

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**VENTAJAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
DE PRE-CONCENTRACIÓN EN SECO DE MINERALES
AURÍFEROS MEDIANTE LA TRANSMISIÓN
DE RAYOS X**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Presentado por:

Bach. Luis Arturo León Rivera

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

VENTAJAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE

PRE-CONCENTRACIÓN EN SECO DE MINERALES

AURÍFEROS MEDIANTE LA TRANSMISIÓN

DE RAYOS X

Trabajo sustentado y aprobada el día 05, Julio, 2024 estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE:

Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

SECRETARIO:

Dr. Freddy Felipe Cori Nina

VOCAL:

Msc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo

ASESOR:

Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco


CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Alberto Savino Pacheco Pacheco, en mi condición de Asesor **CERTIFICO** que el Informe de Trabajo de Suficiencia Profesional: **VENTAJAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PRE-CONCENTRACIÓN EN SECO DE MINERALES AURÍFEROS MEDIANTE LA TRANSMISIÓN DE RAYOS X**, desarrollado por el Bach. **LUIS ARTURO LEÓN RIVERA** para optar el Título de Ingeniero Metalurgista

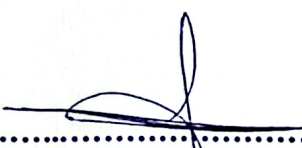
Que, conforme al análisis de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual de la UNJBG, mediante el software de similitud textual **TURNITIN** obtiene los siguientes resultados:

Código de identificación del Reporte	:	oid: 23228:372919135
Porcentaje de similitud	:	0%
Nivel	:	Permitido, coincidencia baja

Por lo que **CERTIFICO QUE LA SIMILITUD** el Informe de Trabajo de Suficiencia Profesional está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**. El tesista puede continuar con los trámites correspondientes. Se emite el presente certificado para los fines correspondientes.


.....
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco
DNI N° 00419686

Asesor ORCID 0000-0002-5576-0547


.....
Bach. Luis Arturo León Rivera
DNI N° 70443154
Correo: lleonr@unjbg.edu.pe

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Luis y Susana, por su constante apoyo y amor incondicional. Su ejemplo y dedicación me han inspirado a alcanzar este logro.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su guía y fortaleza a lo largo de este camino. Sin su presencia y bendiciones, este logro no habría sido posible.

CONTENIDO

PORTADA	i
HOJA DE JURADOS	ii
CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del tema	2
1.2. Importancia de la investigación	3
1.3. Justificación de la investigación	5

1.3.1. Justificación técnica	5
1.3.2. Justificación económica.	6
1.4. Objetivos.	7
1.4.1. Objetivo general.	7
1.4.2. Objetivos específicos.	7
CAPITULO II	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1. Descripción de la tecnología.	9
2.1.1. Clasificación basada en sensores.	9
2.1.2. Sensores de rayos X.	10
2.1.3. Proceso de clasificación.	12
2.1.4. Unidades mineras con ore sorting.	18
CAPITULO III	20
FUNDAMENTO METODOLÓGICO	20
3.1. Evaluación y discusión metalúrgica de los resultados.	20
3.1.1. Aplicación de ore sorting.	20
3.1.2. Recetas de sorteabilidad.	20

3.1.3. Densidad mínima (MD).	23
3.1.4. Coverage	25
3.1.5. Resultados obtenidos.	27
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Cálculo de densidad media de muestra</i>	25
Tabla 2 <i>Cálculo de coverage en la faja transportadora</i>	27
Tabla 3 <i>Datos de pruebas realizadas</i>	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Transporte de mineral chancado de baja ley hacia el botadero	10
Figura 2	Clasificador de rayos X STEINERT XSS T EVO 5	11
Figura 3	Alimentación de mineral a la tolva ROM	12
Figura 4	Sistema de separación, detección y clasificación de mineral	13
Figura 5	Emisión de rayos X al interior del equipo	14
Figura 6	Clasificación del mineral según absorbancia definida	15
Figura 7	Vista general del proceso de clasificación por Rayos X	17
Figura 8	Minerales antes y después de clasificación por Rayos X	17
Figura 9	Densidad de mineral escaneado para las pruebas	21
Figura 10	Separación simulada por alta energía	22
Figura 11	Cantidad de pixeles por material	23
Figura 12	Escaneo de muestra	24
Figura 13	Vista de sensores para cálculo de coverage	26
Figura 14	Ley de cabeza y ley producto	29
Figura 15	Mass pull vs ley de producto	30
Figura 16	Tonelaje del producto vs ley del producto	31
Figura 17	Up grade vs granulometría	32
Figura 18	Eficiencia de detección con RXT	33

RESUMEN

La industria minero-metalúrgica, en el contexto actual exige el uso de tecnología innovadora en todos los procesos unitarios que conforman el procesamiento de minerales para alcanzar los niveles de competencia necesarios, a fin de garantizar la competitividad de una empresa minera. En ese contexto, la aplicación del sistema Ore Sorting, sistema denominado como preconcentración de mineral, permitirá la identificación y clasificación de manera automática de partículas de interés comercial en función de sus propiedades fisicoquímicas como densidad, composición química y reflectancia haciendo uso de instrumentación moderna como sensores que garantizan la clasificación y/o separación del mineral concentrado y estéril. La eliminación de material no deseado (estéril) convierte el procesamiento de minerales en un proceso más eficiente al reducir costos relacionados al transporte, conminución (chancado y molienda) y posterior procesamiento de material útil, lo que a su vez se traduce en ahorros por menor consumo de agua, energía y productos químicos. Específicamente para el tratamiento de mineral aurífero, el uso de esta tecnología permite viabilizar económicamente el procesamiento de mineral con menores leyes.

Palabras Clave: Pre-Concentración, Sensores, Reflectancia

ABSTRACT

The mining and metallurgical industry in the current context demands the use of innovative technology in all the unit processes that make up mineral processing to achieve the necessary competition levels in order to guarantee the competitiveness of a mining company. In this context, the application of the Ore Sorting system, a system known as mineral pre-concentration, will allow for the automatic identification and classification of particles of commercial interest based on their physicochemical properties such as density, chemical composition, and reflectance, making use of modern instrumentation such as sensors that guarantee the classification and/or separation of concentrated and barren mineral. The elimination of unwanted material (waste rock) makes mineral processing a more efficient process by reducing costs related to transportation, comminution (crushing and grinding) and subsequent processing of useful material, which in turn translates into savings due to lower consumption of water, energy and chemicals. Specifically for the treatment of gold ore, the use of this technology makes it economically feasible to process ore with lower grades.

Keywords: Pre Concentration, Sensors, Reflectance

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo monográfico comprende dos capítulos, el primero está enfocado en la conceptualización de la preconcentración utilizando el ore sorting como medio tecnológico que permite la optimización de recursos en la separación de minerales valiosos, se expone las justificaciones, importancia y objetivos que explican la importancia de esta herramienta en la industria minera; el segundo capítulo, comprende la descripción tecnológica de los diferentes sensores utilizados, se hace incidencia en la clasificación basada en la utilización de sensores basados en la emisión de rayos x; se hace un breve recuento de unidades que pertenecen a la gran minería que implementaron este sistema de preconcentración, el capítulo termina con la evaluación y discusión metalúrgica de la aplicación de esta tecnología en una unidad minera de oro. Finalmente, las conclusiones que se desprenden del presente trabajo dan cuenta de la relevancia en la implementación del ore sorting en el contexto actual donde el procesamiento de minerales cada vez con menores leyes, se presenta como una importante alternativa.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del tema

La tecnología que permite la clasificación de minerales antes de que ingrese a las plantas de procesamiento es conocida como “Ore Sorting”, principalmente antes de los procesos de trituración y molienda, separando e identificando de esta forma los minerales de interés económico de aquellos considerados como ganga.

De acuerdo con la información vertida en la página web de METSO (2024) el sistema Ore Sorting, permite retirar el mineral de baja ley para procesar solo el mineral que contribuye al incremento de beneficio económico en la operación. Indica además, que la implementación de esta tecnología en operaciones mineras peruanas ha logrado incrementar leyes de cabeza en el orden de 10 a 20 %, este aumento sustancial representa una menor cantidad de material a procesar; por lo que se incrementa la eficiencia en el proceso de concentración, traduciéndose finalmente en mejores ratios de producción para la empresa.

En los siguientes apartados se intentará justificar el uso de este sistema en aspectos técnicos, económicos, ambientales y operativos.

1.2. Importancia de la investigación

Un aspecto muy trascendental en la implementación de esta tecnología está relacionado con el impacto ambiental, la disminución significativa de la cantidad de mineral transportado hacia las plantas de procesamiento, reducirá de manera sustancial el consumo de combustibles fósiles, reduciéndose de esta manera, la emisión de gases generadores del efecto invernadero.

Una publicación de Instituto de Ingenieros del Perú, a través de su portal web, refiere la importancia del uso de este sistema de preconcentración Ore Sorting, sistema implementando en la unidad minera San Rafael de Minsur. Según refiere el gerente de procesos metalúrgicos de dicha minera, Ing. Pedro Condori, quien asevera según experiencia propia, que la tecnología del Ore Sorting contribuye en el incremento del valor global del yacimiento al prolongar la vida útil de la mina y en la generación de valor agregado al convertir material de desmonte en material económicamente rentable, relaciona el incremento de la producción de estaño de la mina con el uso de esta tecnología al aumentar la capacidad de la concentradora y además señala la intención de

replicar el uso de dicha tecnología en su otra unidad minera Marcobre donde se procesa cobre (IIMP, 2018).

Otros aspecto importante sobre el uso de este sistema clasificador, es su versatilidad para ser instalado en diferentes puntos estratégicos según sea la necesidad operativa, un claro ejemplo de ello es resumido en el artículo *“Antamina evaluará este año adquisición de tecnología Ore Sorting para flota de palas”* de Rumbo Minero (2022), donde se señala la intención de la primera productora de cobre en el país, mina Antamina, en la adquisición del sistema tecnológico Ore Sorting para ser instalados en las cucharas de sus palas, este sistema está basado en el análisis de rayos X con un procesamiento de hasta 10 imágenes por segundo; lo que permite calcular las leyes de cabeza promedio ya sea de cobre, zinc o plata. De esta forma, en las pruebas preliminares se logró redireccionar en una semana de evaluación entre 15 a 20 camiones hacia la planta concentradora que inicialmente eran destinados hacia su almacenamiento en botaderos por su bajo contenido de ley supuesto inicialmente; así mismo, hace referencia de que actualmente ya cuentan con este sistema instalado sobre sus fajas transportadoras, el sistema al que se hace referencia hace uso de rayos gamma para la disgregación de material

con leyes beneficiosas para su direccionamiento de forma directa hacia los procesos de apilamiento, molienda y flotación.

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación técnica

- **Mayor eficiencia de procesamiento.**

El *ore sorting*, permite la separación automática de material estéril que no entrará a etapas posteriores de conminución y concentración, el “*ore sorting*” es una técnica usada principalmente en yacimientos mineros que permite disgregar el mineral de alta ley que será enviado a la planta de procesamiento; de esta manera este sistema permite optimizar la clasificación contribuyendo de manera significativa a elevar la ley de cabeza de las plantas concentradoras al mismo tiempo que reduce costos relacionados con conminución y procesamiento (Escala et al., 2021).

- **Revalorización de leyes marginales.**

Una de las principales características de este sistema es que permite reconsiderar la explotación de mineral con leyes bajas considerado como económicamente inviables, este mineral normalmente clasificado como desmonte representa pasivos ambientales; por lo que el aprovechamiento de

la fracción que contiene una mejor ley justificaría la implementación de este sistema (METSO, 2024).

1.3.2. Justificación económica.

La empresa Minsur instaló en el año 2016 en su unidad minera San Rafael en Puno, el sistema de clasificación Ore Sorting a fin de procesar 3600 toneladas de desmonte (mineral con ley por debajo de ley de corte). Para llevar a cabo la preconcentración, se instalaron sensores de transmisión de rayos X que separan de manera eficiente las rocas con inclusiones de estaño con el uso de eyectores neumáticos. Gracias a este sistema se logró incrementar la ley de cabeza de 0,6 % a 2,76 %, la inversión en este sistema requirió US\$ 24 millones, monto que fue recuperado en solo 4 meses (Boletín Minero, 2020).

En el mismo artículo, se hace mención del caso particular de una mina de cobre ubicada en el suroeste de Estados Unidos, donde el rechazo generado por el sobre tamaño en la descarga de molienda SAG representaba el 25 % de alimentación fresca al molino, es decir que había una alimentación promedio de 300 t/h de pebbles reciclado, la implementación del sistema ore sorting basado en una ley de corte de 0,45 % de cobre generó un rechazo de 30 % a 60% del flujo de alimentación de pebbles al molino disminuyendo de manera sustancial el cuello de botella generado por este sobre-rechazo. La

inversión tuvo un costo de US\$ 10 millones, por lo que según las estimaciones se esperaba un rango de 11,3 a 19,3 meses la recuperación del capital invertido.

1.4. Objetivos.

El desarrollo del presente trabajo monográfico tiene como eje central el proporcionar una comprensión completa de las ventajas de la implementación de un sistema de pre-concentración de mineral aurífero por rayos X en plantas concentradoras. De esta manera se intenta aportar con la información vertida a los profesionales de la industria minero-metalúrgica que estén considerando implementar esta tecnología en sus operaciones.

1.4.1. Objetivo general.

- Analizar las ventajas de la implementación de un sistema de pre-concentración de mineral aurífero por rayos X en plantas concentradoras.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Describir los principios físicos y tecnológicos del sistema de pre-concentración de mineral aurífero por rayos X.

- Identificar los desafíos y las oportunidades asociados con la implementación de un sistema de pre-concentración de mineral aurífero por rayos X.
- Comparar el sistema de pre-concentración de mineral aurífero por rayos X con otras tecnologías.
- Presentar un caso de estudio que demuestre la viabilidad y los beneficios de la implementación de un sistema de pre-concentración de mineral aurífero por rayos X en una planta concentradora específica.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Descripción de la tecnología.

2.1.1. Clasificación basada en sensores.

Las propiedades intrínsecas de los diferentes minerales como densidad, forma y características electromagnéticas son aprovechadas por diferentes tipos de sensores que generalmente están montados en zonas estratégicas como en las fajas transportadoras, tolvas, etc. La información proporcionada por el sensor, es analizada por computadora la cual está programada para determinar la composición del mineral, en base a esta información se utiliza un sistema de clasificación mecánico para separar el mineral. En orden jerárquico el sensor más utilizado en la industria minera está basado en la difracción de rayos X, complementado por sensores basados en clasificación por color y láser, que generalmente es usado para definir tamaños (Hochschild Mining PLC, 2023).

Figura 1

Transporte de mineral chancado de baja ley hacia el botadero



Nota: La instalación de sensores sobre la faja permite recuperar mineral que normalmente sería rechazado por su bajo contenido de oro. Adaptada de “Clasificación de minerales en tiempo real mediante análisis de color y textura”, por <https://revistamineria.com.pe> , 2023.

2.1.2. Sensores de rayos X.

Equipos como el XSS T EVO 5.0 de la empresa alemana STEINERT son capaces de penetrar partículas de hasta 100 mm. a través de la transmisión de rayos X sobre el mineral a clasificar. Esta tecnología se rige bajo el principio de energía dual, es decir que todos los materiales presentan diferentes niveles

de absorción de rayos x, esta diferencia es procesada para clasificar el material según sea sus respectivas densidades, este sistema es capaz de detectar inclusiones o acumulaciones que son altamente valoradas por su contenido metálico; otra característica de este sistema es que al basarse en el uso de energía transmisiva para la clasificación, no es necesario que la superficie a analizar cumpla con ciertos criterios de limpieza (STEINERT, 2024).

Figura 2

Clasificador de rayos X STEINERT XSS T EVO 5



Nota: Equipo basado en el principio de energía dual, los materiales absorben los rayos X de manera diferente dependiendo de su composición elemental. Adaptada de “STEINERT XSS® T EVO 5.0”, por <https://steinertglobal.com>, 2023..

2.1.3. Proceso de clasificación.

De acuerdo con la información del fabricante STEINERT (2024), en el proceso de clasificación se realiza las tareas de: separación, detección y clasificación, previamente el mineral es acarreado con equipo auxiliar para alimentar al equipo.

Figura 3

Alimentación de mineral a la tolva ROM



Nota: Equipo auxiliar usado en pequeña minería. Adaptada de “Steinert XSS X-Ray Sorting System”, por <https://www.youtube.com/watch?v=No2jXSOago4>, 2023.

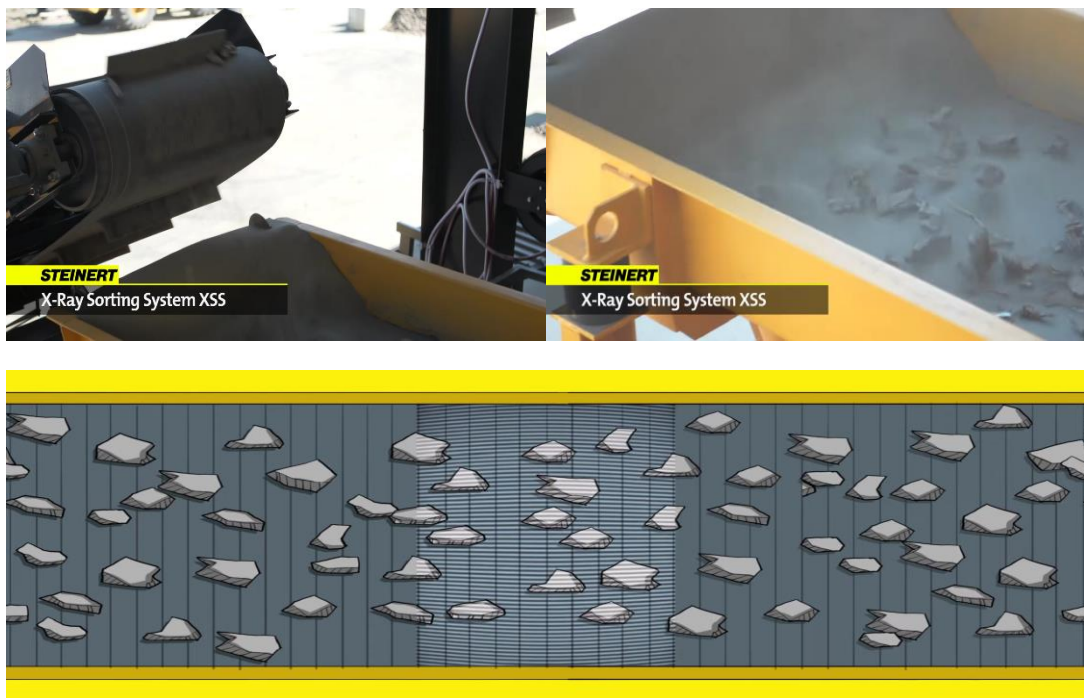
- **Separación.**

El material destinado a la clasificación es alimentado sobre una faja transportadora de manera uniforme con un *vibration conveyor*, este componente alimenta de manera controlada a la faja, el efecto vibratorio

distribuye y separa el material uniformemente a fin de que todas las partículas sean irradiadas por los rayos X.

Figura 4

Sistema de separación, detección y clasificación de mineral



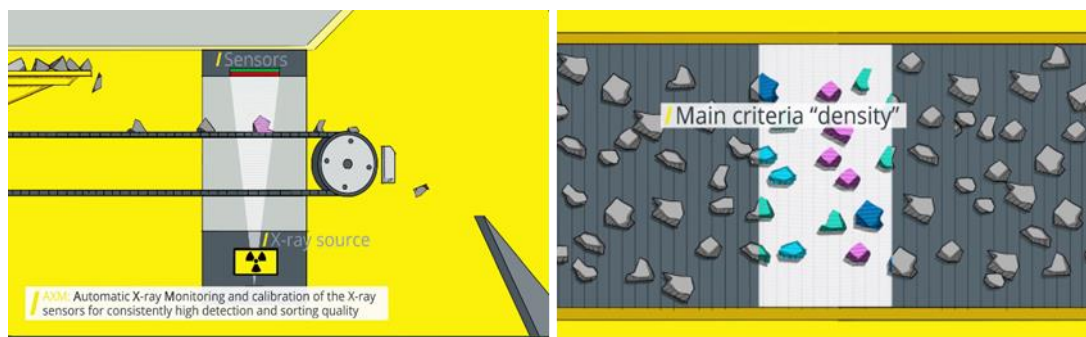
Nota: Arriba: el componente vibration convoyer garantiza alimentación continua y uniforme. Abajo: Distribución uniforme sobre la faja transportadora. Adaptada de "STEINERT XSS® T EVO 5.0", por <https://steinertglobal.com>, 2023.

- **Detección.**

El material contenido en una porción de faja que pasa sobre la fuente de emisión de rayos X, es irradiado con una cantidad inicial de energía; de esta energía y de acuerdo con las características de cada partícula se genera una cantidad de radiación no absorbida, el cual es captado y medido por detectores situados en la parte superior de la faja, esta variación es cuantificada y clasifica a las partículas según los valores calculados.

Figura 5

Emisión de rayos X al interior del equipo de clasificación de mineral



Nota: Izquierda: Fuente de emisión de rayos X. Derecha: Caracterización de cada partícula según la intensidad de energía absorbida. Adaptada de "STEINERT XSS® T EVO 5.0", por <https://steinertglobal.com>, 2023.

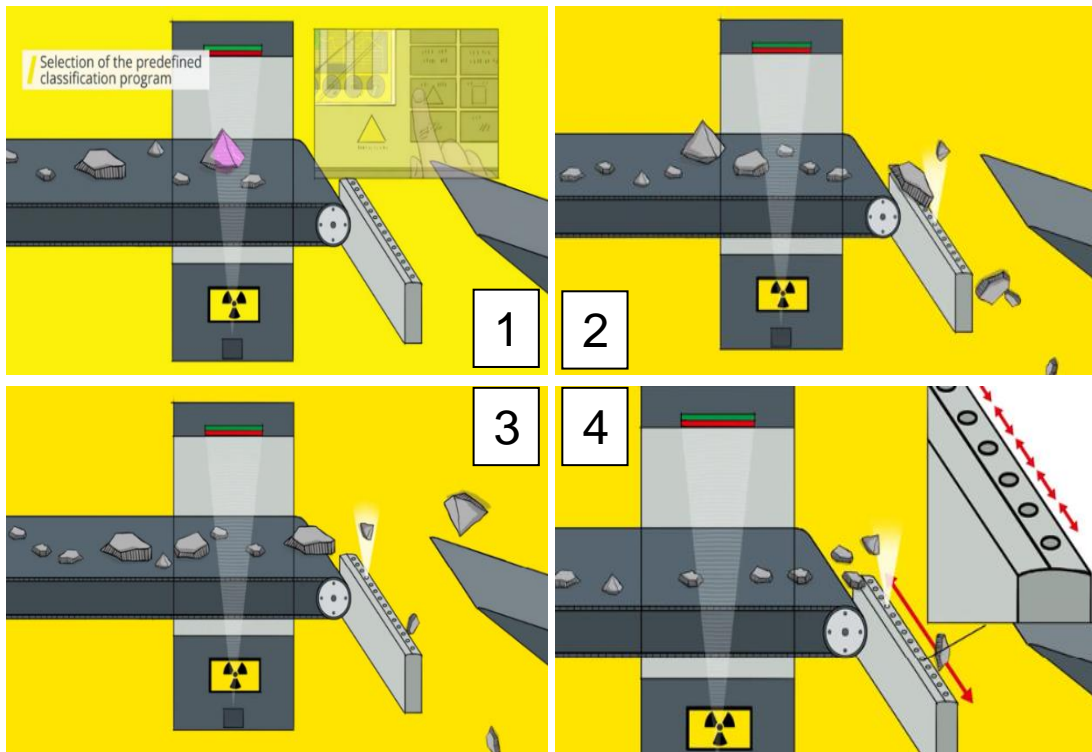
- **Clasificación.**

Se establece un criterio específico de selección, las partículas que cumplen con este criterio son separadas a través de la inyección de aire

comprimido, de esta forma el material clasificado es separado del grueso del material.

Figura 6

Clasificación del mineral según absorbancia definida



Nota: Figura1: Medición según características predefinidas. Figura2: Clasificación con inyección de aire de partículas que cumplen el criterio de selección. Figuras3: Partículas seleccionadas y rechazadas. Figura4: distribución estratégica de válvulas para inyección de aire. Adaptada de "STEINERT XSS® T EVO 5.0", por <https://www.steinertglobal.com>, 2023.

Según la descripción del fabricante STEINERT (2024), el equipo de pre-clasificación X STEINERT XSS T EVO 5 presenta las siguientes ventajas tecnológicas, las cuales permiten que la clasificación con este equipo posea altos niveles de fiabilidad operativa:

- **MDE**

Acrónimo para la evaluación de datos multicapa, mediante este sistema se puede detectar simultáneamente diferentes compuestos para ser clasificados según sus características.

- **AXM**

Monitoreo y calibración automatizado de sensores de rayos X, de esta manera la aplicación y posterior análisis de la cantidad de rayos X absorbido por los materiales permite la identificación de la composición de cada fragmento analizado.

- **HR valve pitch**

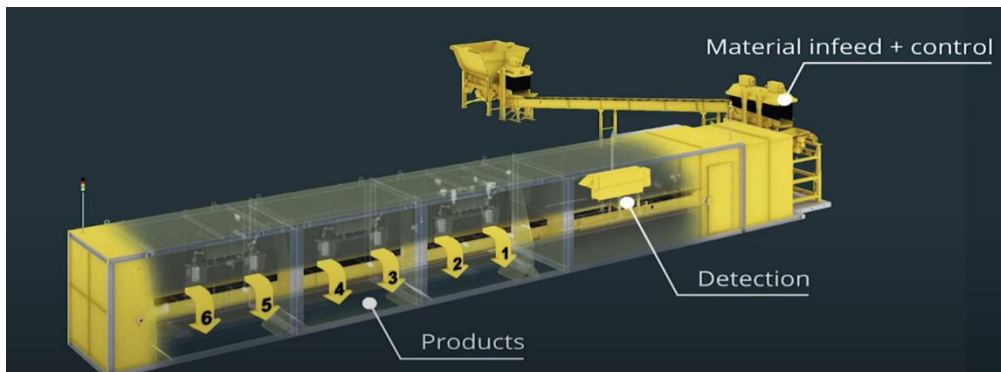
Permite la clasificación de material fino espaciando estratégicamente válvulas, permite la eyección de partículas pequeñas valiosas.

- **Auto X clean**

Los equipos modernos tienen la capacidad de limpiar la zona de escaneo de rayos X de manera automática.

Figura 7

Vista general del proceso de clasificación por Rayos X



Nota: La figura muestra en conjunto las diferentes zonas donde se realiza la pre-concentración del mineral. Adaptada de "STEINERT LSS", por <https://www.youtube.com/watch?v=aH-DBFUvhQ>, 2019.

Figura 8

Minerales antes y después de clasificación por Rayos X



Nota: La imagen de la derecha muestra partículas con contenido acumulado de metal valioso, existe un contraste marcado sobre la imagen de la izquierda. la pre-concentración del mineral. Adaptada de "Comex X-ray sorting unit CXR-1000 for enrichment of gold ore at Palito mine in Brasi", por <https://www.youtube.com/watch?v=fHn-TkctXSA>, 2020.

2.1.4. Unidades mineras con ore sorting.

Para la extracción de mineral aurífero, la aplicación del *ore sorting* puede enfocarse sobre el mineral chancado previo al ingreso de molienda, en ese sentido los sensores “pre-concentran” el mineral para seleccionar solo el material mineralizado, cumpliendo objetivamente el propósito de esta tecnología de reducir la cantidad de material que ingresa a planta (Hochschild Mining PLC, 2023).

Así mismo, esta tecnología es totalmente aplicable para material considerado como económicamente poco rentable, es el caso de la minera Esperanza ubicada en la provincia de Nazca, donde la explotación de mineral de alto costo operativo estaba asociado a la baja ley de cabeza, la implementación de la clasificación de mineral por sensores permitió revertir esta situación. Actualmente el uso de sensores permite analizar y clasificar el mineral según su composición, de esta forma el aprovechamiento de mineral con mejor ley permite catalogar a mina Esperanza como una mina altamente rentable (REDIMIN, 2023).

El caso puntual de la mina El Teniente en Chile, considerada como la mina subterránea más grande del mundo, la disminución su ley de corte de

minerales de cobre de 0,7 % a 0,4 % ha sido gracias a la implementación del sistema de concentración con sensores, *ore sorting* (REDIMIN, 2023).

CAPITULO III

FUNDAMENTO METODOLÓGICO

3.1. Evaluación y discusión metalúrgica de los resultados.

3.1.1. Aplicación de ore sorting.

Los siguientes datos pertenecen a la puesta en marcha de una planta Ore Sorter en una minera productora de oro ubicada en la región sur de Perú donde se propuso procesar 4 860 t. de mineral, los resultados obtenidos muestran las ventajas de utilizar esta herramienta tecnológica.

3.1.2. Recetas de sorteabilidad.

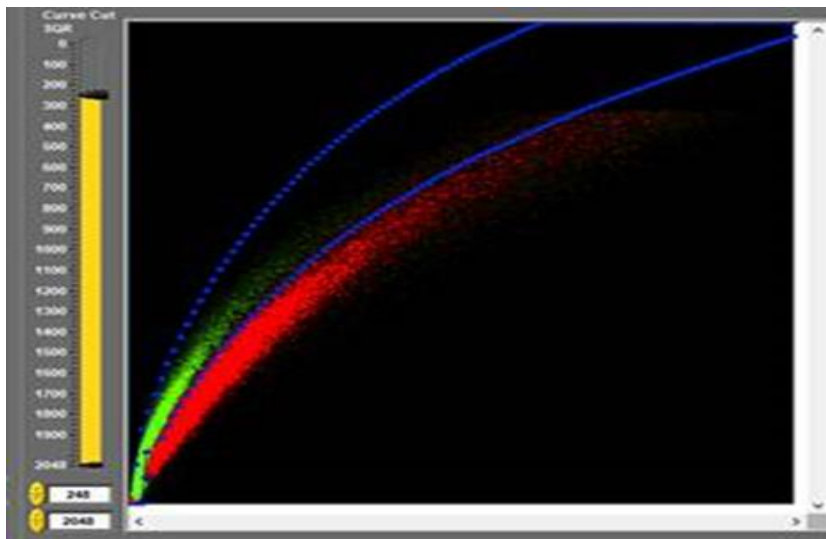
Una receta de sorteabilidad es un algoritmo matemático, el cual decide en tiempo real si una roca debe ser o no eyectada, la decisión se realiza al analizar las propiedades físicas del objeto escaneado por los sensores.

En el desarrollo de las pruebas se utilizó las recetas “Combinada” y “G8”. La elaboración de recetas inicia con el escaneo del material, se mapea los resultados del escaneo con los resultados de los rayos X con frecuencias de alta y baja energía (para compensar la variabilidad de tamaños de la muestra), su propósito es determinar la densidad de cada pixel según la resolución del sensor, luego se procede a plotear todos los pixeles en una

nube de puntos e identificar áreas de interés a través de curvas de separación como se muestra en la figura 9.

Figura 9

Densidad de mineral escaneado (alta y baja energía) para las pruebas



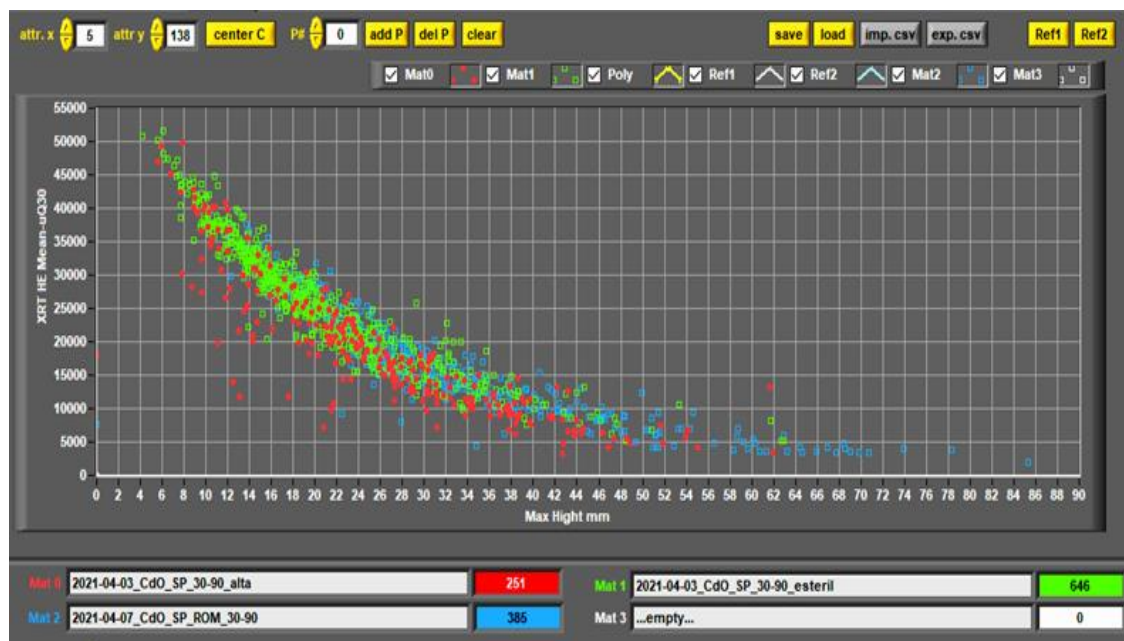
Nota: En verde los pixeles más densos por contener material con leyes más altas, en rojo el estéril y las curvas azules son las que limitarán la zona de producto que ajustadas deberán regir el setting de una receta.

A partir de este escaneo, se construye los algoritmos de separación (recetas) o ajusta algunos que son genéricos (con datas de materiales de otras minas), que pueden ser ajustados a los resultados del escaneo de nuestro material. Estas recetas permiten simular la separación del material escaneado que luego son probadas en la operación, en las figuras 10 y 11 se muestra,

como ejemplo, la separación por granulometría simulada usando un algoritmo genérico N° 8, de ahí su nombre G8.

Figura 10

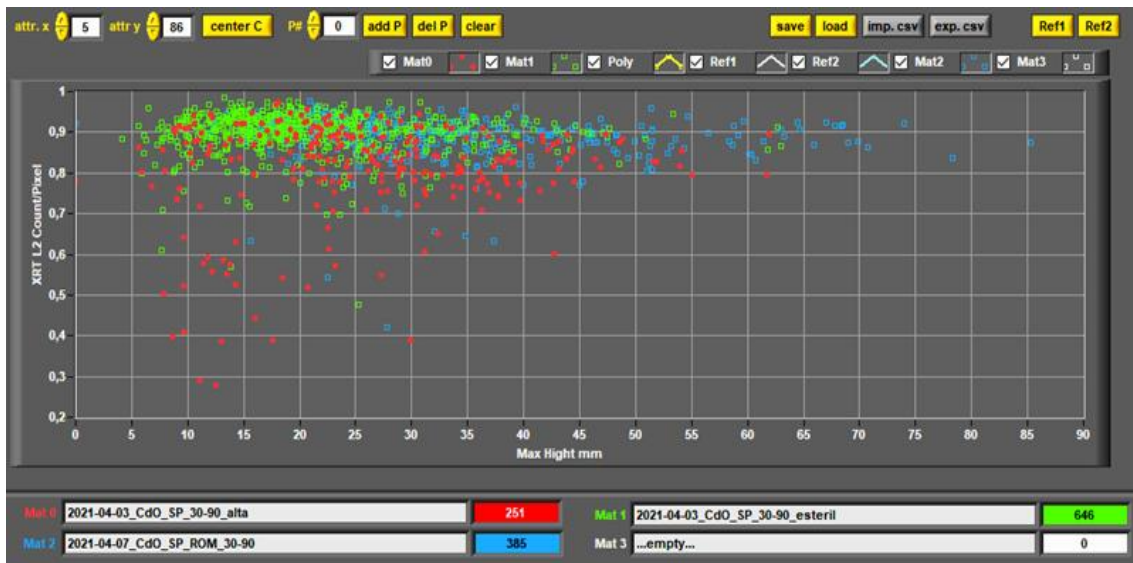
Separación simulada por alta energía



Nota: La figura muestra el comportamiento del sensor de rayos X de alta energía por granulometría. Los puntos rojos son los resultados en material de alta ley que al ser más densos dejan pasar menos energía.

Figura 11

Cantidad de pixeles por material



Nota: La cantidad de pixeles de cada material que se logra separar por granulometría usando la receta G8.

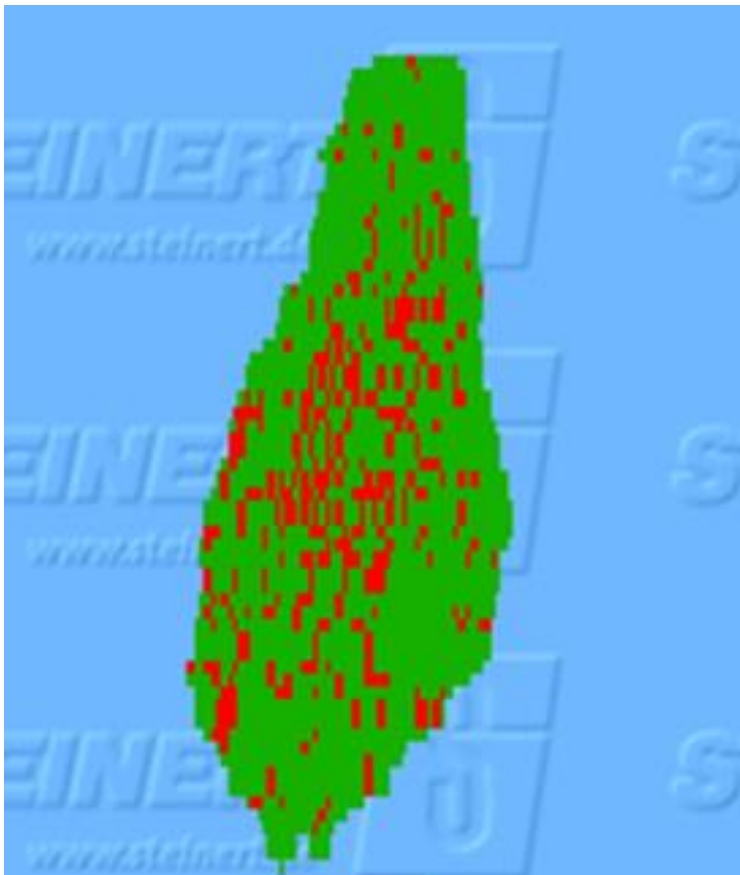
3.1.3. Densidad mínima (MD).

Este valor define el “limite” mínimo de densidad que debe tener una muestra para ser eyectada como producto, se determina una densidad media para cada roca al analizar sus píxeles, el algoritmo decide si cada pixel pertenece o no a la zona de interés limitada por las curvas de las recetas como se ve en la figura 9.

Luego se hace un conteo de la cantidad de pixeles con densidades pertenecientes a la zona de interés y se divide entre la cantidad total de pixeles, obteniendo un porcentaje que luego se comparará con el MD definido y se decidirá si se eyecta al producto o se rechaza al desmonte.

Figura 12

Escaneo de muestra



Nota: Los puntos verdes son pixeles con densidad catalogados dentro de la zona de mineral y los rojos en la zona de desmonte.

Para el cálculo de la densidad media DM, el software realiza un cálculo de relación entre el total de pixeles rojos y lo divide sobre el conteo general de todos los pixeles (rojos y verdes).

Tabla 1

Cálculo de densidad media de muestra.

Pixeles	cantidad
rojos	458
verdes + rojos	1 354
Densidad	33,80 %

Nota: Para calcular DM se divide $458/1354 = 33,80 \%$

Con el valor obtenido, el 33 % de los pixeles en la muestra tienen baja densidad. Así, cuando subimos el MD en realidad buscamos muestras con mayor cantidad de desmonte o de menor calidad. Si la muestra fuera analizada con un seteo de MD = 79 %, la muestra en cuestión sería eyectada como producto puesto que contiene menos desmonte que el límite predefinido.

3.1.4. Coverage

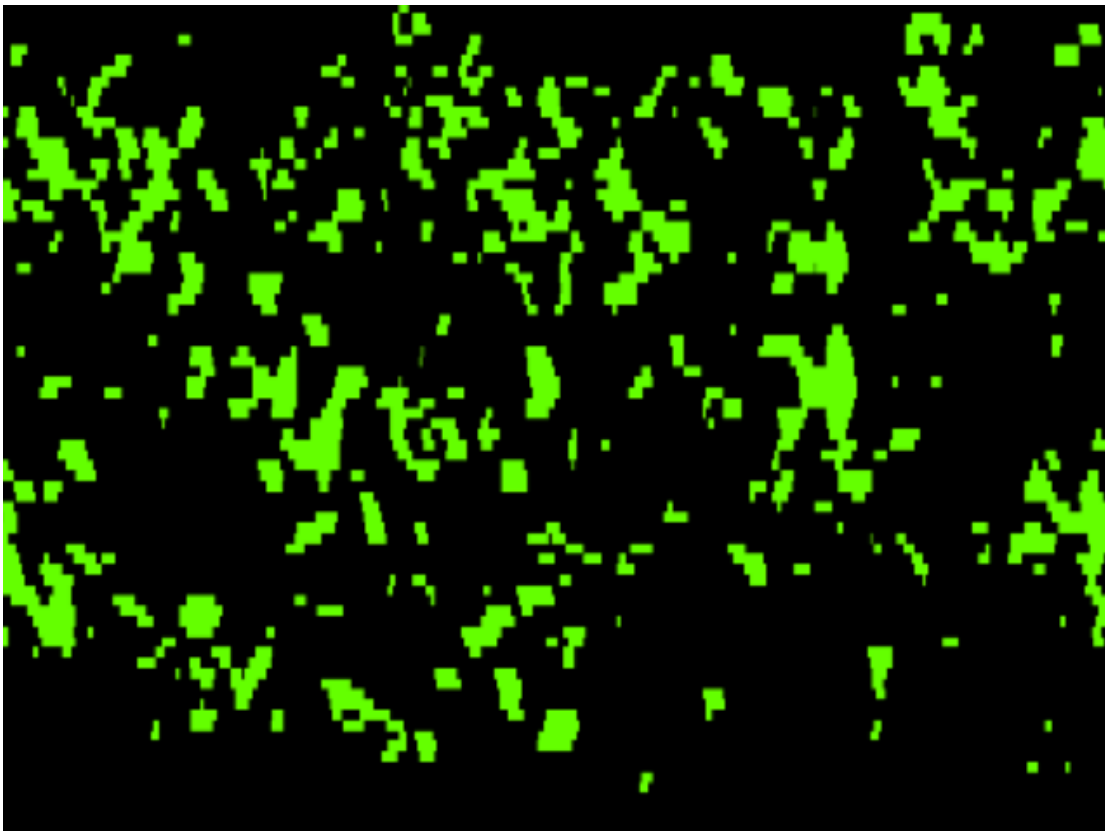
Otra de las variables que genera gran impacto en los resultados es el coverage. Esta variable mide la distribución de material sobre las fajas del sorter e influye mucho en la selectividad de análisis del sensor. Si las muestras en las fajas del sorter están dispuestas muy cerca entre sí puede generar

errores de lectura o la eyección de una muestra definida por los sensores como producto puede arrastrar muestras cercanas que deberían ser rechazadas, diluyendo el contenido de oro del producto.

La forma de calcular esta variable se presenta en la tabla 2.

Figura 13

Vista de sensores para cálculo de coverage



Nota: El fabricante recomienda tener esta variable en un rango de 5% a 10%.

Tabla 2

Cálculo de coverage en la faja transportadora

Pixeles	cantidad
verdes	38 784
verdes + rojos	896 000
Coverage	4,30%

Nota: Para calcular el coverage se divide $38\ 784/896\ 000 = 4,30\ \%$

3.1.5. Resultados obtenidos.

Le logró procesar 4 588,68 toneladas de mineral a lo largo de 24 días de evaluación con ley promedio de 0,73 g/t con un rango de leyes entre 0,29 a 2,84 g/t. Esta variación de leyes en el mineral procesado es un claro indicio de la alta diseminación que existe en la mineralogía; por lo que resulta muy conveniente un método o proceso que permita uniformizar y/o concentrar la ley, después del proceso de sorteo de obtuvieron rangos entre 0,55 y 4,53 g/t.

La información fuente a partir de la cual se presenta las siguientes figuras y cálculos son mostrados en la siguiente tabla:

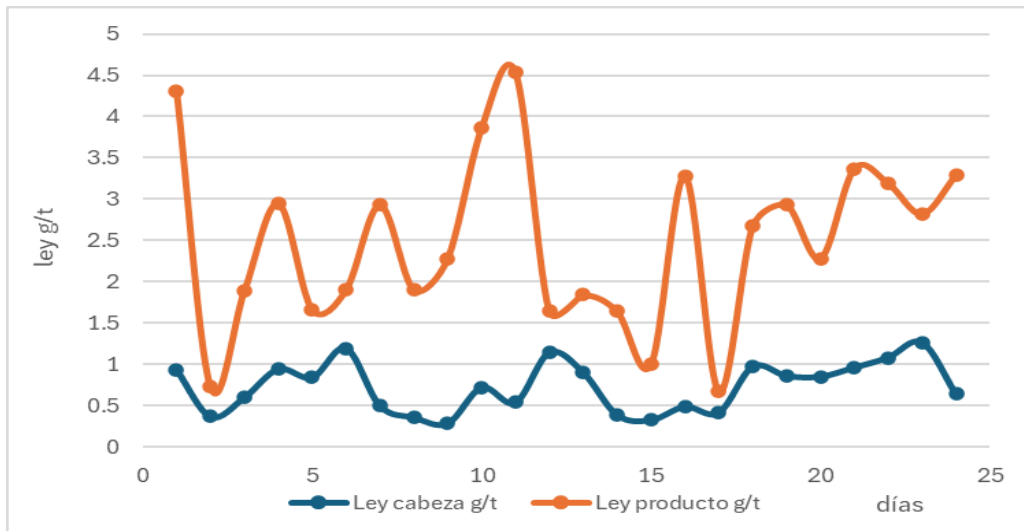
Tabla 3*Datos de pruebas realizadas*

Prueba	Peso Inicial t	Peso Producto t	Rechazo t	Receta	MD	Tamaño mm	Mass pull	Coverage	ley cab Au (g/t)	Ley prod Au (g/t)	ley rechaz AU (g/t)	Upgrade
1	93,22	6,93	86,29	G8	81	30-90	0,07	0,02	0,93	4,31	0,81	4,63
2	191,25	29,93	161,37	G8	85	30-90	0,16	0,06	0,37	0,73	0,31	1,97
3	189,8	30,4	159,6	G8	86	30-90	0,16	0,06	0,60	1,89	0,30	3,15
4	87,97	11,8	76,17	Combinada	83	10-30	0,13	0,06	0,94	2,95	0,37	3,14
5	85,84	13,21	72,63	Combinada	84	10-30	0,15	0,06	0,84	1,66	0,46	1,98
6	87,7	15,66	72,04	Combinada	85	10-30	0,18	0,07	1,19	1,90	0,88	1,60
7	192,71	18,09	174,62	G8	82	30-90	0,09	0,02	0,50	2,93	0,40	5,86
8	192,74	23,98	168,76	G8	83	30-90	0,12	0,03	0,36	1,90	0,30	5,28
9	190,81	25,01	165,8	G8	84	30-90	0,13	0,03	0,29	2,28	0,20	7,86
10	92	9,74	82,26	Combinada	81	10-30	0,11	0,07	0,72	3,86	0,50	5,36
11	93,17	10,69	82,48	Combinada	82	10-30	0,11	0,06	0,54	4,53	0,34	8,39
12	93,65	18,9	74,75	Combinada	86	10-30	0,20	0,06	1,14	1,64	0,56	1,44
13	194,79	30,26	164,53	Combinada	81	30-90	0,16	0,03	0,90	1,84	0,60	2,04
14	194,76	41,94	152,82	Combinada	83	30-90	0,22	0,03	0,39	1,64	0,79	4,21
15	194,39	29,99	164,4	Combinada	82	30-90	0,15	0,03	0,33	1,00	0,27	3,03
16	194,6	43,45	151,15	Combinada	79	30-90	0,22	0,03	0,49	3,28	0,34	6,69
17	194,72	39,91	154,81	Combinada	79	30-90	0,20	0,02	0,42	0,67	0,32	1,60
18	194,29	43,23	151,06	Combinada	84	10-30	0,22	0,14	0,97	2,67	0,60	2,75
19	195	27,68	167,32	G8	85	10-30	0,14	0,12	0,86	2,93	0,52	3,41
20	194,84	23,02	171,82	G8	84	10-30	0,12	0,12	0,85	2,28	0,79	2,68
21	194,85	28,79	166,06	G8	86	10-30	0,15	0,10	0,96	3,37	0,35	3,51
22	194,79	25,29	169,5	Combinada	83	10-30	0,13	0,08	1,08	3,19	0,43	2,95
23	194,63	30,06	164,57	Combinada	84	10-30	0,15	0,08	1,26	2,82	0,41	2,24
24	194,8	24,69	170,11	G8	85	10-30	0,13	0,08	0,64	3,29	0,47	5,14

La **Figura 14**, muestra un comparativo entre las leyes de ingreso (línea en azul) y las leyes después del *sorting* (línea en naranja) denominado *up grade*.

Figura 14

Ley de cabeza y ley producto



Nota: Leyes de Cabeza vs Leyes de Producto obtenidas, en gramos por tonelada.

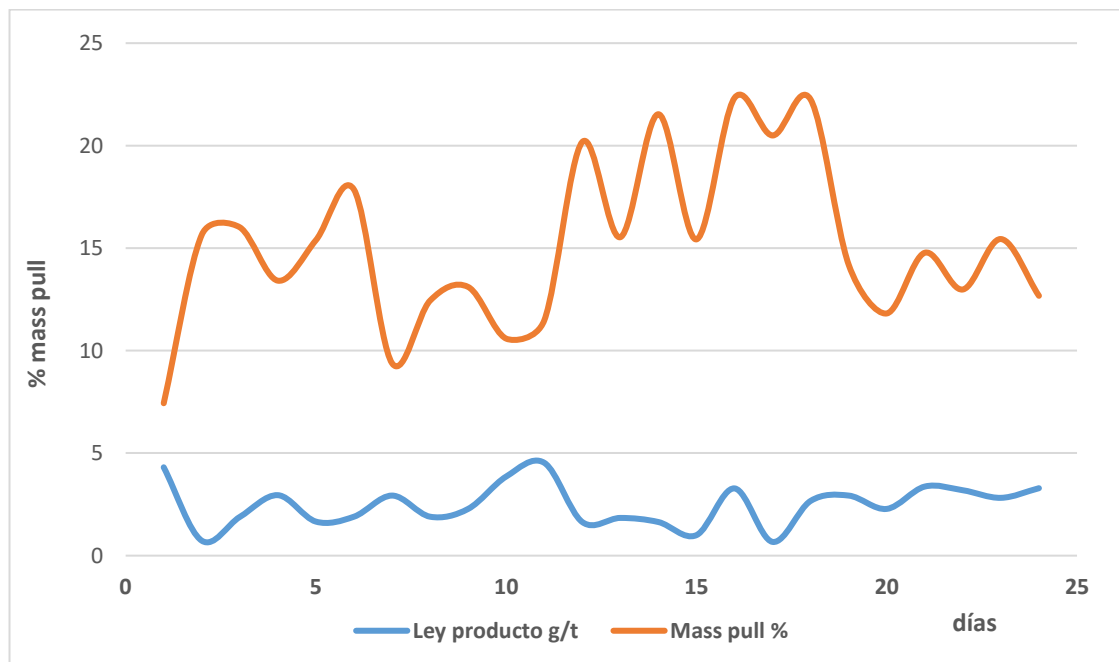
La recuperación de masa es expresada en porcentaje, se le denomina *mass pull*, esta variable es controlada directamente por la densidad mínima MD e indirectamente por factores que degradan la eficiencia de los sensores o de la selectividad, el *mass pull* es influenciado por el *coverage*, a mayor

coverage la selectividad en la lectura de los sensores disminuye, una muestra muy apegada a otra puede ser analizada como una sola y descartada al diluir sus resultados.

De acuerdo con los resultados, se evidencia que a mayor *mass pull* el *up grade* es menor, tal como puede apreciarse en la **Figura 15**.

Figura 15

Mass pull vs ley de producto

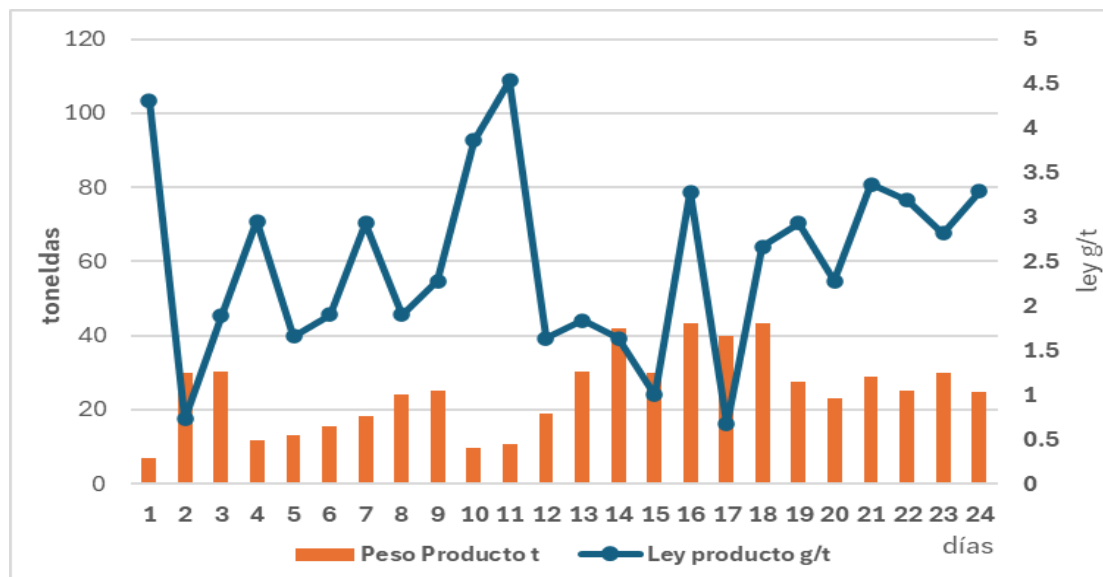


Nota: Maspull vs Ley de Producto, en gramos por tonelada.

Otra de las variables que influyeron en los resultados, es la cantidad del peso producto con relación a la ley obtenida denominado *up grade*, de acuerdo con la **Figura 16**, la mayoría de las leyes más altas se obtuvieron cuando la cantidad del producto fue menor en la planta ore sorter.

Figura 16

Tonelaje del producto vs ley del producto



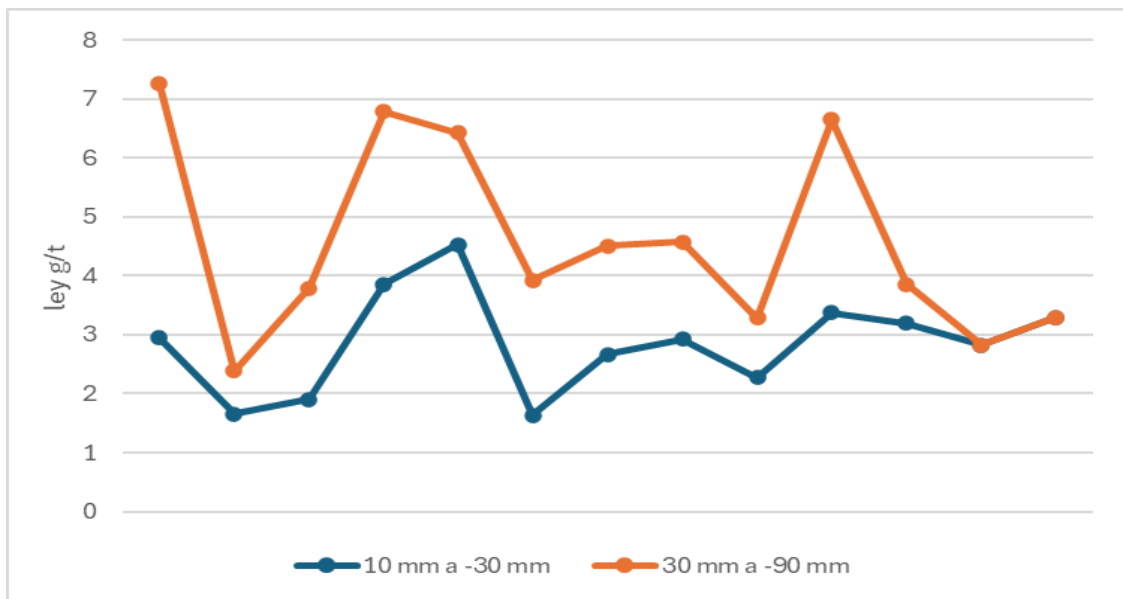
Nota: Tonelaje del producto vs Ley de Producto, en gramos por tonelada.

Otra variable a tener en cuenta y de gran repercusión, es la presencia de finos en la fracción sorteable, la granulometría sometida a prueba para este trabajo estuvo en los rangos +10 mm. y -30 mm. y +30 mm. y -90 mm. La claramente muestra que se obtienen mejores resultados cuando la

granulometría es mayor, en promedio se obtuvo mejor up grade con la granulometría más gruesa.

Figura 17

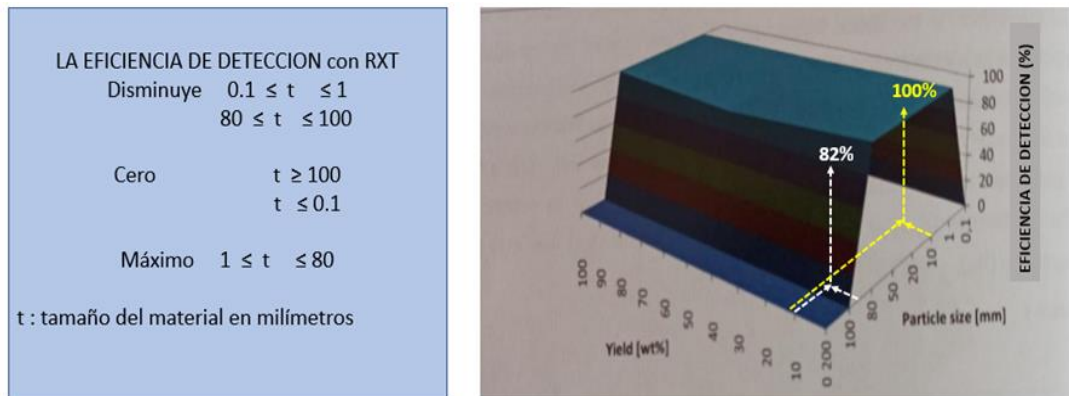
Up grade vs granulometría



Nota: Upgrade vs Granulometría de procesamiento, en milímetros.

Figura 18

Eficiencia de detección con RXT



Nota: Figura adaptada de “Characteristics of sensor – based sorting Technology and implementation in mining”, por Christopher Robben.

De acuerdo con la recomendación del fabricante la eficiencia de detección con RTX puede ser explicada con la **Figura 18**, donde la eficiencia de detección se encuentra en el rango entre 1 y 80 mm.

CONCLUSIONES

- Conclusión: Uno

La implementación de un sistema de preconcentración *ORE SORTING* permitirá que las plantas concentradoras que procesen mineral aurífero, presenten ventajas de rentabilidad al procesar minerales que por su contenido ínfimo de oro son económicamente inviables; así como ventajas de eficiencia al procesar menor cantidad de mineral.

- Conclusión: Dos

La aplicación de sensores RTX basados en la transmisión de rayos permite analizar partículas y separarlas según el contenido valioso contenidas separándolas del material inerte gracias a las diferencias del principio físico de densidad, una partícula con mayor contenido de oro será más densa.

- Conclusión: Tres

El sistema de preconcentración *ORE SORTING* de mineral aurífero por rayos X, no reemplazará a los métodos de procesamiento de minerales existentes y más utilizados en minería, pero sí es una tecnología que se puede agregar en el circuito de procesamiento del proceso sin alterar los circuitos existentes, también permite revalorizar botaderos con leyes

marginales gracias a que realiza su clasificación separando la ganga estéril del mineral enriquecido.

- **Conclusión: Cuatro**

El caso de estudio presentado, demuestra las ventajas frente a otros métodos convencionales como el pallaqueo y la inspección visual en la minería artesanal, y los resultados de su aplicación en mediana minería, según criterios geológicos principalmente en la alta eficiencia de clasificación y posterior concentración, es decir que hay un mejor criterio de selectividad, permitiendo que pueda procesarse mineral con un menor requerimiento energético generando al mismo tiempo un menor impacto ambiental. Finalmente, la gran versatilidad de los equipos de preconcentración permite ser aplicados para diferentes tipos de mineral aurífero, sea mineral fresco o marginal.

RECOMENDACIONES

- **Recomendación 1**

Controlar los finos de ingreso en el material sorteable, los finos (<10mm) influyen directamente en el coverage y el upgrade, alterando la distribución del material sobre la faja del sorter y disminuyendo la eficiencia de eyección y de separación con RTX.

- **Recomendación 2**

El éxito de la operación de una planta Ore Sorter se resumen en:

- Control de flujo de carga.
- No ingreso de finos al sorter
- Control de distribución de carga a lo ancho de la faja sorter.
- Controlar el coverage

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boletín Minero. (2020). Clasificación Selectiva Automatizada de Minerales (Ore Sorting). *Fundación Tecnológica*. https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2021/01/Articulo-FT-Boletin-Minero-1337_2020_03.pdf
- Escala, J., Deza, N., Bustamante, A., & Lopez, N. (2021). *Tecnología Ore Sorting: Etapas de implementación y lecciones aprendidas en Compañía Minera Antamina ¿Cómo la aplicación de una tecnología puede modificar la manera que actualmente se hace minería?* <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-079.pdf>
- Hochschild Mining PLC. (2023). *Clasificación de minerales en tiempo real mediante análisis de color y textura*. *Revista Minería*. <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/clasificacion-de-minerales-en-tiempo-real-mediante-analisis-de-color-y-textura>
- IIMP. (2018, February 15). *Experiencia del Ore Sorting en San Rafael (Sn) y estudios con minerales de cobre y polimetálicos*. Instituto de Ingenieros de Minas Del Perú. <https://iimp.org.pe/noticias/experiencia-del-ore-sorting-en-san-rafael-sn-y-estudios-con-minerales-de-cobre-y-polimetálicos>

METSO. (2024, April 8). *Ore Sorting: salto tecnológico para la clasificación eficiente de minerales.*

<https://www.metso.com/es/informacion/blog/mineria-y-refinacion-de-metales/ore-sorting-salto-tecnológico-para-la-clasificación-eficiente-de-minerales/#:~:text=La%20implementaci%C3%B3n%20de%20un%20sistema,beneficio%20econ%C3%B3mico%20para%20la%20operaci%C3%B3n.>

REDIMIN. (2023). *¿Cómo puede la clasificación de minerales basada en sensores convertir los desechos en riqueza?* Revista Digital Minera Chile.
<https://www.redimin.cl/como-puede-la-clasificacion-de-minerales-basada-en-sensores-convertir-los-desechos-en-riqueza/>

Rumbo Minero. (2022, October 7). *Antamina evaluará este año adquisición de tecnología Ore Sorting para flota de palas.*

<https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/antamina-ore-sorting-flota-de-palas/>

STEINERT. (2024). *STEINERT XSS® T EVO 5.0 para una clasificación rentable de sus rocas por densidad.* STEINERT.
<https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/sensor-sorting/x-ray-sorting-systems/steinert-xss-t-evo-50/>