitud, donde combinaciones como 18 min – 0.8 mm/g – 400 g resultaron en los mayores valores de precisión (25.36%) y velocidad (5.78 g/min).

En base a los resultados experimentales y el análisis estadístico realizado, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) para la amplitud y peso.

### **2.5.2. *Contrastación de hipótesis específicas.***

**Ha:** Con una adición adecuada del peso en la alimentación en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el porcentaje pasante a la malla200.

**Ho:** Con una adición adecuada del peso en la alimentación en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap no permite mejorar el porcentaje pasante a la malla200.

En la tabla 6 y figura 5 para el peso el valor de p calculado es de 0.407 mayor a valor de 0.05 y la barra C es menor a 4.3, por lo tanto, no tiene efecto significativo, por lo que se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

**Ha:** Con un control adecuado de la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.

**Ho:** Con un control adecuado de la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap no permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.

En la tabla 6 y figura 5 la amplitud mm/g el valor de p calculado es de 0.009 menor a 0.05 y la barra B es mayor a 4.3, por lo que tiene una significancia en la clasificación del mineral pasante a la malla 200. Por lo que prevalece la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula.

**Ha:** Un control adecuado del tiempo empleado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el efecto en la eficiencia.

**Ho:** Un control adecuado del tiempo empleado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap no permite mejorar el efecto en la eficiencia.

En la tabla 6 y figura 5 para el tiempo el valor de p es de 0.103 para el porcentaje pasante a la malla 200 y la barra A es menor a 4.3, mientras que en la tabla 7 y figura 6 para la velocidad de clasificación g/min el valor es de p es de 0.230 mayor a 0.05 y la barra A es menor a 4.3. Por lo tanto, la hipótesis nula prevalece y se rechaza la hipótesis alternativa.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la amplitud de vibración es el factor más influyente en la liberación de finos (% pasante a malla 200), con significancia estadística ( $p = 0.009$ ) y contribución dominante en el diagrama de Pareto. Este hallazgo concuerda plenamente con los trabajos de Yu et al. (2024), quienes demostraron que en el cribado húmedo la amplitud y frecuencia de vibración superan la adherencia del material y elevan la eficiencia de clasificación hasta  $10 \text{ t/h}\cdot\text{m}^2$ , y con los resultados de Shanmugam et al. (2023), que también reportaron mejoras sustanciales de la recuperación de finos al variar parámetros vibratorios en zarandas de hierro y carbón.

Por otro lado, el peso de muestra no logró un efecto significativo sobre el porcentaje de finos ( $p = 0.407$ ), aunque sí influyó en la velocidad de proceso ( $\text{g/min}$ ), donde alcanzó significancia ( $p = 0.026$ ) en combinación con amplitud. Esto refleja lo observado por Ticona (2024) en plantas de clasificación húmeda, donde la configuración de paneles y la masa afectada incrementaron la productividad en  $7\,000 \text{ t/d}$ , señalando que la masa cargada es determinante para la capacidad del sistema, más que para la precisión del tamizado.

El tiempo de tamizado, dentro del rango de 14 a 18 min, no evidenció efecto aislado relevante ni sobre la precisión ( $p = 0.103$ ) ni sobre la velocidad ( $p = 0.230$ ). Este resultado sugiere que, a diferencia de la geometría de alimentación de hidrociclones estudiada por Lv et al. (2023) —donde ajustar la energía de entrada mejoró la recuperación de finos en 10–18 %—, en la tamizadora Ro-Tap la variación de tiempo es menos crítica, siempre que la amplitud y la masa estén correctamente definidas.

Los antecedentes nacionales refuerzan la necesidad de un control riguroso de parámetros físicos: Rodríguez (2024) obtuvo mejoras de eficiencia hasta 86.4 % en zarandas vibratorias al optimizar aceleración y diseño, y Alca (2021) incrementó el tonelaje de molienda en 1.19 % ajustando la presión de hidrociclón. En conjunto, estos estudios y nuestros resultados avalan que la amplitud de vibración debe priorizarse en la estandarización del procedimiento Ro-Tap, mientras que la masa de muestra puede adecuarse para maximizar el rendimiento, permitiendo flexibilizar el tiempo de análisis sin comprometer la calidad de la clasificación.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

El estudio demuestra que un control riguroso de los parámetros operativos en la clasificación de partículas de cobre con tamizadora Ro-Tap en particular la amplitud de vibración, el tiempo de tamizado y la masa de muestra mejora de manera significativa la precisión (% de partículas pasantes a malla 200) y la velocidad (g/min) del proceso. La combinación de un experimento usando dos factores y un análisis de datos confirmó que, en las mejores condiciones, se obtienen los mayores valores de efectividad del tamaño de las partículas y producción, lo que confirma la idea propuesta.

La amplitud de vibración (0.4 – 0.8 mm/g) resultó ser el factor más determinante para incrementar el porcentaje de finos pasantes a malla 200 ( $p = 0.009$ ). Su contribución en el modelo de regresión y el diagrama de Pareto la sitúan como la variable clave para optimizar la precisión de clasificación.

Aunque el peso de alimentación no fue significativo para la liberación de finos ( $p = 0.407$ ), sí mostró un impacto relevante en la velocidad de tamizado (g/min) cuando se combina con amplitud ( $p = 0.026$ ). Esto indica que ajustar la masa de muestra es esencial para maximizar la productividad del sistema.

Dentro del rango estudiado (14–18 min), el tiempo de operación no presentó un efecto estadísticamente significativo ni sobre la precisión ( $p = 0.103$ ) ni sobre la velocidad ( $p = 0.230$ ). Esto sugiere que, siempre que amplitud y peso estén correctamente definidos, el tiempo puede flexibilizarse sin comprometer la eficiencia del proceso.

## 6.2. Recomendaciones

Dado que la amplitud mostró el mayor efecto sobre el porcentaje pasante a malla 200 ( $p = 0.009$ ) y domina el diagrama de Pareto, se recomienda fijar 0.8 mm/g como parámetro estándar de operación en todos los ensayos y procesos de planta para maximizar la liberación de finos.

Aunque el peso no influyó en la precisión de los finos, sí mejoró significativamente la velocidad de tamizado (g/min) al combinarse con alta amplitud ( $p = 0.026$ ). Para incrementar la productividad se recomienda trabajar con 400 g de muestra cuando el objetivo sea alto flujo de material; si la prioridad es ahorro de recursos, puede reducirse a 300 g manteniendo la misma amplitud.

El tiempo de tamizado no resultó significativo aisladamente ( $p > 0.05$ ) en precisión ni velocidad. Por tanto, se sugiere ajustar el tiempo dentro del rango estudiado en función de la disponibilidad de equipo y volumen de muestras, sin perjuicio de la eficiencia, priorizando siempre la amplitud y el peso establecidos.

## CAPÍTULO VII

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### 5.1. Referencias bibliográficas

- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates* (ASTM C136/C136M-19). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cdn.standards.iteh.ai/samples/105288/cc00c2991f694b6f9ef2c7006d7e79df/ASTM-C136-C136M-19.pdf
- Iriarte Dávila, G., Guillen Gómez, M., & Alfaro Delgado, E. (2022). Análisis de la caracterización mineralógica de los pórfidos de cobre como soporte a los procesos de flotación. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad De Minas Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 25(50), 433-444. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24259>
- Lv , W., Wei , Q., Ji , Y., Liu , B., Ma , H., Huang , Y., . . . Bo Fu, P. (2023). Enhancement of the classification and recovery process of fine mineral particles via a newly developed volute feed hydrocyclone. *Environ Sci Pollut Res* 30, 86047–86059. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-023-28516-7>
- Achim, M. (2010). Fine and very fine screening. *Technical Solutions*, 51, 1-7. [https://www.at-minerals.com/download/215793/3\\_Technical\\_Solutions\\_1\\_2.pdf](https://www.at-minerals.com/download/215793/3_Technical_Solutions_1_2.pdf)
- Albuquerque, L., Wheeler, J., Valine, S., & Ganahl, B. (2018). Application of high frequency screens in closing grinding circuits. *Researchgate*, 176-173. [https://www.researchgate.net/publication/237761010\\_Application\\_of\\_high\\_frequency\\_screens\\_in\\_closing\\_grinding\\_circuits](https://www.researchgate.net/publication/237761010_Application_of_high_frequency_screens_in_closing_grinding_circuits)
- Alca Cruz, R. S. (2021). Informe técnico de evaluación de hidrociclones para mejora en el desempeño de circuitos de molienda. *Ingeniero Metalurgista*. Universidad Nacional San

- Agustín de Arequipa, Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/1dd080e5-72c1-444a-923f-3194277d691f>
- Álvarez Cáceres, R. (2007). *Estadística aplicada a las ciencias de la salud*. Ediciones Díaz de Santos, S.A. [https://www.google.com.pe/books/edition/Estad%C3%ADstica\\_aplicada\\_a\\_las\\_ciencias\\_de/V2ZosgPYI0kC?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Estad%C3%ADstica_aplicada_a_las_ciencias_de/V2ZosgPYI0kC?hl=es-419&gbpv=1)
- Balasubramanian, A. (2015). Overview of Mineral Processing Methods. . *researchgate*, 10.13140/RG.2.2.10456.49926.
- Balluerka Lasa, N., & Vergara Iraeta, A. (2002). *Diseños de investigación experimental en psicología: modelos y análisis de datos mediante el SPSS 10.0*. . España: Pearson Educación. [https://www.google.com.pe/books/edition/Dise%C3%B1os\\_de\\_investigaci%C3%B3n\\_experimental/F6g6mEqC8CIC?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Dise%C3%B1os_de_investigaci%C3%B3n_experimental/F6g6mEqC8CIC?hl=es-419&gbpv=1)
- Boitumelo, R., Khumbulani, M., & Olasumbo, M. (2017). Failure and sensitivity analysis of a reconfigurable vibrating screen using finite element analysis. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 9, 40-51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csefa.2017.04.001>
- Bustillo Revuelta, M. (2018). *Mineral Processing*. In: *Mineral Resources*. Springer, Cham.: Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)
- Chuanyao, S., & Kuangdi, X. (2023). *Procesamiento de minerales*. En: Xu, K. (eds) *La enciclopedia de minería y metalurgia del ECPH*. . Springer, Singapur. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1\\_924-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_924-1)

- Concha A, F., & Bascur, O. (2024). *The Engineering Science of Mineral Processing: A Fundamental and Practical Approach*. CRC Press.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/The\\_Engineering\\_Science\\_of\\_Mineral\\_Proce/gVQIEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/The_Engineering_Science_of_Mineral_Proce/gVQIEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1)
- Conejero, R., Usandizaga, P., & Chércoles, A. (2020). Optimización de flujos de trabajo y paneles de cribado para la detección de gammapatias monoclonales malignas. *Advances in Laboratory Medicine*, 1(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/almed-2019-0028>
- Dávila, G., Gomez, M., & Delgado, E. (2022). Análisis de la caracterización mineralógica de los pórfidos de cobre como soporte a los procesos de flotación. *Revista del instituto de investigación de la facultad de minas metalurgia y ciencias geográficas*, 25(50), 433-444.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24259>
- Ernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición ed.). Mexico D.F: Mc Graw Hill Education.  
[https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)
- Espinoza S., L., Iriarte D., G., Espinoza S., L., Gutarra B., R., Herrera M., M., Zamalloa B., J., . . . Torres G., J. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 85-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- Fuentes, N., Mejía, L., Avendaño, J., Ramos, J., & Torres, J. (2015). Análisis de la influencia del fenómeno stick- slip en los esfuerzos de los cortadores de una broca pdc, mediante simulación por elementos finitos. *Revista de Investigación*, 8(2), 98-  
<https://doi.org/https://doi.org/10.29097/2011-639x.29>

- González Ballesteros, L. M., Gómez Restrepo, C., Alejandra Rodríguez, V., Fernández de Castro, S., & Vásquez Ponce, M. (2024). Investigación mixta: ¿qué es y qué no? *Revista Colombiana de Psiquiatría*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcp.2024.04.002>
- google earth pro. (2025). *google earth pro*. <https://earth.google.com/web/@-11.12608899,-77.60894838,30.38113795a,48.96637547d,30y,-0h,0t,0r/data=CgRCAggBMikKJwolCiExb3hXLUVIdUk4QVcxTjJUeERsUTI1NjE0czFfQjBnc0cgAToDCgEwQgIIAEoICLmiw9wFEAE>
- Grewal, I. (2006). *Introduction to Mineral Processing*. <https://www.dirzon.com/Doc/ReaderAsync?target=telegram%3AIntroduction-to-Mineral-Processing-2010.pdf>
- Gülcan, E., & Gülsoy, Ö. Y. (2017). Performance evaluation of optical sorting in mineral processing – A case study with quartz, magnesite, hematite, lignite, copper and gold ores. *International Journal of Mineral Processing*, 169, 129-141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.11.007>
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. Países Bajos: Elsevier. [https://www.google.com.pe/books/edition/Mineral\\_Processing\\_Design\\_and\\_Operations/UZSZBgAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Mineral_Processing_Design_and_Operations/UZSZBgAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1)
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. Elsevier Science. [https://www.google.com.pe/books/edition/Mineral\\_Processing\\_Design\\_and\\_Operations/UZSZBgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Gupta,+A.,+%26+Yan,+D.+S.+\(2018\).+Mineral](https://www.google.com.pe/books/edition/Mineral_Processing_Design_and_Operations/UZSZBgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Gupta,+A.,+%26+Yan,+D.+S.+(2018).+Mineral)

+Processing+Design+and+Operations:+An+Introduction.+Elsevier+Science.&printsec=f  
rontcover

Han, K., & Fuerstenau, M. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Principles\\_of\\_Mineral\\_Processing/MDiZQCSBENMC?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Principles_of_Mineral_Processing/MDiZQCSBENMC?hl=es-419&gbpv=1)

Heiskanen, K. (1993). *Particle Classification*. London,: Chapman & Hall.

Hernández Sampieri, R. (2018). *Metodología de la investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. España: McGraw-Hill Interamericana.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/METODOLOG%C3%8DA\\_DE\\_LA\\_INVESTIGACI%C3%93N/5A2QDwAAQBAJ?hl=es-419](https://www.google.com.pe/books/edition/METODOLOG%C3%8DA_DE_LA_INVESTIGACI%C3%93N/5A2QDwAAQBAJ?hl=es-419)

Hernández-Miranda, E., Veas, R., Krautz, M., Martín, F., & Quiñones, R. (2021). Efecto del tamaño de tamiz en la caracterización de la macrofauna marina bentónica: implicancias para su uso en líneas de base, caracterizaciones preliminares de sitios para la acuicultura y monitoreos ambientales en Chile. *Revista De Biología Marina y Oceanografía*, 56(1), 22-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.22370/rbmo.2021.56.1.2796>

Huarachi-Olivera, R., Dueñas-Gonza, Á., Yapo, U., Almanza, M., Manuel, D., Lazarte-Rivera, A., & Esparza, M. (2017). Quartz mineral bioleaching by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in gravity column reactor. *Revista de Metalurgia*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3989/revmetalm.096>

Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2010). *Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas*. Imprenta Nacional de Colombia.

- Jankovic, A. (2022). Comminution and classification technologies of iron ore. En L. Lu, *Iron Ore (Second Edition) Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability* (págs. 269-308). Editorial Woodhead. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6>
- Jezsó, K., Peciar, P., Macho, O., Huhn, V., & Peciar, M. (2023). Analysis of the screening process of particulate material and the application of a grade efficiency curve as a function of screen length. *Powder Technology*, 424, 118558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118558>
- Kelly , E., & Spottiswood , D. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. Editorial LIMUSA S.A.
- Kenji, E. (2023). Análisis petromineográfico en minerales de óxidos de cobre para una eficiencia en la hidrometalurgia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9427-9438. [https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.5148](https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5148)
- King, R. (2001). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Butterworth-Heinemann. [https://books.google.com.pe/books?id=ajY2I2OL0p4C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=ajY2I2OL0p4C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- King, R. P. (2012). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. [https://www.academia.edu/13824580/MODELING\\_AND\\_SIMULATION\\_OF\\_MINERAL\\_PROCESSING\\_SYSTEMS\\_2ND\\_EDITION](https://www.academia.edu/13824580/MODELING_AND_SIMULATION_OF_MINERAL_PROCESSING_SYSTEMS_2ND_EDITION)

- Little, W. (2021). Performance of the vertical roller mill in a mineral processing application when coupled with internal and external classifiers. *Doctor en filosofía*. Universidad de Ciudad del Cabo, Cabo. <https://open.uct.ac.za/items/d96e5d35-0ab8-4e65-b3d2-082ad0a412b9>
- López Martínez, J., Andrade Martínez, J., Alvarado Macías, G., Espinosa Serrano, E., Nava Gómez, D., & Rosales Marín, G. (2023). Análisis de imagen y modelaje matemático para la determinación de distribuciones de partículas. *Epistemos*, 18(35), 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.36790/epistemos.v18i35.289>
- Mamani-Quispe, J., Calisaya-Mamani, F., Taco-Cervantes, H., Ascuña-Rivera, V., Juárez-Pinto, D., Guzmán-Jacobo, Y., & Mamani-Añamuro, M. (2022). Desarrollo de un concentrador centrífugo neumático para el procesamiento en seco de partículas ultrafinas de minerales auríferos: diseño del prototipo. *Revista Tecnia*, 32(1), 6-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.21754/tecnia.v31i1.1058>
- Moncada, M., & Rodriguez, C. (2016). Respuesta de un harnero vibratorio ante la pérdida de rigidez en los apoyos. *Ingeniare Revista Chilena De Ingeniería*, 24, 25-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000500004>
- Napier-Munn, T., Morrel, S., Morrison, R., & Kojovic, T. (1996). *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*. JKMRC monograph series in mining and mineral processing.
- Orozco, W., & Ospino, J. (2019). Optimización en el diseño estructural de pórticos de concreto usando sap2000. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(33). <https://doi.org/https://doi.org/10.24054/16927257.v33.n33.2019.3327>
- Ortiz Ocaña, A. (2015). *Enfoques y métodos de investigación en las ciencias sociales y humanas*. Colombia: Ediciones de la U.

- [https://www.google.com.pe/books/edition/Enfoques\\_y\\_m%C3%A9todos\\_de\\_investigaci%C3%B3n\\_en/dTOjDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Enfoques_y_m%C3%A9todos_de_investigaci%C3%B3n_en/dTOjDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1)
- Pan, M., Wang, W., Duan, C., Jiang, H., Zhao, Y., Qiao, J., . . . Shi, W. (2020). Process enhancement of vibrating classifier for tailings classification-dewatering and industrial application. *Powder Technology*, *400*, 117219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117219>
- Pryor, M. (2012). *Mineral Processing*. pringer Science & Business Media. [https://books.google.com.pe/books?id=R770CAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=R770CAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Ramatsetse, B., Mpofu, K., & Daniyan, I. M. (2023). Assessment of Reconfigurable Vibrating Screen Technology for the Mining Industries. In: Kim, KY., Monplaisir, L., Rickli, J. (eds) *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus*. FAIM 2022. *Lecture Notes in Mechanical*. Springer, Cham, *1*, 79–87. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-18326-3\\_8](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-18326-3_8)
- Ramos Armijos, N., & Calderón Celis, J. (2022). Revisión del modelo geometalúrgico para la estimación de recursos minerales en depósitos pórfido cupríferos. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas Metalurgia y Ciencias Geográficas*, *25(50)*, 445-459. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24261>
- Rodriguez Paucar, B. E. (2024). Simulación DEM de una zaranda vibratoria para mejorar la eficiencia de selección de partículas en la gran minería peruana. *Ingeniero mecánico*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11494>

- Ruiz-Sánchez, A., & Lapidus, G. (2022). Cinética de lixiviación de calcopirita en medio acuoso de etilenglicol-peróxido de hidrógeno-ácido sulfúrico. *Tópicos de investigación en ciencias de la tierra y materiales*, 9(9), 53-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/aactm.v9i9.9420>
- Sbárbaro, D., & Del Villar, R. (2010). *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants*. Aalto University. [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=ZVQGDranxJ4C&oi=fnd&pg=PR7&dq=Advanced+Mineral+Processing+Technologies+and+Applications.+Mining+Engineering.&ots=QBpl-WKFGo&sig=b-Mb-OKzayZmu\\_zBqjaIZMqhEW4#v=onepage&q=Advanced%20Mineral%20Processing%20Techno](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=ZVQGDranxJ4C&oi=fnd&pg=PR7&dq=Advanced+Mineral+Processing+Technologies+and+Applications.+Mining+Engineering.&ots=QBpl-WKFGo&sig=b-Mb-OKzayZmu_zBqjaIZMqhEW4#v=onepage&q=Advanced%20Mineral%20Processing%20Techno)
- Shanmugam, B. K., Vardhan, H., Raj, M. G., Kaza, M., Hanumanthappa, H., Reddy Byrareddy, R., & Sah, R. (2023). Experimental analysis of vibratory screener efficiency based on density variation for screening coal and iron ore. *International Journal of Coal*, 44(3), 327–341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19392699.2023.2190100>
- Shevchenko, G., Shevchenko, V., Baranov, V., & Spassky, V. (2019). The enrichment technology of slag from metallurgical processing of copper ore concentrate. *Journal of Geology Geography and Geoecology*, 28(3), 537–545. <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/111950>
- Tablademareas. (2025). *Previsión de la humedad*. Previsión semanal: <https://tablademareas.com/pe/lima/huacho/prevision/humedad>
- Ticona Checa, M. (2024). Incremento de la productividad parcial del trabajo evaluando la configuración de aberturas de la superficie de cribado de una zaranda vibratoria de

- clasificación húmeda instalada en una planta industrial de concentración de minerales. *Ingeniero industrial*. Universidad Continental, Arequipa. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15067/8/IV\_FIN\_108\_TE\_Ticona\_Checa\_2024.pdf
- Valderrama, L., Herrera, O., & Rivera, A. (2022). Evaluación de las propiedades magnéticas para estimar la recuperación a nivel industrial. *Matéria (Rio De Janeiro)*, 27(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/s1517-707620220002.1369>
- Velásquez, F., Cardona, A., & Montes, C. (2019). Caracterización de minerales pesados en sedimentos activos de la cuenca del río magdalena, colombia: implicaciones para el análisis de procedencia en el registro fluvial. *Boletín De Geología*, 41(2), 137-147. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revbol.v41n2-2019008>
- Weather Spark. (2025). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Huacho*. <https://es.weatherspark.com/y/20451/Clima-promedio-en-Huacho-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o#:~:text=Temperatura%20promedio%20en%20Huacho&text=El%20mes%20m%C3%A1s%20c%C3%A1lido%20del,menos%20de%2020%20%C2%B0C>.
- Weinan, W., Miao, P., Chenlong, D., Haishen, J., Yuemin, Z., & Hede, L. (2022). Dry deep screening of spodumene and its mineral processing technology. *Minerals Engineering*, 179, 107445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107445>
- Whitworth, A. J., Forbes, E., Verster, I., Jokovic, V., Awatey, B., & Parbhakar-Fox, A. (2022). Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100451. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>

- Wills, B., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Países Bajos: Elsevier Science.
- World Copper Council. (2023). *Global Copper Market Outlook 2023-2024*. International Wrought Copper Council: <https://www.coppercouncil.org/>
- Yu, S., Guo, P., Li, S., Pan, M., Duan, C., Jiang, H., . . . Shi, W. (2024). Investigation on enhancing classification of moist material by variable vibration intensity elastic screening. *Advanced Powder Technology*, 35(1), 104318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ap.2023.104318>
- Yuni, J., & Urbano, C. (2007). *Técnicas Para Investigar 2*. Editorial Brujas. [https://www.google.com.pe/books/edition/Tecnicas\\_Para\\_Investigar\\_2/XWikBfrJ9SoC?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Tecnicas_Para_Investigar_2/XWikBfrJ9SoC?hl=es-419&gbpv=1)
- Zuñiga-Peña, N., Hernandez-Romero, N., Medina-Marin, J., & Barragan-Vite, I. (2022). Optimización de controles mediante algoritmos metaheurísticos aplicado a vehículos aéreos. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del Icbi*, 10(Especi, 10(2), 23-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial2.8638>

# **ANEXOS**

Anexo 1 localización



*Anexo 2 Matriz de consistencia.*

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable Independiente	Dimensión	Metodología
¿Será factible la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para mejorar la precisión y velocidad?	Evaluar la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap para ver cómo mejorar la precisión y velocidad	Con un control adecuado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permitirá mejorar la precisión y velocidad.	Dependiente. Presión y velocidad		Tipo de investigación: Aplicada  Nivel de Investigación: explicativo
¿En qué medida el peso alimentado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla200?	Evaluar en qué medida el peso alimentado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla200	Con una adición adecuada del peso en la alimentación en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el porcentaje pasante a la malla200.	Independiente - Peso		Diseño de Investigación: Experimental  Enfoque de Investigación: Mixto
¿En qué medida la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200?	Evaluar en qué medida la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.	Con un control adecuado de la amplitud de la vibración en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el porcentaje pasante a la malla 200.	Independiente - Amplitud vibración		Población Muestra: 25 kg, 1 kg  Técnica Recolección Datos: observación
¿En qué medida el tiempo empleado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap mejora el efecto en la eficiencia?	Evaluar en qué medida el tiempo de la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap mejora el efecto en la eficiencia.	Un control adecuado del tiempo empleado en la clasificación de partículas de minerales de cobre usando sistemas Ro-Tap nos permite mejorar el efecto en la eficiencia.	Independiente - Tiempo  Dependiente. - Eficiencia		Técnica Procesamiento Información: Estadístico descriptiva y inferencial

Generales

Específico

*Anexo 3 Análisis granulométrica P2*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	35.09	17.55	17.55	82.46	1.95	164.91	9.162
30	590	6.36	3.18	20.73	79.28	0.35	158.55	8.808
50	297	24.25	12.13	32.85	67.15	1.35	134.3	7.461
70	210	18.22	9.11	41.96	58.04	1.01	116.08	6.449
100	150	21.8	10.90	52.86	47.14	1.21	94.28	5.238
140	105	31.07	15.54	68.40	31.61	1.73	63.21	3.512
200	74	54.43	27.22	95.61	4.39	3.02	8.78	0.488
325	44	7.18	3.59	99.20	0.80	0.40	1.6	0.089
400	38	0.05	0.03	99.23	0.78	0.00	1.55	0.086
-400	19	1.55	0.78	100.00	0.00	0.09	0.00	0.000
		200	100					

*Anexo 4 Análisis granulométrica P3*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	28.56	14.28	14.28	85.72	2.04	171.44	12.246
30	590	6.54	3.27	17.55	82.45	0.47	164.9	11.779
50	297	25.02	12.51	30.06	69.94	1.79	139.88	9.991
70	210	18.59	9.29	39.35	60.65	1.33	121.29	8.664
100	150	22.16	11.08	50.43	49.57	1.58	99.13	7.081
140	105	21.34	10.67	61.10	38.90	1.52	77.79	5.556
200	74	45.97	22.98	84.09	15.91	3.28	31.82	2.273
325	44	23.53	11.76	95.85	4.15	1.68	8.29	0.592
400	38	0.53	0.26	96.12	3.88	0.04	7.76	0.554
-400	19	7.77	3.88	100.00	0.00	0.56	-0.01	-0.001
		200.01	100					

*Anexo 5 Análisis granulométrica P4*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	35.9	17.95	17.95	82.05	1.99	164.1	9.117
30	590	7.04	3.52	21.47	78.53	0.39	157.06	8.726
50	297	23.93	11.96	33.43	66.57	1.33	133.13	7.396
70	210	18.09	9.04	42.48	57.52	1.01	115.04	6.391
100	150	20.46	10.23	52.71	47.29	1.14	94.58	5.254
140	105	18.56	9.28	61.99	38.01	1.03	76.02	4.223
200	74	39.06	19.53	81.52	18.48	2.17	36.96	2.053
325	44	26.83	13.41	94.93	5.07	1.49	10.13	0.563
400	38	0.97	0.48	95.42	4.58	0.05	9.16	0.509
-400	19	9.17	4.58	100.00	0.00	0.51	-0.01	-0.001
		200.01	100					

*Anexo 6 Análisis granulométrica P5*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	66.98	16.75	16.75	83.26	4.78	333.02	23.787
30	590	14.81	3.70	20.45	79.55	1.06	318.21	22.729
50	297	50	12.50	32.95	67.05	3.57	268.21	19.158
70	210	36.94	9.24	42.18	57.82	2.64	231.27	16.519
100	150	89.66	22.42	64.60	35.40	6.40	141.61	10.115
140	105	77.46	19.37	83.96	16.04	5.53	64.15	4.582
200	74	55.31	13.83	97.79	2.21	3.95	8.84	0.631
325	44	6.66	1.67	99.46	0.55	0.48	2.18	0.156
400	38	0.57	0.14	99.60	0.40	0.04	1.61	0.115
-400	19	1.61	0.40	100.00	0.00	0.12	0.00	0.000
		400	100					

*Anexo 7 Análisis granulométrica P6*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	67.58	16.90	16.90	83.11	3.75	332.42	18.468
30	590	13.98	3.50	20.39	79.61	0.78	318.44	17.691
50	297	49.91	12.48	32.87	67.13	2.77	268.53	14.918
70	210	36.63	9.16	42.03	57.98	2.04	231.9	12.883
100	150	48.01	12.00	54.03	45.97	2.67	183.89	10.216
140	105	74.56	18.64	72.67	27.33	4.14	109.33	6.074
200	74	86.9	21.73	94.39	5.61	4.83	22.43	1.246
325	44	16.23	4.06	98.45	1.55	0.90	6.2	0.344
400	38	0.49	0.12	98.57	1.43	0.03	5.71	0.317
-400	19	5.71	1.43	100.00	0.00	0.32	0.00	0.000
		400	100					

*Anexo 8 Análisis granulométrica P7*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	61.39	15.27	15.27	84.73	4.39	338.61	24.186
30	590	13.81	3.44	18.71	81.29	0.99	324.8	23.200
50	297	50.54	12.57	31.28	68.72	3.61	274.26	19.590
70	210	37.45	9.32	40.60	59.40	2.68	236.81	16.915
100	150	43.92	10.93	51.52	48.48	3.14	192.89	13.778
140	105	56.42	14.04	65.56	34.44	4.03	136.47	9.748
200	74	76.58	19.05	84.61	15.39	5.47	59.89	4.278
325	44	49.31	12.27	96.87	3.13	3.52	10.58	0.756
400	38	4.25	1.06	97.93	2.07	0.30	6.33	0.452
-400	19	8.32	2.07	100.00	0.00	0.59	-1.99	-0.142
		401.99	100					

*Anexo 9 Análisis granulométrica P8*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	54.51	13.75	13.75	86.25	3.03	345.49	19.194
30	590	14.71	3.71	17.46	82.54	0.82	330.78	18.377
50	297	51.54	13.00	30.45	69.55	2.86	279.24	15.513
70	210	35.07	8.84	39.30	60.70	1.95	244.17	13.565
100	150	43.25	10.91	50.20	49.80	2.40	200.92	11.162
140	105	30.5	7.69	57.90	42.10	1.69	170.42	9.468
200	74	66.39	16.74	74.64	25.36	3.69	104.03	5.779
325	44	66.54	16.78	91.42	8.58	3.70	37.49	2.083
400	38	22.91	5.78	97.20	2.80	1.27	14.58	0.810
-400	19	11.12	2.80	100.00	0.00	0.62	3.46	0.192
		396.54	100					

*Anexo 10 Análisis granulométrica P9*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	50.32	16.77	16.77	83.23	3.15	249.68	15.605
30	590	10.46	3.49	20.26	79.74	0.65	239.22	14.951
50	297	38.13	12.71	32.97	67.03	2.38	201.09	12.568
70	210	27.45	9.15	42.12	57.88	1.72	173.64	10.853
100	150	32.56	10.85	52.97	47.03	2.04	141.08	8.818
140	105	40.41	13.47	66.44	33.56	2.53	100.67	6.292
200	74	76.54	25.51	91.96	8.04	4.78	24.13	1.508
325	44	21.56	7.19	99.14	0.86	1.35	2.57	0.161
400	38	0.91	0.30	99.45	0.55	0.06	1.66	0.104
-400	19	1.66	0.55	100.00	0.00	0.10	0.00	0.000
		300	100					

*Anexo 11 Análisis granulométrica P10*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	44.5	14.83	14.83	85.17	2.78	255.5	15.969
30	590	10.48	3.49	18.33	81.67	0.66	245.02	15.314
50	297	38.46	12.82	31.15	68.85	2.40	206.56	12.910
70	210	27.37	9.12	40.27	59.73	1.71	179.19	11.199
100	150	34.06	11.35	51.62	48.38	2.13	145.13	9.071
140	105	62.37	20.79	72.41	27.59	3.90	82.76	5.173
200	74	50.36	16.79	89.20	10.80	3.15	32.4	2.025
325	44	25.69	8.56	97.76	2.24	1.61	6.71	0.419
400	38	0.39	0.13	97.89	2.11	0.02	6.32	0.395
-400	19	6.32	2.11	100.00	0.00	0.40	0.00	0.000
		300	100					

*Anexo 12 Análisis granulométrica P11*

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	Peso g	f(x)	G(x)	F(x)	g/min	Peso g Pas.	g/min
20	840	45.81	15.27	15.27	84.73	2.86	254.19	15.887
30	590	11.23	3.74	19.01	80.99	0.70	242.96	15.185
50	297	36.88	12.29	31.31	68.69	2.31	206.08	12.880
70	210	28.15	9.38	40.69	59.31	1.76	177.93	11.121
100	150	34.7	11.57	52.26	47.74	2.17	143.23	8.952
140	105	60.39	20.13	72.39	27.61	3.77	82.84	5.178
200	74	62.39	20.80	93.18	6.82	3.90	20.45	1.278
325	44	18.63	6.21	99.39	0.61	1.16	1.82	0.114
400	38	0.44	0.15	99.54	0.46	0.03	1.38	0.086
-400	19	1.38	0.46	100.00	0.00	0.09	0.00	0.000
		300	100					