

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?

Juan Escala Abril¹, Nestor Deza Grados², Antonio Bustamante Beltran³, Nehemias Lopez⁴

¹ Compañía Minera Antamina, Lima Perú, Juan Escala, jescala@antamina.com

² Compañía Minera Antamina, Lima Perú, Nestor Deza, ndeza@antamina.com

³ Compañía Minera Antamina, Lima Perú, Antonio Bustamante, abustamante@antamina.com

⁴ Compañía Minera Antamina, Lima Perú, Nehemias Lopez, nlopez@antamina.com

RESUMEN

Desde el inicio de la operación minera en Antamina y a lo largo de los años, se han desarrollado e implementado tecnologías que han ayudado a optimizar los procesos de producción. Uno de los principales retos que se tenía, y en el que actualmente se está trabajando con más de una iniciativa, es reducir la dilución (material estéril enviado a la planta), pérdida (material con contenido metálico enviado a los botaderos de desmonte) y mezcla (representado por bloques de mineral de Cu enviado como CuZn y viceversa) de mineral en el proceso de carguío y acarreo (ver Tabla 3-1: Porcentajes de Dilución, Perdida y Mezcla entre los años 2017 y 2020).

Utilizando la tecnología de XRF directamente instalada en los baldes de las palas de producción se espera reducir significativamente la dilución y pérdida de mineral, para lograr este objetivo se han realizado tres pruebas para determinar si la tecnología es aplicable tanto al yacimiento Antamina por tratarse de un *skarn* como al proceso productivo.

Reduciendo el mineral estéril (dilución) enviado a la Planta Concentradora, se reducirán costos de operación (energía, insumos, transporte, presa de relaves) y recuperando mineral enviado a los botaderos de desmonte (pérdida) incrementando el metálico producido se obtendrá el valor de esta iniciativa.

El objetivo principal de este informe es COMPARTIR la experiencia del proceso de implementación de la tecnología *Ore Sorting* instalada en las palas de producción de la Compañía Minera Antamina, describiendo etapas y procesos clave de la implementación. Así como, buenas prácticas y oportunidades de mejora detalladas para implementaciones similares en otras operaciones.

1. Introducción

1.1. ¿Qué es ore sorting?

La clasificación de material "*ore sorting*" son técnicas usadas en los yacimientos mineros para diferenciar el material estéril del material de alta ley enviado a los procesos de chancado, conminución y/o separación (Planta de Procesos), del mismo modo, evitar enviar a los botaderos de desmonte el material de alta ley; durante los últimos años se han desarrollado tecnologías que permiten optimizar la clasificación desde las fracciones gruesas del material para eliminar el estéril y de esta manera, contribuir a la elevación de la alimentación de leyes a las plantas concentradoras, reducir los costos de conminución y procesamiento, optimizar del uso de los depósitos de relave e incrementar la eficiencia económica de la operación en su conjunto. (A. Simon, 2017)

Las técnicas comúnmente utilizadas son aquellas que a partir de las propiedades físicas del mineral procesado realizan la separación por vía granulométrica, gravitacional o electromagnética. En los últimos años se están implementando, desde proyectos piloto y pruebas de tecnología, el uso de sensores que determinan la composición física de la roca. Estos sensores son implementados en diferentes puntos dentro del proceso productivo de la operación y pueden ser de tipos de Análisis de Activación de Neutrón- Gamma (PGNAA), Activación de neutrones Térmicos (PFTNA), Fluorescencia de Rayos-X de alta velocidad (HS-XRF) y Resonancia Magnética (RM). Todos estos métodos dentro del concepto de *Ore sorting* masivo, o *Bulk ore sorting* tratan de identificar la composición dentro del material grueso de la roca para poder ejecutar la separación de grandes volúmenes de material, en ocasiones la identificación se realiza en tiempo real y la desviación o separación se realiza en fajas de capacidades iguales o mayores a 8,000 tph y velocidades mayores a 6 m/s.

Dependiendo del tipo de yacimiento, es necesario la identificación de minerales específicos que ayuden al incremento de la ley de alimentación a la Planta de Procesos, adicionalmente, identificar otros elementos químicos como contaminantes que ayuden enviando información relevante para anticipar procesos de recuperación físico químicos.

En la Figura 1-1 se muestra a manera de ejemplo, los diferentes elementos químicos que son reconocidos por la tecnología HS-XRF de una fabricante en particular en condiciones determinadas. En colores en rojo los elementos leídos con una alta precisión, en color verde los elementos que son visibles dependiendo de su nivel de concentración y en color morado elementos en evaluación.

25 Mn 54.94 7.44 Kα: 5.900 Lα: 0.637	26 Fe 55.85 7.87 Kα: 6.405 Lα: 0.705	27 Co 58.93 8.86 Kα: 6.931 Lα: 0.775	28 Ni 58.69 8.91 Kα: 7.480 Lα: 0.849	29 Cu 63.55 8.93 Kα: 8.046 Lα: 0.928	30 Zn 65.38 7.73 Kα: 8.637 Lα: 1.012	33 As 74.92 5.76 Kα: 10.543 Lα: 1.282	34 Se 78.96 4.81 Kα: 11.224 Lα: 1.379
48 Cd 112.41 8.69 Kα: 23.173 Lα: 3.133	49 In 114.82 7.31 Kα: 24.210 Lα: 3.289	50 Sn 118.71 7.29 Kα: 25.271 Lα: 3.444	51 Sb 121.76 6.69 Kα: 26.359 Lα: 3.604	52 Te 127.60 6.23 Kα: 27.473 Lα: 3.768	80 Hg 200.59 11.85 Kα: 20.431 Lα: 2.195	81 Tl 204.37 11.86 Kα: 20.431 Lα: 2.271	82 Pb 207.20 11.34 Kα: 20.431 Lα: 2.342
37 Rb 85.47 1.53 Kα: 13.396 Lα: 1.692	38 Sr 87.62 2.64 Kα: 14.165 Lα: 1.806	39 Y 88.91 4.47 Kα: 14.958 Lα: 1.924	40 Zr 91.22 6.51 Kα: 15.775 Lα: 2.044	41 Nb 92.91 8.57 Kα: 16.615 Lα: 2.169	42 Mo 95.94 10.22 Kα: 17.480 Lα: 2.292	92 U 238.03 18.96 Kα: 13.614 Lα: 3.171	

Figura 1-1 : Elementos leídos en la Prueba de Ensayos

La Figura 1-2 muestra las diferentes fuentes donde se puede aplicar el escaneo del material para realizar la desviación. La primera fuente de reconocimiento es en la misma Fase de minado; en esta sección se discrimina si el camión cargado contiene mineral o desmonte con mayor precisión. La segunda fuente sería dentro de los stockpiles; existen experiencias donde están ubicando una pala con estos sensores para el reconocimiento de material en los stockpiles. El Tercer punto de desvío sería en las fajas de alimentación a la planta, luego de que el material se encuentra chancado, aquí se pueden ubicar mecanismos con correas o fajas transportadoras que desvíen el material estéril hacia los botaderos de desmonte.

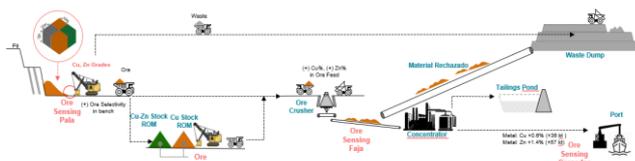


Figura 1-2 : Fuentes de captura de material para realizar el Ore Sorting

1.2. Tecnología para realizar el Ore Sorting¹

Dentro de los tipos de tecnología que existen en la actualidad, se pueden mencionar:

1.2.1 Análisis de Activación de Neutrón- Gamma (PGNAA)

La tecnología PGNAA se basa en una reacción subatómica entre un neutrón de baja energía suministrado por un radioisótopo y el núcleo de un átomo. El radioisótopo utilizado en esta aplicación es el californio 252. La energía del átomo excitado generado durante esta reacción se libera en forma de un rayo gamma distinto específico del átomo. Los rayos gamma emitidos se convierten en fotones mediante un detector cristalino especializado. Un tubo fotomultiplicador acoplado al detector convierte los fotones en señales eléctricas proporcionales en energía al fotón. Luego, los circuitos electrónicos de alta velocidad amplifican y convierten las señales eléctricas en un espectro de energía compuesto. El espectro de energía se puede analizar para determinar la composición elemental.

1.2.2. Activación de neutrones Térmicos (PFTNA)

La tecnología PFTNA es similar a la tecnología PGNAA excepto que el neutrón de baja energía es suministrado por un generador de neutrones. El generador cuenta con un pequeño acelerador lineal que facilita las reacciones de fusión con isótopos de hidrógeno, deuterio (2H) y tritio (3H) para producir los neutrones. En lugar de funcionar continuamente como el isótopo natural utilizado en PGNAA, el pequeño acelerador lineal se apaga continuamente y luego se enciende rápidamente, creando períodos en los que no se producen neutrones.

1.2.3. Fluorescencia de Rayos-X de alta velocidad (HS-XRF)

Este tipo de tecnología solo es capaz de detectar los valores de la capa superior, ya sea que se instale en una pala o en faja. La tecnología de sensor de mineral HS-XRF se basa en bombardear el mineral con energía de rayos X. La composición de los minerales se puede determinar mediante rayos X característicos o "fluorescencia" generada cuando los átomos se irradian con niveles bajos de energía de rayos X. Cuando la energía de rayos X golpea el mineral, los rayos X son absorbidos por el átomo. Cuando esto sucede, los

¹ Fuente : Ausenco, 2020. Campana Minera Antamina SA Equipment Selection, Bulk Sorting Technology

electrones son expulsados de las capas internas, creando vacantes. Estas vacantes presentan una condición inestable para el átomo, y el átomo regresa a su condición estable transfiriendo electrones de las capas externas a las internas, y en el proceso emitiendo un rayo X característico cuya energía es la diferencia entre los dos enlaces. Los rayos X emitidos por este proceso se denominan "fluorescencia de rayos X" o XRF. Los rayos X emitidos son clasificados por un espectrómetro diseñado para reconocer la fluorescencia en la región deseada de la tabla periódica. La tecnología es eficaz en la detección de transición y metales preciosos. En el enfoque MineSense, las emisiones de rayos X se muestrean varias veces por segundo y los espectros característicos se procesan a través de algoritmos patentados de procesamiento de señales digitales de alta velocidad, reconocimiento de patrones e identificación.

1.2.4. Resonancia Magnética (RM)

La tecnología RM se basa en el concepto de que un mineral en particular puede ser objetivo aplicando pulsos de señales de radiofrecuencia (RF) al mineral. La señal de RF se alinea con la resonancia del mineral de interés. Posteriormente, se detecta una señal de radiofrecuencia rápida en los sensores en forma de eco. Este proceso de medición normalmente se completa en menos de un milisegundo.

A continuación, la Tabla 1-1 menciona algunos criterios que fueron utilizados para la selección de la mejor tecnología que se pueda instalar en Fajas que sirva para el yacimiento Antamina:

Tabla 1-1 : Criterios para una buena selección de tecnología

#	Peso	Criterio
1	Alto	Capacidad para medir Cu y Zn
2	Alto	Capacidad para medir secciones transversales completas Solo superficial expuesta vs. A través de las partículas Parcialmente al centro de la faja o el material a lo ancho de la faja
3	Alto	Velocidad (para lograr la exactitud y precisión requeridas)
4	Alto	Exactitud y precisión
5	Muy Alto	Ley Mínima de Cu / Zn medido
6	Alto	Disponibilidad - calibración, mantenimiento, reemplazo de la fuente, etc.
7	Medio	Facilidad de operación
8	Medio	Seguridad Industrial: Posibilidad de exposición a radiación

#	Peso	Criterio
9	Medio	Tecnología probada en aplicaciones mineras, tecnología que se encuentre operando y demostrada.
10	Medio	Capacidad de la tecnología de ser escalable: Escalabilidad a capacidades mayores Tamaño, velocidad y <i>throughput</i> Capacidad de ser instalada en una faja de mayor velocidad en Antamina
11	Alto	Soporte Local
12	Alto	Facilidad en la instalación: La tecnología debe evitar cualquier modificación a la faja actual Los trabajos previos y los <i>tie-ins</i> pueden ser completados de manera anticipada Peso para ser soportado por grúa La instalación debe ser planificada para una detención de 2 o 3 días
13	Medio	El análisis de muestras es requerido para confirmar la idoneidad de la tecnología
14	Bajo	Experiencia dentro del país y soporte local
15	Medio	Experiencia con minerales de Cobre y Zinc
16	Medio	Experiencia con fajas de alta capacidad
17	Bajo	Huella

La Tabla 1-2 muestra como la tecnología se ajusta a los criterios claves para la selección de la misma.

Tabla 1-2 : Tipos de Tecnología versus los criterios de selección Ausenco (2020)

Tipo de Tecnología	MR	HS-XRF	PGNAA	PFTNA
Capacidad para medir ley de Cu y Zn directamente	✗	✓	✓	✓
Capacidad para medir secciones transversales completas	✓	✗	✓	✓
Capacidad para leer leyes de Cobre de 0.2%	✗	✓	✓	✗
Soporte técnico local	✗	✓	✓	✓

¿Por qué aplicar ore sorting?

De acuerdo con la fuente (Simon, 2017) se definen algunas ventajas de la aplicación del Ore sorting:

1. Mejor aprovechamiento para procesar mineral en la planta: Con esto se logra una mejor utilización de la capacidad instalada al reducir el envío de estéril a la planta. Adicionalmente, se pueden detectar bloques que anteriormente eran desperdiciados.
2. Mejor control de Leyes: Se puede realizar un mejor blending desde el punto de origen de alimentación.
3. Reducir el uso de energía para la conminución: Normalmente la ganga es más dura que el mineral, al enviar menos cantidad a los molinos para su conminución se pueden generar ahorros en los insumos como bolas, electricidad, entre otros.
4. Reducir la huella ambiental: Al ser más selectivos en el material procesado, el recrecimiento de la presa de relaves podría postergarse.
5. Reducir costos: Ahorro en costos de transporte en correas al ser menos material el enviado.

La Figura 1-3 lado izquierdo, muestra una resolución de los polígonos del modelo dinámico de 10m x 10m x 15m, con esta información el equipo de Ore Control hace el diseño de polígonos.

Utilizando la tecnología de Ore Sorting instalada en la Pala, se tiene un mayor nivel de resolución con información de las leyes de Cobre analizadas por el sistema ShovelSense, en ésta se muestran entre 15 y 20 camiones que contienen ley de Cu entre 0.3 y 3% que debido a su geolocalización fueron asignados a polígonos de desmontes, y luego reasignados y capturado el valor en metal.

Usando la información geoespacial proporcionada por el sistema implementado, se obtiene una mayor resolución de la clasificación de mineral.

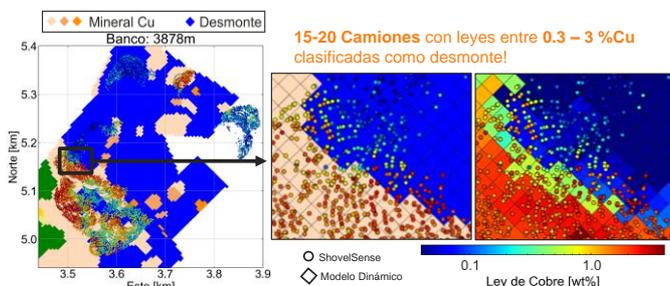


Figura 1-3: Nivel de resolución entre los polígonos y los baldes

En la Figura 1-4 se muestran pequeños puntos de material (puntos dispersos de distintos colores) cuya ley de Cu se ha identificado con el sistema y han sido analizados y asignados a escala de camión, utilizando

también información de leyes de los pozos de perforación para la voladura (triángulos). En esta gráfica se pueden diferenciar camiones (puntos) con leyes distintas de los polígonos donde se encuentra, esto debido a varios factores como la dilución, el desplazamiento por voladura, entre otros. Esta nueva asignación de leyes por camión ayuda a identificar potenciales beneficios con el redireccionamiento al destino adecuado que, sin el uso de esta tecnología, se hubieran asignado solo con la información de su geolocalización.

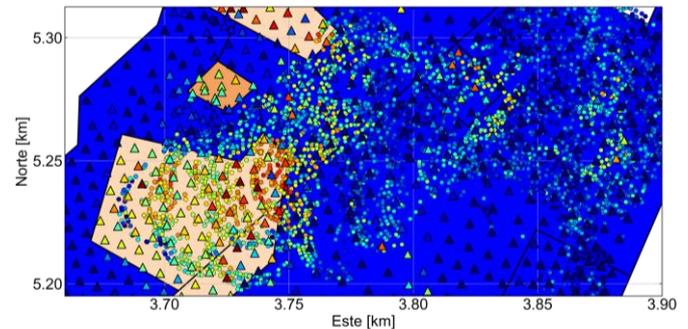


Figura 1-4 : Bloques que se pueden recuperar

2. Implementación de ore sorting en palas en Antamina

Proceso de implementación y etapas del proyecto

La Figura 2-11 muestra las tres etapas de ejecución que fueron necesarias para realizar con una implementación confiable.



Figura 2-1 : Prueba de compatibilidad (izquierda), prueba piloto (centro) y prueba trial (derecha)

2.1.1. Primera Etapa: Prueba de Compatibilidad

Se enviaron un total de 12 muestras a las instalaciones de MineSense en Vancouver, Canadá, cada una con un peso aproximado de 250 kg de distintos tipos de material (mineral y estéril), las cuales fueron analizadas en el laboratorio usando un sistema a escala del ShovelSense y BeltSense denominado el Amenability Testing Machine (ATM). Se recibió el reporte con los resultados de las pruebas realizadas por MineSense donde se evaluaba la compatibilidad del material de Antamina para la clasificación a escala de balde, y específicamente caracterizar las respuestas de Cu y Zn en múltiples tipos de minerales y

concentraciones. El reporte concluía en una correlación positiva entre las concentraciones de Cu y Zn con las respuestas de los sensores XRF. De igual manera, se recomendó desarrollar una prueba piloto y priorizar los casos de uso específico en la mina, incluyendo rangos de leyes y tipos de mineral para la toma de decisión relacionada con la clasificación de mineral en tiempo real en el frente de minado.

2.1.2. Segunda Etapa: Prueba Piloto en Cargador Frontal

Entre el 13 y 17 de noviembre del 2020, se desarrolló el programa piloto para el cual se instaló el sistema ShovelSense en un cargador frontal Volvo L150H, para validar su capacidad para estimar leyes de cobre (Cu) y zinc (Zn) con un error relativo por debajo del 30%, con 90% de confianza y con un sesgo de calificación promedio por debajo del 10%. Además, se probó la capacidad del sistema para diferenciar entre minerales de Cu solo y CuZn. Por lo mismo, se desviaron 10 pilas de la operación Run of Mine (ROM) de Antamina y se analizaron 6 muestras por cada pila para finalmente obtener 20 lecturas por muestra. A partir de los resultados obtenidos se concluyó que Cu y Zn se pueden predecir con un error relativo de $18,4 \pm 7,2\%$ y $11,6 \pm 5,6 \%$, respectivamente, cuando se excluyen muestras de grado muy bajo (< 0.15). Además, la diferencia relativa para duplicados de ensayo de las mismas pilas de muestras seleccionadas es de alrededor del 10 % y el sesgo relativo medio para Cu y Zn es de $-1,3 \%$ y $-4,4 \%$, respectivamente. Dado que se cumplieron los objetivos del programa piloto, Antamina continuó con la prueba trial para monitorear el rendimiento del modelo ShovelSense, ésta deberá comparar sus resultados con los datos de ley de la mina disponibles en varias escalas espaciales.

2.1.3. Tercera Etapa: Prueba de Ensayos en Pala de Producción P&H

El objetivo principal de la prueba trial ShovelSense Industrial Test (SSIT) fue evaluar la precisión y exactitud de los sensores XRF montados en una pala de producción en condiciones reales, para determinar en qué medida se cumplían los requisitos de éxito preestablecidos. La precisión se evaluó utilizando varios tipos de duplicados, desde el muestreo con pala hasta los niveles de ensayo, mientras que la exactitud se evaluó utilizando materiales de referencia estándar en la etapa analítica.

Nueve veces por semana, una carga de pala se descarga en un camión y se transporta a una plataforma ubicada junto a una chancadora secundaria. Después, la carga se tritura y se coloca en pequeñas

pilas cónicas. Cada subpila se aplana a unos 60 cm de altura en promedio y se toma una muestra que consta de cinco incrementos de aproximadamente 20 kg. De cada una de estas, se recolecta un duplicado de campo rotando de 60° a 90° el patrón de muestreo. Posteriormente, las muestras recolectadas se trituran y luego se reducen para obtener una submuestra final que se envía para su preparación y ensayo al laboratorio de la mina en el cual se sigue el mismo procedimiento que en el proceso de control de minerales.

A continuación, se muestran los 7 pasos a realizar para lograr un buen análisis de los materiales.

1. Paso 1: Una carga a un camión aprox. 100 t (Figura 2-2).



Figura 2-2 : Pala cargando camión

2. Paso 2a: De cada Pila ROM 3 subpruebas (Figura 2-3).

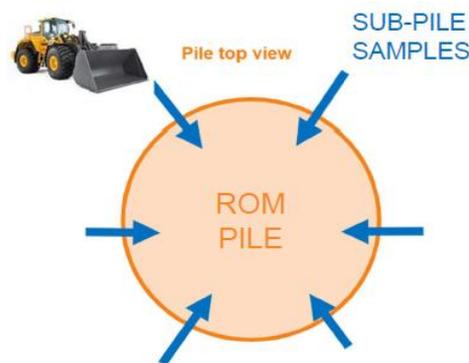


Figura 2-3 : Pila ROM

3. Paso 2b: De cada Pila ROM 3 subpruebas (Figura 2-4).

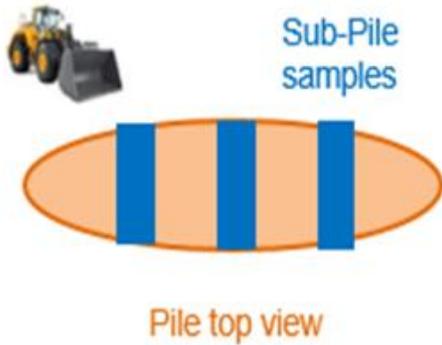


Figura 2-4 : Pila ROM

4. Paso 3: Cada subprueba será chancada para tener un P80% < 1" (Figura 2-5).

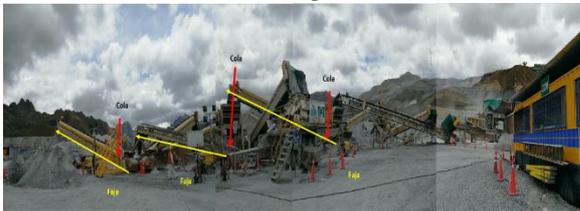


Figura 2-5 : Chancado de subprueba

5. Paso 4: La pila será aplanada hasta 40 cm de alto y por cada pila se toman 10 muestras de 20 Kg cada una (Figura 2-6).



Figura 2-6 : Pilas aplanadas

6. Paso 5: La muestra de 200 Kg. Será colectada de cada sub-pila (ver Figura 2-7).



Figura 2-7 : Recolección de muestra

7. Paso 6: La preparación de la muestra y proceso de ensayo seguirá el mismo procedimiento del proceso de Ore-Control (Figura 2-8).



Figura 2-8 : Ensayo de la muestra

Recomendaciones para una implementación óptima

A continuación, se menciona un listado de lecciones aprendidas que pueden servir para el personal de otras implementaciones mineras para optimizar sus tiempos de implementación.

2.2.1. Definición de los Indicadores de éxito del proyecto

Los KPIs de éxito definidos en una etapa de piloto, deben de ser simples de poder ser calculados, pero a la vez se deben de especificar todas las fórmulas necesarias para que cualquier miembro del equipo las pueda desarrollar. En tal sentido, el equipo de proyecto trabajó varios meses en la definición de indicadores para el éxito de la etapa. En el siguiente ejemplo se muestra a detalle uno de los más importantes: "Se requiere que el resultado de cada equipo principal logre una precisión de un máximo de +/- 30% de error relativo en la predicción de los grados del material, con un 90% de confianza; adicionalmente el sesgo en la determinación de los grados no debe de exceder el +/- 10%".

Este KPI que se encontraba muy bien definido y con hojas de detalle explicando las fórmulas de cálculo para alinear el concepto de precisión, sesgo y porcentaje de confianza; NO incluyó el detalle de los datos a comparar. No se especificaba claramente si la comparación se realizaría entre los datos del sistema y el promedio de los pozos de voladura, o si se era necesario realizar una agregación a nivel de balde, a nivel de camión, a nivel de turno. Esto dio origen a establecer con mayor detalle los indicadores de éxito; y retrasó la etapa de prueba del sistema.

2.2.2. Modo de Calibración de los sensores

Existen diferentes maneras de calibrar los equipos. Una de ellas es realizar la carga del material y posterior análisis de la información censada por el sistema para luego llevar esa muestra a ser triturada para tener un tamaño estándar y a esta muestra realizar el cuarteo y logueo necesario para obtener una muestra para ser analizada en laboratorio y de esta manera realizar el proceso de calibración. Otra de las formas es tener una muestra estándar donde previamente se conozca las leyes del material y cargarla dentro del balde de la pala para confirmar lo que se está censando.

2.2.3. Alcance del sensor

Los sensores de rayos-X instalados en las palas; tienen un alcance determinado dependiendo del diseño y ángulo de su instalación. Las lecturas se efectúan de una proporción determinada del material que está siendo cargado en el balde de la pala. Durante los pocos segundos que toma esta acción se realizan varias lecturas por cada uno de los 3 sensores instalados. Con esta muestra se estima el total de la carga del balde. Todavía no existe una tecnología en equipos móviles que atraviese el material para conocer la composición química de la roca. La tecnología de Rayos Gamma que se encuentra instalado en las fajas si realiza esta lectura atravesando todo el material a ser censado. Figura 2-9 muestra los diferentes momentos de colección de datos de los sensores.

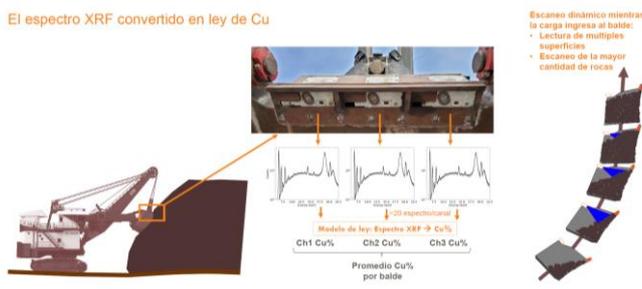


Figura 2-9 : Eventos de colección de datos por cada ciclo de llenado (10 lecturas por segundo).²

2.2.4. Disponibilidad Mecánica y confiabilidad del sistema

Esta tecnología al ser relativamente nueva, tiene un tiempo de vida determinado. Los sensores de rayos-x deben de ser cambiados luego de un determinado número de horas entre las 600 y 1000 horas de uso. El reto para lograr el beneficio del proyecto esperado es hacer coincidir los mantenimientos periódicos de la pala con los cambios de los sensores y componentes

auxiliares para no incrementar los tiempos de detención.

2.2.5. Soporte de un equipo de Analítica de datos que se encuentre actualizando y perfeccionando el modelo

Un tema clave que contribuye con la implementación de estas tecnologías disruptivas es contar con el soporte local o remoto de personal especializado en análisis de datos y conocimiento geológico para ir ajustando el modelo de predicción y lograr una mejor calibración de los sistemas. Existen centros que se especializan en esto, los fabricantes proporcionan este servicio a las instalaciones mineras que cuentan con estos sistemas.

2.2.6. Soporte 24x7

Soporte permanente de un equipo en campo para lograr una alta disponibilidad del sistema y también de un equipo remoto para la visualización de data en un portal con información en nube y en línea.

2.2.7. Iteración constante con el equipo de Geología y modos de Operación

Hablar en un lenguaje común del usuario final en este caso de los equipos de Ore Control, conocer las particularidades del yacimiento, conocer las técnicas del operador de Pala. Todo esto ayuda a logro de una implementación adecuada. Durante la implementación en Antamina se trabajó con operadores de pala cuya experiencia no es menor a los 10 o 20 años de servicio. Conocen de manera intuitiva los cambios de mineral a desmonte y viceversa. Los Geólogos realizan una marcación de los polígonos con banderines y de acuerdo con el desplazamiento post voladura hacen las modificaciones y correcciones adecuadas. Pero en determinados momentos bajo determinadas condiciones es necesario cambiar la subjetividad por datos cuantitativos para lograr la recuperación de determinados baldes con cierta ley que alimentará a la planta.

2.2.8. Manejo de Cambio

Al impactar una parte del proceso productivo de la compañía, fue necesario gestionar la aprobación de los documentos de cambio de proceso. Se establecieron nuevos protocolos para ser ejecutados.

2.2.9. Entrenamiento

Se programaron entrenamientos a los operadores de Pala de todas las guardias, adicionalmente al tratarse de tecnología con una fuente de radiación, se realizó el entrenamiento a las guardias de mantenimiento que realizan inspecciones dentro del balse. Al equipo de

² Fuente: Elaboración del Equipo del Fabricante MineSense. (Toledo et al., 2021)

geología se entrenó en el uso del portal y la utilización de los datos exportados.

2.2.10. Licencias y permisos

Debido a tratarse de una fuente de Rayos-X fue necesario contar con la aprobación por parte del ente competente en el uso de esta fuente de radioactividad. Para este caso es el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), todos los cabezales y demás componentes deben de contar con un número de serie para ser internado a nuestro país y obtener la licencia correspondiente. Las licencias y permisos las tramita el departamento de Legal de la compañía. Es necesario hacerlo con la planificación necesaria puesto que este trámite tiene una duración media entre 1 a 3 meses.

2.2.11. Logística de internamiento y reemplazo

Una vez que se cuente con los permisos de importación de las fuentes y demás componentes, es necesario gestionar la importación de un grupo de cabezales, tener otro en tránsito y adicionalmente tramitar el retorno de los ya utilizados. Todos estos con su número de serie específico y gestionando los tiempos de entrega en almacenes off-shore, internamiento en aduanas, tránsito a la mina e instalación y viceversa.

2.2.12. Safety

Un tema importante que se difundió con los representantes del comité que representa a los trabajadores de la compañía fue la difusión del uso de esta tecnología, de los controles existentes para los principales riesgos identificados entre otros. Todo esto dentro de un plan de comunicación totalmente transparente y simple de explicar.

2.2.13. Tener claro siempre el Valor generado por el proyecto

Un tema recurrente luego de tener categorizado e identificado a los principales stakeholders del proyecto; como gerente de implementación del proyecto siempre es necesario tener claro el objetivo del mismo. En este caso si la tecnología permitía discriminar entre material de desmonte y mineral y al momento de ser cargado se puede identificar la ley promedio de un camión; el siguiente paso sería de reasignarlo una vez que la aplicación de Despacho tenía un destino diferente por tratarse de un material catalogado opuesto a la medición que se realiza en línea. Fue de esta manera que en una etapa de prueba de alrededor de 1.5 meses se pudo identificar para luego desviar un total de 350 camiones cargados por completo. El beneficio del proyecto se calcula por los camiones desviados. En el

capítulo siguiente se explica la forma de calcular el beneficio de este proyecto.

2.2.14. Como fue el manejo de leyes diferentes al plan Otra de las lecciones aprendidas del proyecto ocurrió cuando se identificó un material catalogado en el plan como desmonte pero se trataba de mineral con una ley menor o de otro tipo a la campaña que se estaba ejecutando. En ese momento se desviaron esos camiones identificados a los stockpiles para luego ser aprovechados en campañas posteriores. Fueron identificados un total de 300 camiones durante la prueba de 45 días; estos entregaron el valor una vez sea enviados para ser procesados en la planta.

3. Metodología Conceptual para la estimación del beneficio

Un punto clave es la definición de la unidad de selectividad de minado (SMU) y la obtención de parámetros para la evaluación del potencial beneficio económico, el modelo de Reservas se compone de bloques de 20 metros de largo x 20 metros de profundidad por 15 metros de altura. Cuando se realiza la estimación de minerales se utiliza luego el modelo de Recursos que está basado en bloques de 10 metros de largo x 10 metros de profundidad por 15 metros de altura. La Figura 3-1: Comparativo entre los modelos de reservas y el modelo de recursos. muestra un comparativo entre los bloques del modelo de Reservas y el modelo de Recursos utilizado.

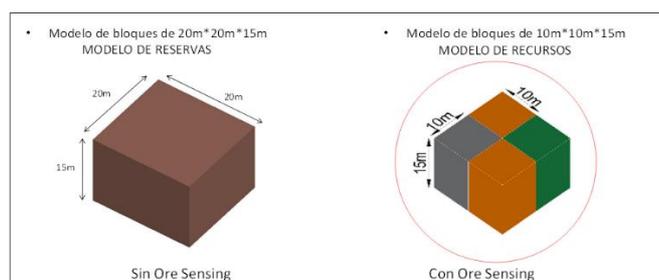


Figura 3-1: Comparativo entre los modelos de reservas y el modelo de recursos.³

Es en este modelo de largo plazo donde se realiza la estimación de las fuentes de valor para el proyecto Ore Sensing que básicamente son de tres tipos:

1. **Dilución:** Fuente de valor representado por bloques de Desmonte que ingresan a la planta. Mejor selectividad del desmonte dentro de zonas

³ Fuente: Elaboración del Equipo de Planeamiento Largo Plazo (Lopez N., 2021)

de mineral, reduciendo el envío de desmonte a la planta, incrementando la ley de cabeza alimentada a la planta y la recuperación metálica, así como un mejor aprovechamiento de las presas de relaves, los consumibles en planta y la energía

2. **Pérdida:** Mayor recuperación de bloques de mineral en zonas de desmonte, con una mejor identificación de mineral por los desplazamientos de la voladura, lo que permite un incremento de la recuperación minera en los cuerpos pequeños de mineral y metales producidos, además una disminución de metales en los botaderos de desmonte.
3. **Mezcla:** Fuente de valor representado por bloques de mineral de Cu enviado como CuZn y viceversa. Reducción de mezclas entre diferentes tipos de minerales, y disminución de los contaminantes en los concentrados.

La Figura 3-2 muestra en colores y también con numeración estas fuentes de valor. Los bloques en celeste representan la Dilución (3,6); los bloques en color rojo representan la Pérdida (7,8); y los bloques verdes representan la Mezcla (2,4) entre minerales de Cu por CuZn y viceversa. En este gráfico los recuadros en amarillo son bloques bien catalogados (1,5 y 9).

		Modelo 10*10*15		
		Cu	CuZn	Waste
Modelo 20*20*15	Cu	1	2	3
	CuZn	4	5	6
	Waste	7	8	9

Figura 3-2: Identificación de Fuentes de valor para el Ore sensing⁴

En la Figura 3-3 se muestra como a partir de la determinación de bloques dado por el Block Valuation se determinan los bloques de acuerdo a su composición (MTYMS). Estos pueden ser modificados al momento de realizar el diseño de polígonos teniendo en cuenta restricciones operativas (tamaño mínimo, estructuras, etc.) de esta manera se cuenta con un diseño de polígonos final llamado MTYFS. Es con esta estructura de polígonos final donde puede ocurrir las diferencias de pequeñas estructuras que darán origen a

los bloques de dilución, mezcla y pérdida que ya fueron descritos anteriormente.



Figura 3-3 : Diferencia gráfica en el diseño de polígonos entre el Modelo Inicial y Final⁵

La Tabla 3-1 muestra el promedio por año de las diferencias entre los modelos inicial y final por los tres conceptos donde se podría agregar valor con el uso de esta tecnología. A partir del promedio de los cuatro últimos años, es que se define la línea base de 5.28% para que a partir de este dato se comience a reducir esta variabilidad para los siguientes años; realizando la implementación de la tecnología a razón de una pala a la vez hasta llegar a un nivel de dilución de 1.06%.

DILUCION, PERDIDA & MEZCLA PLANIFICADA

	Modelo Dinamico			
	2017	2018	2019	2020
	%	%	%	%
DILUCION	6.3	4.6	4.4	6.0
PERDIDA	1.0	2.6	1.8	1.4
MEZCLA	4.6	6.0	4.8	5.4

Tabla 3-1 : Porcentajes de Dilución, Pérdida y Mezcla entre los años 2017 y 2020

A continuación, se mencionan los supuestos que fueron claves para la generación de valor de la prueba piloto y validación del proyecto:

1. Se consideró una línea base de dilución entre los años 2017 al 2020 de 5.28%
2. Se asumió una efectividad de 80% por dilución operativa.
3. Se asumió que el mineral que reemplace al desmonte tendría una ley baja de 0.172%
4. Se consideró las mismas premisas de recuperación como resultado de planta.
5. Se asumió un ramp-up para la instalación de 4 palas con un impacto equivalente.

Con estos supuestos se elaboró un caso de negocio que dio como beneficio espero un impacto de \$17 millones al término de la implementación.

⁴ Fuente : Elaboración del Equipo de Planeamiento Largo Plazo (Lopez N., 2021)

⁵ Fuente: Elaboración del Equipo de la Superintendencia de Geología – Ore Control (Pacheco M., 2021)

4. Conclusiones y Recomendaciones

Con el avance de la tecnología se están descubriendo nuevas formas de realizar el redireccionamiento de material u *Ore sorting* a escala masiva *bulk ore sorting* y desde las fracciones gruesas del material. Cada vez son los elementos químicos reconocidos por los diferentes instrumentos o sensores que se crean. La tecnología ofrece la posibilidad de medir composición química en el cucharón de la pala y la posibilidad de desviar los camiones a un destino más adecuado.

Las tecnologías son variadas como la PGNA, PFTNA, X-RAY y RM. Es necesario realizar una evaluación de cuál es la mejor tecnología para el tipo de yacimiento y adicionalmente en que etapa del proceso productivo será instalado y permitirá el desvío de materiales.

Dentro de las ventajas de esta tecnología se encuentran: Mayor aprovechamiento para procesar el mineral mejora el control de leyes, reducción de la energía para la conminución, reducción de la huella ambiental y reducción de costos. Sin embargo, falta resolver la mejor estrategia para incorporar a la producción los camiones con menor ley de la especificada por la concentradora pero con valor económico.

En Antamina se realizó la implementación de esta tecnología en tres etapas; si bien la firma de un contrato con un fabricante especialista inició el año 2019, en el año 2020 se realizó el envío de muestras para una prueba de compatibilidad. Luego en el año 2020 antes del inicio de la Pandemia se pudo realizar una visita en campo para luego hacia fines del año poder realizar la prueba en el cargador frontal a la que se denominó prueba piloto. Ya en el año 2021 se instaló en una pala P&H de producción y a esta se le denominó prueba Trial. El pasar por todas estas etapas fue importante para poder tener un caso de negocio sólido y adecuar la tecnología al yacimiento polimetálico con el que cuenta Antamina.

Se identificaron más de veinte recomendaciones o buenas prácticas para una adecuada implementación. Estas son en si experiencias que han pasado el equipo del proyecto y que pueden ser de utilidad para que futuras implementaciones en otros yacimientos de la región puedan optimizar su proceso de implementación. Entre las más importantes figuran: Definición de indicadores de éxito del proyecto, buenas prácticas en la calibración de los sensores, entendimiento de la tecnología y sus restricciones, soporte de un equipo tanto por el lado del fabricante como por el lado del owner team conocedor de la parte geológica y de la tecnología a implementar que brinde un buen soporte, planes de manejo de cambio, planes

de entrenamiento, seguimiento a la parte logística, regulaciones, safety entre otros.

Desde la generación del cálculo para lograr el caso de negocio hasta el último instante de la implementación se debe de estar claro en el objetivo buscado. Se definieron hasta tres objetivos de búsqueda de valor pasando desde la dilución, perdida y mezcla y luego conforme se da la implementación operativa se van ajustando los resultados, pero el equipo siempre está enfocado en lograr la captura de valor que viene a darse por el desvío de camiones y captura de mejor materia con mayor ley para poder producir más.

Finalmente, se ha identificado la necesidad de continuar mejorando la confiabilidad del sistema para asegurar que el porcentaje de camiones medidos válidamente supere como mínimo el 70% del total. Objetivo que se va a lograr conforme madure la aplicación de esta tecnología.

Referencias

- Simón, A. 2017. La implementación del *Ore Sorting* en las Operaciones Mineras., p. 1-14.
- Pacheco, M. 2021. Reporte final de Misclasificación programada en el modelo dinámico. Elaboración propia, p. 1-2.
- Toledo, R., Cabeza, J. 2021. Presentación de Minesense Technologies. Hub de Innovación Minera del Perú, p. 10-13.
- Lopez, N. 2021. Presentación de Estimación de Valor *Ore Sensing* por parte del equipo de Planeamiento Largo Plazo., p. 2-3.
- Ausenco. 2020. Compañía Minera Antamina SA Equipment Selection, Bulk Sorting Technology. Nombre de la Revista, p. 8-9.
- Pacheco, M. Mayo 2021. ShovelSense Industrial Test Sampling Procedure. Elaboración propia, p. 1-5.

5. Contenido

RESUMEN	1
1. Introducción	1
1.1. ¿Qué es ore sorting?	1
1.2. Tecnología para realizar el Ore Sorting.....	2
1.2.1 Análisis de Activación de Neutrón- Gamma (PGNA).....	2
1.2.2. Activación de neutrones Térmicos (PFTNA) 2	
1.2.3. Fluorescencia de Rayos-X de alta velocidad (HS-XRF).....	2
1.2.4. Resonancia Magnética (RM).....	3

1.3. ¿Por qué aplicar ore sorting?	3
2. Implementación de ore sorting en palas en Antamina	4
2.1. Proceso de implementación y etapas del proyecto	4
2.1.1. Primera Etapa: Prueba de Compatibilidad..	4
2.1.2. Segunda Etapa: Prueba Piloto en Cargador Frontal.....	5
2.1.3. Tercera Etapa: Prueba de Ensayos en Pala de Producción P&H	5
2.2. Recomendaciones para una implementación óptima	6
2.2.1. Definición de los Indicadores de éxito del proyecto 6	
2.2.2. Modo de Calibración de los sensores	6
2.2.3. Alcance del sensor	7
2.2.4. Disponibilidad Mecánica y confiabilidad del sistema	7
2.2.5. Soporte de un equipo de Analítica de datos que se encuentre actualizando y perfeccionando el modelo	7
2.2.6. Soporte 24x7.....	7
2.2.7. Iteración constante con el equipo de Geología y modos de Operación.....	7
2.2.8. Manejo de Cambio.....	7
2.2.9. Entrenamiento.....	7
2.2.10. Licencias y permisos.....	8
2.2.11. Logística de internamiento y reemplazo ..	8
2.2.12. Safety	8
2.2.13. Tener claro siempre el Valor generado por el proyecto	8
2.2.14. Como fue el manejo de leyes diferentes al plan	8
3. Metodología Conceptual para la estimación del beneficio	8
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	10
Referencias	10
5. Contenido	10

Figuras

Figura 1-1 : Elementos leídos en la Prueba de Ensayos 2	
Figura 1-2 : Fuentes de captura de material para realizar el Ore Sorting.....	2

Figura 1-3: Nivel de resolución entre los polígonos y los baldes	4
Figura 1-4 : Bloques que se pueden recuperar	4
Figura 2-1 : Prueba de compatibilidad (izquierda), prueba piloto (centro) y prueba trial (derecha).....	4
Figura 2-2 : Pala cargando camión	5
Figura 2-3 : Pila ROM.....	5
Figura 2-4 : Pila ROM.....	6
Figura 2-5 : Chancado de subprueba	6
Figura 2-6 : Pilas aplanadas	6
Figura 2-7 : Recolección de muestra	6
Figura 2-8 : Ensayo de la muestra	6
Figura 2-9 : Eventos de colección de datos por cada ciclo de llenado (10 lecturas por segundo).	7
Figura 3-1: Comparativo entre los modelos de reservas y el modelo de recursos.	8
Figura 3-2: Identificación de Fuentes de valor para el Ore sensing.....	9
Figura 3-3 : Diferencia gráfica en el diseño de polígonos entre el Modelo Inicial y Final.....	9

Tablas

Tabla 1-1 : Criterios para una buena selección de tecnología.....	3
Tabla 1-3 : Tipos de Tecnología versus los criterios de selección Ausenco (2020).....	3
Tabla 3-1 : Porcentajes de Dilución, Perdida y Mezcla entre los años 2017 y 2020	9

Ingeniero de Sistemas, MBA en Administración Estratégica; ejecutivo con 30 años de experiencia; especialista en Planificación Estratégica, Mejora Continua de Procesos, Gerencia de Proyectos de Tecnologías de Información, Proyectos de Ingeniería del sector minero; actualmente Superintendente de Proyectos de Innovación y tecnología

Juan Arturo Escala Abril

Superintendente de Planificación y Desarrollo de Negocios.

Compañía Minera Antamina

jescala@antamina.com

+51 996 593 465

Calle los Cedros, Urb. La molina vieja, La Molina

Ingeniero Mecánico de la PUPC, Candidato CMBA UP, con más de 28 años de experiencia en Mantenimiento, gestión de activos, gerencia de ingeniería y proyectos, Comisionamiento, Pilotos de Innovación y Tecnología, Planeamiento de Negocios y Estudios Mineros, solucionando los más difíciles retos de la minería peruana y mundial. Reciente experiencia en el desarrollo de estudios de mecanización de desmonte con fajas, disposición de relaves con el uso de commingling, ore sensing, y el despliegue de un roadmap de innovación y tecnología

Nestor Deza Grados

Gerente de Estudios e Innovación

Compañía Minera Antamina

ndeza@antamina.com

+51 939 294 051

Av. 7, Urb. El Sauce de La Rinconada, La Molina

Bachiller en Ingeniería Mecánica con 10 años de experiencia en Gestión de Activos e implementación de Proyectos de Tecnología Minera.

Antonio Bustamante Beltran

Ingeniero de Tecnología Minera

Compañía Minera Antamina

abustamante@antamina.com

+51 958 517 723

Plaza Padre Constancio Bollar 203, San Isidro

Ingeniero de Minas, Diploma en Evaluación Geoestadística de Recursos Mineros; más de 10 años de experiencia en Planificación de Minas, Estimación de Recursos y Reservas Minerales, y Desarrollo de Iniciativas Tecnológicas

Nehemias Lopez

Ing. Senior de Planeamiento Largo Plazo

Compañía Minera Antamina

nlopez@antamina.com

+51 996 329 591