



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**EVALUACIÓN ECONÓMICA DE TÉCNICAS DE SELECTIVIDAD DE
MINERAL (ORE SORTING) PARA SU APLICACIÓN EN COLLAHUASI**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y
DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

ALEJANDRO RODRIGO SANHUEZA PASSACHE

**PROFESOR GUÍA:
JULIO MORALES OLIVARES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO CASALI BACELLI
ENRIQUE SILVA RAMOS**

**SANTIAGO DE CHILE
2021**

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO
DE: Magister en Gestión y Dirección de
Empresas.
POR: Alejandro Rodrigo Sanhueza Passache.
FECHA: 28-4-2021.
PROFESOR GUÍA: Julio Morales Olivares.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE TÉCNICAS DE SELECTIVIDAD DE MINERAL (ORE SORTING) PARA SU APLICACIÓN EN COLLAHUASI

En los últimos 10 años ha existido un desarrollo importante de tecnologías para mejorar la **selectividad de mineral** previo a los procesos planta (Ore Sorting) con el objetivo de minimizar el procesamiento de mineral de bajo valor, maximizando de esa manera el uso de los activos, y entregando aumentos de producción y saltos de valor en proyectos u operaciones.

A fin de evaluar una estrategia para Collahuasi de la manera en que se debe asimilar estos avances tecnológicos, fueron construidos tres casos de negocio basados en datos propios de la compañía, que han permitido dimensionar el tamaño de la oportunidad y visualizar los próximos pasos.

Los resultados de la evaluación económica de los casos arrojaron un VAN positivo para cada uno de ellos, y un valor acumulado de **887 MUS\$** (millones de dólares), para un Capex acumulado de 160 MUS\$. Este relevante resultado sugiere que Collahuasi, por las características propias del yacimiento exhibe un potencial mayor para la aplicación de estas tecnologías.

Al revisar el estado del arte en el mundo respecto al tema se constata que aún gran parte de las soluciones tecnológicas están en etapa de maduración, algunas con aplicaciones de escala industrial y otras en desarrollo. Sin embargo, gran parte de la industria se está movilizándose en esa dirección, identificando un importante potencial de aumento de valor, para optimizar sus operaciones, viabilizar proyectos, y con potencial contribución en drivers de sustentabilidad como el ahorro energético, agua, dimensiones de las operaciones u otros.

Se visualiza la necesidad que Collahuasi explore de manera sistemática las oportunidades en Selectividad de Mineral, las cuales podrían aportar significativos aumentos de valor al negocio.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi por la oportunidad de poder desarrollar este trabajo, proponiendo ideas que puedan desafiar la manera actual en que entendemos la gran minería del cobre.

Un agradecimiento especial a mi profesor guía Julio Morales, quien con rigor y dedicación supo orientar el trabajo hacia la creación de valor al negocio.

Agradecimiento a todo el equipo del MBA Minero de mi querida Universidad de Chile, quienes han sabido mantener la excelencia de este programa, con docentes de primer nivel, temáticas asociadas a los fundamentos del negocio minero, combinado con las nuevas tendencias mundiales en todas las materias relevantes al desarrollo de una minería sustentable.

Finalmente, gracias familia, por haber estado siempre presente en estos dos años muy intensos.

TABLA DE CONTENIDO

	página
Resumen	i
1. Introducción	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
2. Metodología	3
2.1 Resultados esperados	3
3. Contexto Collahuasi	4
3.1 Diseño cadena de valor Collahuasi	5
3.1.1 Extracción y Chancado	6
3.1.2 Molienda.....	6
3.2 Collahuasi en etapa de crecimiento	8
4. Selectividad de Mineral	11
4.1 Oportunidades de selectividad de mineral	14
4.1.1 Heterogeneidad de ley por tamaño	14
4.1.2 Efecto de tronadura diferenciada	14
4.1.3 Clasificación de mineral ROM uso de sensores	15
4.1.4 Clasificación de mineral en flujo continuo	15
4.1.5 Separación gruesa por gravedad	15
4.1.6 Casos especiales	16
4.2 Selectividad según ubicación en el proceso	17
4.2.1 Clasificación en procesos ROM	17
4.2.2 Clasificación de mineral post-chancado.....	17
4.2.3 Clasificación de mineral post-molienda SAG.....	18
4.3 Tecnologías disponibles	19
5. Geología de Collahuasi y su potencial en selectividad	20
5.1 Aspectos relevantes de la geología de Rosario.....	20
6. Parámetros económicos en casos de negocio	25
7. Casos de Negocio Collahuasi.....	27
7.1 Selectividad mediante uso de sensores en palas	28
7.1.1 Shovel Sense	29
7.1.2 Características de la tecnología Shovel Sense.....	30
7.1.3 Aspectos operacionales de la tecnología	30
7.1.4 Confección del caso de negocio	31
7.1.5 Evaluación económica	34
7.2 Selectividad reduciendo alimentación de Pebbles	37

7.2.1	Caracterización geológica de los pebbles	37
7.2.2	Confección caso de negocio	41
7.3	Selectividad por granulometría	46
7.3.1	Test de Heterogeneidad Rosario	46
7.3.2	Caso de Negocio	48
8.	Discusión	51
9.	Conclusiones	54
	Bibliografía	55

1. INTRODUCCIÓN

El aumento creciente de la minería a gran escala en el mundo ha llevado a que la palanca principal del beneficio económico ha sido el aumentar el tratamiento de mineral, pudiendo ser tratadas bajas leyes de mineral, y olvidando muchas veces la posibilidad de ser más selectivos en las etapas tempranas del proceso minero (mina, chancado, previo a la molienda). En el último tiempo se han visualizado soluciones de selección y separación de minerales más eficientes para lograr métodos sostenibles y económicos para extraer y procesar depósitos de baja ley (Manouchehri, 2004; Powell and Bye, 2009; Bergmann, C, 2009; Foggiato et al, 2014). En depósitos de más alta ley, sin embargo, también resulta de interés estudiar estas tecnologías para lograr saltos de valor en el negocio.

Para que el tratamiento de un yacimiento sea económicamente viable, es necesario extraer y procesar grandes cantidades de roca. Los costos de infraestructura asociados (instalaciones de mina y planta, energía, suministro de agua, etc) resultan en un costo sustancial de una operación minera, por tanto, el desafío para la industria minera es resolver el aumento asociado al consumo de energía y agua, así como el aumento de la complejidad de procesar grandes cantidades de mineral.

Las tecnologías de selección de minerales se han utilizado durante muchos años, asociado a proyectos pequeños o marginales, lo que permite la mejorar el perfil económico del negocio. Estas técnicas de selección basadas en características físicas han usado la ley, peso específico, tamaño de partícula, u otras como medio para clasificar y seleccionar la mena de mayor beneficio económico a ser alimentada.

El desafío para cualquier operación minera en ejecución, en cambio, la cual tiene su inversión ejecutada, será buscar la mejor eficiencia en el uso de sus activos de mayor valor, que en el caso de una mina que trata sulfuros primarios, será maximizar el tratamiento planta, minimizar el consumo específico de energía durante la conminución y reducir los costos de eliminación de desechos (relaves). El factor económico más relevante en este caso se logra - a partir de la selectividad del mineral - en un aumento de la ley de cabeza de la planta.

Esta tesis pretende analizar el impacto económico de la clasificación temprana de de minerales (ore sorting) en una gran operación minera como Collahuasi. El objetivo del análisis es comparar los NPV de las distintas alternativas tecnológicas disponibles y proponer la viabilidad de contar con estas tecnologías para optimizar el valor del negocio. Se discutirá la problemática que las nuevas tecnologías han puesto sobre la mesa donde la

decisión de aumentar el volumen de tratamiento no es necesariamente la solución con mayor beneficio económico.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar desde el punto de vista técnico y económico las principales tecnologías existentes de selectividad de mineral (ore sorting), proponiendo para Collahuasi el mejor escenario para adoptar o no algunas de estas alternativas, cuantificando su impacto en el valor global del negocio, riesgos asociados, y eventuales oportunidades en otros procesos de la cadena de valor.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se propone en primer término actualizar el conocimiento acerca de las tecnologías disponibles y su estado de avance y utilización en la industria. Para el caso Collahuasi se requiere que las tecnologías que sean propuestas tengan un nivel de avance que al menos se encuentren en etapa de prueba industrial en alguna faena minera en el mundo, con resultados a la vista que puedan ser utilizados para realizar una evaluación económica y técnica con nivel de confianza de factibilidad.

Se pretende que posterior al catastro y evaluación técnica de las alternativas, cada una de ellas sea posible ser evaluada de manera aislada para lograr obtener el valor marginal y establecer su impacto por si misma (ceteris paribus).

Como objetivo último se pretende establecer para el caso específico del negocio Collahuasi, una estrategia para adoptar o rechazar estas tecnologías, relevando el eventual impacto positivo en el valor del negocio, proponiendo una hoja de ruta con los hitos de esta transformación, niveles de inversión, riesgos, oportunidades, y los economics de cada proyecto y la estrategia integrada.

2. METODOLOGÍA

En la minería mundial hay experiencias relevantes que han estado enmarcadas en investigaciones de centros especializados (eg. Amira, Sciro, CRC Ore, Metso), que han apoyado a las mineras de mayor escala, las cuales, por su estrategia de desarrollo, las han mantenido en niveles restringidos de acceso a la información. Empresas como BHP, Anglo American, Río Tinto, entre otras, han dado pasos importantes en investigar estas tecnologías, evaluando los impactos en el incremento de valor en sus negocios. Poca información ha sido publicada, sin embargo, experiencias de mineras o proyectos más pequeños sí están disponibles, por tanto, un primer paso será hacer una compilación de todo lo que a la fecha está publicado (Powell and Bye, 2009; Foggiato et al, 2014; Seerane, and Rech, 2011; Tong, 2012; Rutter, 2017).

Actualmente organizaciones como Expande (dependiente de la Fundación Chile) tiene conexiones con los grupos de investigación tecnológica más importantes del mundo, y una vinculación con ellos será parte de esta etapa inicial de la tesis.

Posterior a ello, se realizará un análisis de la operación de la mina Collahuasi, su estructura de costos, cadena de valor, configuración de equipos mina y planta, aspectos geológicos del yacimiento, entre otros, de modo de identificar las oportunidades que se puedan visualizar en cada uno de los procesos, relacionado a selectividad (ore sorting). Se tendrá un mapa completo del proceso, haciendo posible tener una visión preliminar de las oportunidades visibles de cada tecnología, de modo de concentrar el trabajo en las dos o tres de posible mayor impacto y descartar otras cuyo valor preliminar sea bajo.

Finalmente se realizará la evaluación económica de las alternativas seleccionadas, calculando los economics como proyectos individuales, llevándolos a las métricas clásicas de comparación como NPV, IRR.

2.1 RESULTADOS ESPERADOS

Contar con una estrategia de evaluación y adopción de nuevas tecnologías de selección de mineral en Collahuasi, con casos de negocio concretos y datos reales de la compañía.

Se espera que esta tesis contribuya a la materialización de la estrategia global de la compañía, la cual ha ido migrando desde una etapa de Optimización hacia un peldaño superior de crecimiento, por lo tanto, la evaluación de estas alternativas se enmarca perfectamente en el horizonte estratégico del negocio.

3. CONTEXTO COLLAHUASI

Collahuasi es una compañía minera dedicada a la extracción y producción de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno. Sus niveles de producción, sumado a sus recursos de mineral, la sitúan dentro de las principales productoras de cobre del mundo y la segunda más grande de Chile. Cuenta con uno de los depósitos de cobre más grandes del planeta, con 10.201 millones de toneladas de una ley promedio 0,77% CuT (Statement de Recursos y Reservas, 2020).

Sus instalaciones industriales y los yacimientos Rosario y Ujina están ubicados en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, a una altitud entre los 3800 y los 4800 msnm (figura 1). En el sector de Ujina se encuentra también la planta concentradora, desde donde nace un sistema de mineroducto de 203 km de extensión, a través del cual el concentrado de cobre es trasladado hasta el Terminal Marítimo Collahuasi. Desde este puerto, ubicado en Punta Patache, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, se embarcan los productos hacia los mercados internacionales. En este lugar, se encuentran también las plantas de molibdeno y de filtrado de concentrado.



Figura 1: Ubicación faena Collahuasi (Informe EIA).

Los accionistas de Collahuasi son Anglo American plc (44%), Glencore (44%) y Japan Collahuasi Resources B.V. (12%), los que están representadas en su Directorio.

El 2019 Collahuasi produjo 565 mil toneladas de cobre fino, con ingresos por ventas por US\$ 3.147 millones.

3.1 DISEÑO CADENA DE VALOR COLLAHUASI

Como se explica anteriormente, actualmente Collahuasi explota y procesa minerales de cobre, contando con una planta concentradora para tratamiento de sulfuros. A partir del año 2016 las operaciones de óxidos fueron suspendidas al agotarse los recursos de alta ley que daban viabilidad al proyecto. Los minerales sulfurados que se procesan actualmente son procesados en la planta concentradora mediante flotación convencional para producir concentrado de cobre. Como subproducto del concentrado de cobre se obtiene molibdeno el cual es procesado en la planta de Punta Patache, donde finalmente es embarcado a través del puerto mecanizado.

Se presentan en adelante los aspectos más relevantes del proceso mina y planta por tener importancia en el desarrollo de la tesis (Informes Internos Collahuasi).

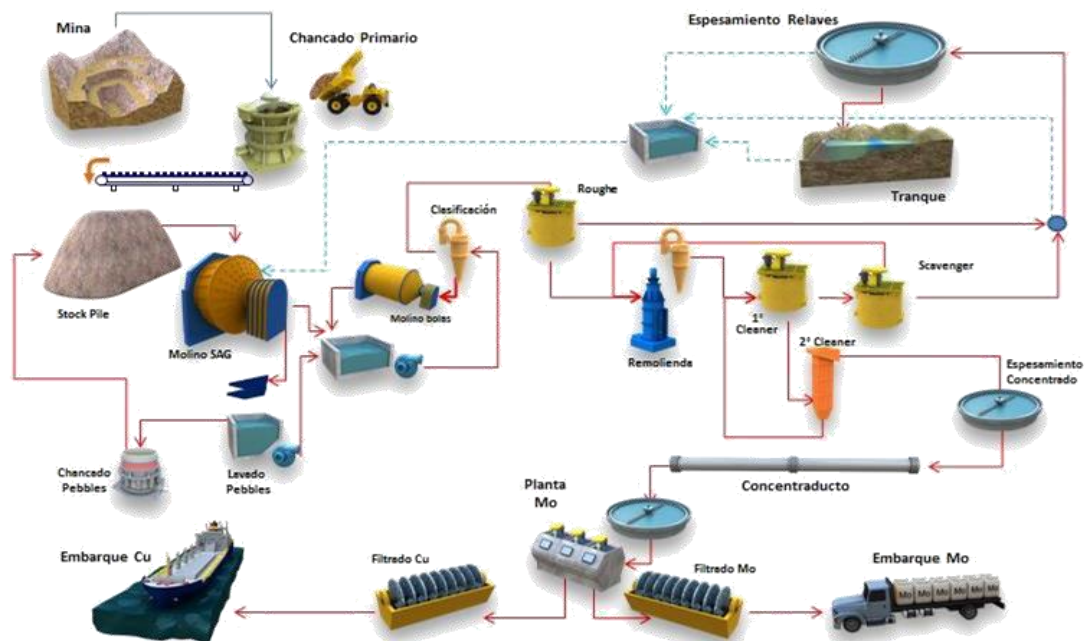


Figura 2. Diagrama general de la operación actual (reporte interno).

3.1.1 Extracción y Chancado

El proceso de extracción y chancado comienza en que el rajo es tronado mediante explosivos para que Palas mecánicas, carguen camiones de alto tonelaje que trasladen el material hacia el Chancador Primario. El Chancador Primario es la primera etapa del proceso de conminución de la única línea productiva operativa de Minera Collahuasi. Las instalaciones del Chancador Primario están preparadas para recibir la descarga de dos camiones CAT 797 de 360 toneladas de capacidad. El ritmo de tratamiento de mineral es de aproximadamente 150.000 t/d nominal.

El producto ya procesado por el chancador primario es descargado a través de una tolva de descarga y de un chute hacia un alimentador de correa de 14 m de largo y 3.048 mm de ancho con una capacidad de 11400 t/h, con un motor de 300 kW de potencia, esta correa alimenta a una correa Overland de 2648 m de largo con una capacidad de un poco más de 12000 t/h.

La correa alimenta a una serie de correas que finalmente terminan por descargar el mineral chancado en el acopio de mineral grueso o Stock Pile el cual almacena el mineral que posteriormente alimentará a la molienda SAG.

3.1.2 Molienda

La primera parte de la molienda, se compone de 3 molinos SAG (figura 3). Luego de pasar por el proceso de molienda de los SAG el material es descargado en un Trommel el cual se encarga de clasificar o seleccionar el mineral de acuerdo a su granulometría. El material de mayor tamaño se envía a los chancadores de Pebbles mientras que el material que pasa por la malla del Trommel se envía a los Hidrociclones, los cuales son alimentados por 8 Bombas Centrifugas, llamadas bombas bajo Molino. El material de menor tamaño seleccionado por los hidrociclones se dirige a las celdas de flotación mientras que el de mayor tamaño se recircula hacia los 4 Molinos Bola para realizar otro proceso de molienda y posteriormente enviar nuevamente hacia los hidrociclones.

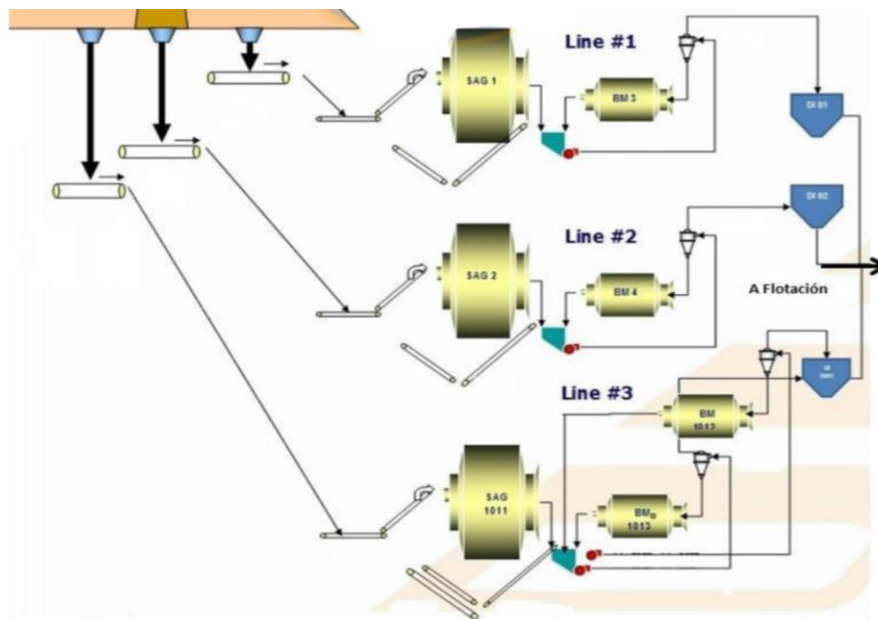


Figura 3. Diagrama general de la molienda (reporte interno).

Como se ha mencionado previamente, el circuito de molienda cuenta con una **planta para chancado de pebbles**, el cual anualmente genera aproximadamente el 6% de la alimentación al SAG (figura 4). En capítulo de Casos de Negocio se identificará que los pebbles pueden constituir una fuente de selectividad natural en un molino SAG

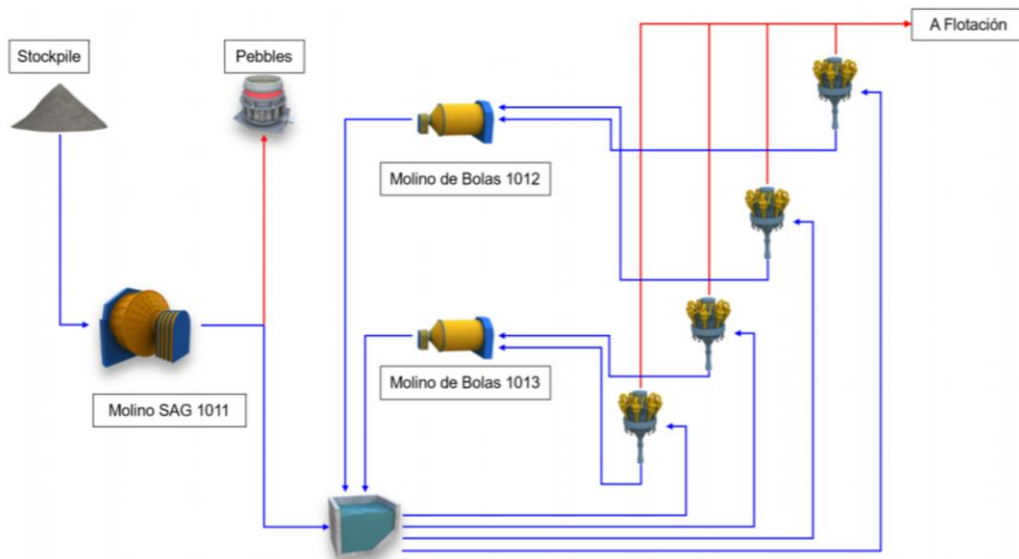


Figura 4. Diagrama general del circuito Pebbles (reporte interno).

3.2 COLLAHUASI EN ETAPA DE CRECIMIENTO

Como consta en el reporte ingresado a la autoridad para evaluación ambiental (Collahuasi, 2018) Collahuasi ha evaluado alternativas para optimizar equipos y procesos y así aumentar la capacidad de tratamiento planta, como promedio anual del mineral sulfurado, durante la vida útil del Proyecto, a 210 KTPD, compensando a su vez, la disminución en la ley de corte de cobre operacional, la que variará entre 0,64 % y 0,45% aproximadamente. Parte del material de baja ley que antes era enviado a stocks de mineral de baja ley será ahora procesado, permitiendo aumentar la alimentación a la Planta de Procesamiento.

El Proyecto de optimización permitirá a Collahuasi aumentar el nivel de producción de concentrado de cobre a un promedio anual de 600 mil toneladas por año. Para ello, se requerirá la incorporación de un 5º molino de bolas, así como la modificación y optimización de algunos de los actuales equipos. El proyecto está actualmente en la tramitación de los permisos mediante un EIA, el cual incluye además la construcción de una planta desaladora.

El Proyecto "DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA Y MEJORAMIENTO DE CAPACIDAD PRODUCTIVA DE COLLAHUASI", ha sido ingresado el año 2018 para su evaluación ambiental (EIA) y contempla una inversión total de **3.200 MUS\$**. En la presentación del proyecto se presentan las varias modificaciones a la infraestructura existente (figura 5). Las relevantes para este caso son:

Principales mejoramientos de capacidad productiva

- Modificación del ritmo de explotación y ampliación del rajo Rosario.
- Ampliación del botadero de estériles Rosario y habilitación de un nuevo botadero de estériles denominado "botadero Sur".
- Ampliación del acopio de mineral de baja ley Rosario.
- Ampliación de la capacidad de procesamiento en la Planta Concentradora, de 170 ktpd a 210 ktpd, que implica la habilitación de un chancador primario fijo, incorporación de correas transportadoras, modificación de un molino de bolas junto con su sistema de enfriamiento, **una nueva planta de lavado y chancado de pebbles**, instalación de nuevas celdas de flotación y un nuevo circuito de remolienda, entre otros.
- Ampliación del depósito de relaves.
- Reducción de la extracción actual de agua subterránea, como resultado del desarrollo de infraestructura para la inclusión de una fuente complementaria de abastecimiento hídrico.
- Modificación de la tecnología de lixiviación por una de biolixiviación, utilizando los equipos e instalaciones existentes del proceso de lixiviación, incluyendo nuevas obras y sistemas.

Infraestructura de fuente complementaria de abastecimiento hídrico

- Construcción de un acueducto entre Quebrada Blanca y el área de procesos de Collahuasi para la conducción de hasta 300 L/s de agua desalada que se utilizará en caso de mantención o falla de las instalaciones de abastecimiento hídrico de uso permanente.

Infraestructura Puerto Collahuasi

- Nuevas obras y modificaciones en la Planta de Molibdeno para lograr el procesamiento de la totalidad del concentrado colectivo.
- Recirculación de las aguas de proceso tratadas en la planta FAD hacia estanques de la impulsión del agua tratada en la Planta Desaladora.
- Nuevas obras y modificaciones en la Planta de Filtrado de concentrado de cobre, que permitan el procesamiento de la totalidad del concentrado colectivo proveniente de la Planta Concentradora.
- Nueva Planta de Tratamiento de Aguas Servidas.
- Construcción de una Planta Desaladora de agua de mar, junto con obras marinas de captación e impulsión de agua de mar y descarga de efluente salino, así como la planta que incluye los procesos de pretratamiento, osmosis inversa y postratamiento. El sistema de desalinización y conducción será habilitado en dos fases para suplir caudales máximos de 525 L/s y 1.050 L/s en el cuarto y octavo año del proyecto respectivamente.

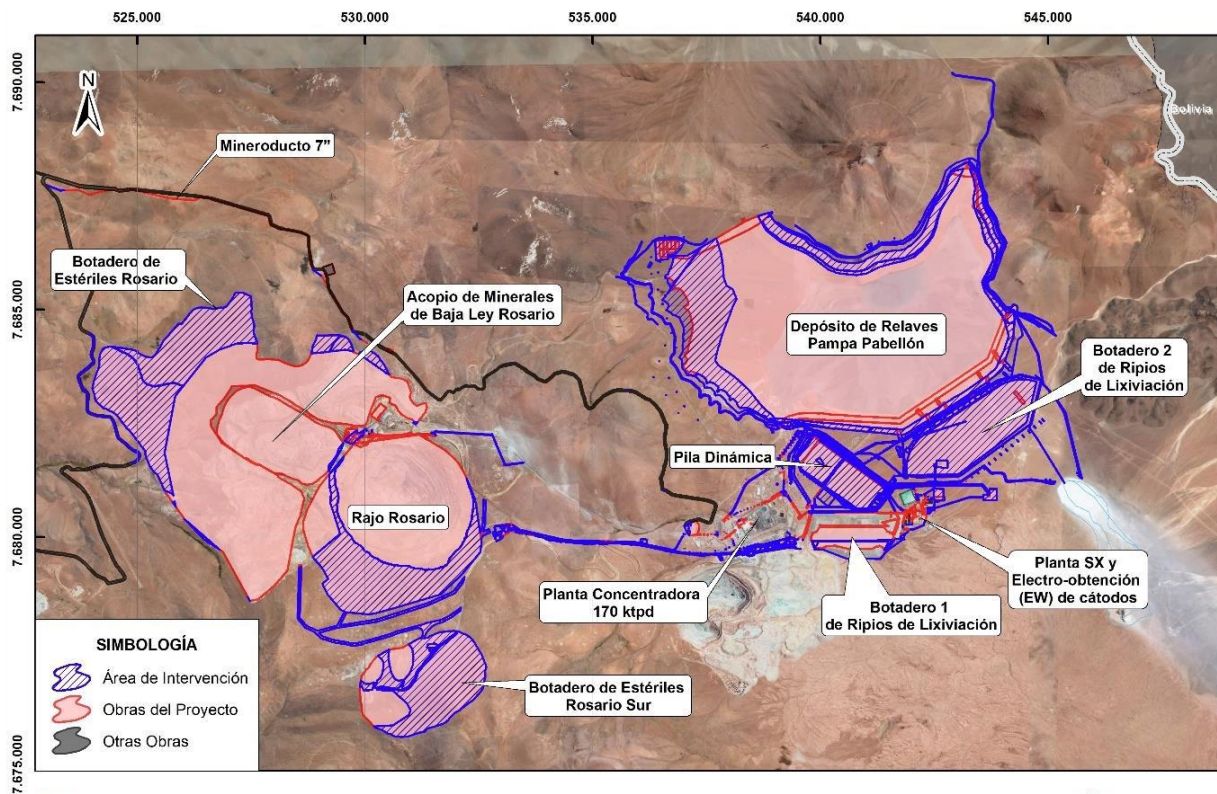


Figura 5: Superficies de intervención de obras del mejoramiento de la capacidad productiva, sector Cordillera (Collahuasi, EIA, 2018).

La mencionada ampliación de la planta concentradora conlleva también la ampliación de la capacidad de la Planta de Pebbles con una inversión estimada de 31 MUS\$, tema que será discutido en los casos de negocio relacionados a selectividad.

4. SELECTIVIDAD DE MINERAL (ORE SORTING)

En la industria minera en el último tiempo se han instalado varias maneras de nombrar las nuevas técnicas de seleccionar el mineral previo al proceso de molienda. Usualmente los conceptos más mencionados en la literatura son “**ore sorting**” o bien “**grade engineering**”, que en español su mejor traducción podría corresponder a “**selectividad de mineral**”. En este trabajo usaremos indistintamente estas definiciones para referirnos a cualquiera de las técnicas cuyo resultado final esperado siempre será el incremento en la ley de alimentación del metal en estudio, que para nuestro caso Collahuasi será el **cobre**.

A través de los años la minería en el mundo ha tenido un foco de crecimiento basado en el aumento de tratamiento de mineral en las plantas concentradoras, como el principal impulsor del aumento de valor del negocio, enfocando los esfuerzos en tratar cada vez más, con el consiguiente decrecimiento en las leyes de corte del mineral a tratar. Con economías de escala y mejoras tecnológicas cada día es factible tratar menores leyes de cobre en plantas concentradoras, apalancado por el volumen de tratamiento.

La heterogeneidad en la distribución de leyes en los yacimientos hace que muchas veces son tratados volúmenes significativos de **lastre** o mineral bajo la ley de corte operacional, con el consiguiente gasto en transporte, chancado, molienda, flotación, etc. Esta heterogeneidad natural de la ley de cobre en los yacimientos usualmente es ignorada, ya que los diseños de explotación de los grandes rajos apuntan a maximizar el volumen movido, con el uso de equipos mina que apuntan al gigantismo. El crecimiento sostenido de la capacidad de palas y camiones mineros es un buen indicador del sentido de gigantismo reinante en la minería. Los estudios de SMU (smallest mining unit) usualmente entregan una correlación entre la unidad de extracción, altura de banco, la heterogeneidad del depósito y el tamaño de los equipos de carguío y transporte. A pesar que estos estudios, para los yacimientos más comunes en Chile (pórfidos de Cu) muestran unidades mínimas entre 15 y 30 m, existe una heterogeneidad geológica natural al interior de cada bloque que es potencialmente seleccionable por debajo de la escala de la unidad minera mínima. Hasta hace algunos años esta heterogeneidad era ignorada ya que no existían tecnologías desarrolladas para capturar el valor de separar en unidades más pequeñas. En los últimos 15 años, han renacido iniciativas tecnológicas para seleccionar de mejor manera el mineral y han puesto este tema sobre la mesa generando expectativas de saltos de valor relevantes en el negocio minero mediante el uso de técnicas de selectividad de mineral (Heron Resource Ltd., 2004; Miljak, D. 2011; Rutter, 2017).

La aplicación de la selectividad (o clasificación) basada en sensores tiene actualmente un uso frecuente en el reciclaje industrial o en las cadenas producción de alimentos, como controles de calidad, sin embargo, hay pocos ejemplos de aplicación en la industria minera.

Existen varias técnicas que han sido utilizadas para la separación-concentración temprana de mineral para los distintos tipos de depósitos. En depósitos de arenas de titanio por ejemplo es usual la pre-concentración por métodos magnéticos, gravimétricos entre otros. Sin embargo, en la minería del cobre estos métodos tienen corta data y se han enfocado en capturar todas las posibles fuentes de heterogeneidades del mineral en un depósito (Bamber, A, 2008; Tong, 2012).

Algunos ejemplos en minería metálica han sido exitosos aprovechando la marcada heterogeneidad de su mineral como es el caso de la concentración previa realizada en la década de 1980 en la mina Bougainville Copper Limited Panguna Cu-Au en Papua Nueva Guinea (Ziemski, 2019). El mineral encontrado fundamentalmente en la fracción fina permitió mejorar la ley de cabeza en un 50%, aumentando significativamente el valor del negocio.

Otros ejemplos, como Mount Isa Mines que, mediante el mismo mecanismo de separación de gruesos logró eliminar $\sim 35\%$ de la alimentación de Pb-Zn más gruesa y más dura antes del proceso de tratamiento de molienda. Esto aumenta el tratamiento planta, reduce el uso de capital en el circuito de molienda y reduce el requerimiento de energía unitario en la concentradora en más de 40%, junto con una mejora del 15% en la ley de alimentación (Ziemski, 2019).

La experiencia de Newcrest en la industria del oro ha sido también incorporar una serie de innovaciones de procesamiento desde la mina hasta la planta. Ejemplo de eso son la separación del lastre, menor consumo de energía en chancado y molienda, y enfoques geo-metalúrgicos que maximicen el uso de los activos (Logan and Chrisnan, 2012).

Tal como hemos discutido previamente el paradigma actual es la minería a gran escala donde existe un mayor valor cuanto mayor es la cantidad de roca tronada y movida. Los tipos de roca determinados a través de los modelos geológicos definen lastre o mineral para la unidad mínima modelable la cual se transforma en la unidad mínima de extracción. En Newcrest estimaron que solo puede haber un 10% del volumen que es un verdadero "mineral", y el resto puede ser lastre, considerando que los depósitos de oro tienen un importante "efecto pepa" y las leyes se concentran en vetas o vetillas de pequeño espesor. Basado en eso, Newcrest tiene se puso como objetivo estratégico hace más de 10 años lograr disminuir en más del 20% del lastre que va a chancado para ser procesados, reduciendo materialmente el uso de energía y agua ($> 20\%$), aumentando las recuperaciones de oro y cobre (1-

2%), eliminando lastre en la mina (desde la fuente), aumentando la vida útil de sus tranques de relaves, y aumentando (> 10%) la capacidad de producción de oro. Newcrest está adoptando técnicas de ore sorting para eliminar el lastre en Telfer, Lihir y otros sitios. A modo de ejemplo la ley de mineral en la mina Cadia también es baja según los estándares actuales y se espera que disminuya considerablemente en el futuro (al igual que en cualquier yacimiento de cobre). Para mantener la estructura de costos y la viabilidad comercial, es necesario introducir una etapa intermedia de concentración de bajo costo, eliminando una cantidad significativa de material de lastre.

Otro ejemplo en la mina de tungsteno Mittersill en Austria, se buscó una solución al decaimiento de la ley de cabeza desde 0.7% a 0.2% desde que comenzó la operación en 1976. Fueron instaladas unidades de clasificación de partículas basadas en sensores de transmisión de rayos X en 2008. Los resultados aumentaron significativamente la ley de cabeza, se redujo el consumo de energía (en Rutter, 2017).

Aunque existen estos ejemplos de agregación de valor a partir de concentración previa para algunas operaciones de metales base y preciosos, no existe un enfoque global basado en un sistema o una metodología estándar para evaluar configuraciones óptimas para elegir el tipo de tecnología aplicable y sus eventuales restricciones operativas.

En cada de la etapa de disminución de tamaño del mineral y su posterior transporte existe la oportunidad para aplicar algún tipo de separación, o selectividad. En el inicio de la cadena de conminución, con la perforación y tronadura, transporte, chancado, nuevo transporte hasta la molienda, existe una serie de hitos en cada proceso que permitirían separar las fracciones de más baja ley.

La oportunidad de generar valor a partir de esa separación va a depender de la heterogeneidad en la distribución de leyes del mineral. Un mineral homogéneo no tiene oportunidad de incrementar su ley mediante algún mecanismo de separación. La buena noticia desde la naturaleza es que **no existen minerales homogéneos.**

Una visión armónica y planificada de las iniciativas de selectividad permitirá en el futuro hacerlas competir con el gigantismo que a la fecha ha gobernado el crecimiento de la minería.

4.1 OPORTUNIDADES DE SELECTIVIDAD DE MINERAL

Se discuten a continuación las principales metodologías que se visualizan para Collahuasi como potenciales oportunidades de selectividad, y que agreguen valor al negocio.

4.1.1 Heterogeneidad de ley por tamaño

Existen algunos minerales presentes en varios tipos de depósitos que al ser fragmentados tienden a concentrarse en una fracción de tamaño específico. Usualmente minerales secundarios como la calcosina o covelina tienden a concentrarse en la fracción más fina, lo cual puede ser determinado en los Test de Heterogeneidad, donde este comportamiento es estudiado para distintas fracciones. Esto generalmente implica un aumento de minerales de alta ley de sulfuro en fracciones de tamaño más fino. El comportamiento de la ley para distintas granulometrías en etapas de conminución usualmente se relaciona a las propiedades naturales de la roca: textura, paragénesis del mineral (asociaciones mineralógicas) y la mineralogía misma. Por lo general, no existe una relación entre la intensidad de la separación granulométrica y la ley, sino más bien un control principalmente textural, es decir, el tipo de ocurrencia del mineral en la roca (diseminado, vetillas, vetas gruesas, asociaciones con distintos tipos de ganga, etc). Los procesos mecánicos que ocurren durante la extracción del mineral tales como la perforación, tronadura y chancado primario, suelen ser la primera fuente de separación en distintas fracciones granulométricas.

4.1.2 Efecto de tronadura diferenciada

El uso de distintas técnicas de tronadura (espaciamiento, carga, pre-corte, otros) para fases mineras que se ubican en zonas de mineral o fases de desarrollo genera distribuciones granulométricas diferenciadas que suelen potenciar o minimizar eventual separación granulométrica de los minerales de mena.

El ser capaces de manejar – mediante el control de la perforación y tronadura - la distribución granulométrica de salida podría ser una palanca importante para generar una heterogeneidad que pueda servir para seleccionar el mineral de mayor ley y rechazar los bloques de menor ley.

4.1.3 Clasificación de mineral ROM con uso de sensores

Es posible la selección de mineral mediante el uso de una amplia variedad de sensores electrónicos capaces de proporcionar información en línea instalados en las perforadoras, baldes de palas, camiones y correas transportadoras, entregando la información en el momento para tomar decisiones respecto al destino de los materiales (mineral, lastre, stocks). Existen muchas tecnologías capaces de detectar la ley de Cu en material grueso que van desde mediciones en la superficie de la roca, hasta tecnologías de penetración, proporcionando respuestas tanto para ley como para mineralogía. La capacidad de separar el mineral dependerá entonces de la resolución y precisión de sensores individuales, además de los tiempos de interacción con el material para la adquisición de datos. Un tema relevante en este caso es la posibilidad que la unidad mínima de selectividad pueda ser una pala, un camión o incluso escala de pocas toneladas mediante cargadores frontales.

4.1.4 Clasificación de mineral en flujo continuo

A diferencia del caso anterior, en que la clasificación basada en sensores involucra distribuciones de tamaño de partícula de escala de material ROM, la clasificación en flujo continuo involucra una distribución de tamaño de partículas que ha sido previamente modificada (posterior al chancado primario, por ejemplo). Esto se debe a los requisitos de algunas tecnologías que requieren una distribución de tamaño particular para mejorar la interacción con la roca y permitir la separación individual de partículas (por ejemplo, mediante uso de aire a presión, vibradores mecánicos, u otro).

4.1.5 Separación gruesa por gravedad

Se relaciona al uso de separación de medios pesados y plantillas de presión en línea a escala gruesa (> 10 mm) que generan separaciones de partículas individuales basadas en la densidad. Los resultados de capacidad de separación y separación son una función de la textura y la mineralogía a esta escala. En comparación con las oportunidades anteriores, para usar este principio la alimentación de mineral generalmente requiere una fragmentación secundaria para proporcionar una distribución del tamaño de partícula estándar. Usualmente podría ser usada como una etapa de limpieza, posterior a una clasificación previa.

4.1.6 Casos especiales

Hay bastantes trabajos que abordan la separación natural de leyes en las distintas fracciones durante la etapa de fragmentación, sin embargo, hay algunos supuestos fundamentales que son asumidos posterior a la molienda en los molinos SAG, y es que la distribución de leyes es homogénea. No existen trabajos sistemáticos acerca del estudio del **origen de los pebbles**, desde su mineralogía, textura y fundamentalmente su ley.

Estudios internos recientes del equipo de Collahuasi han mostrado que la ley de los pebbles podría ser significativamente más baja que la ley media de alimentación, lo cual significaría que los molinos SAG pudieran actuar como un selector natural de ley que también podría ser aprovechado. Esta hipótesis debe ser confirmada con más datos ya que podría constituir un elemento importante de selectividad en un depósito cualquiera (ver capítulo Casos de Negocio).

4.2 SELECTIVIDAD SEGÚN SU UBICACIÓN EN EL PROCESO

4.2.1 Clasificación en procesos ROM

Corresponde a las oportunidades de clasificación desde la mina hasta el chancado primario, donde existen posibilidades usando el proceso de tronadura, como también durante el uso de palas y camiones (figura 6). El valor agregado estará fundamentalmente en maximizar el uso del chancador primario y maximizando la ley y minimizando la dureza del mineral, reemplazando el mineral de menor beneficio económico por otro con un perfil de mejor calidad (ley, subproductos, dureza, etc).

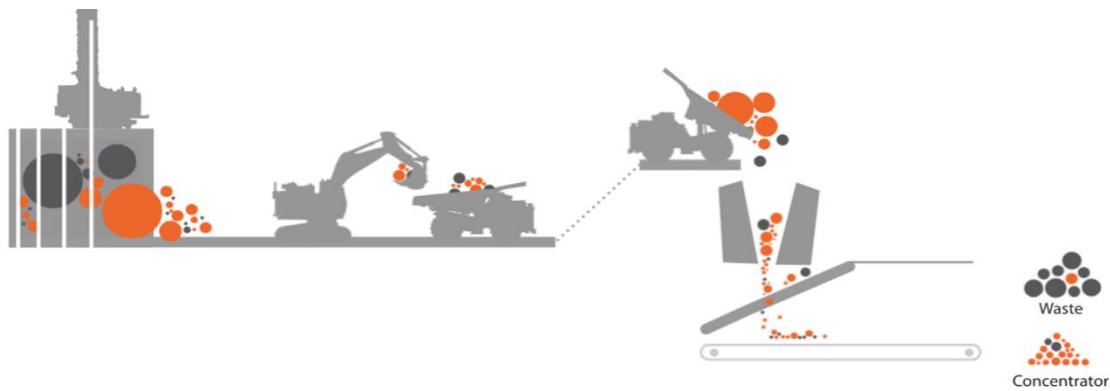


Figura 6: Clasificación Pre Chancado (modificado de CRC Ore)

4.2.2 Clasificación de mineral post-chancado

Corresponde a las oportunidades de clasificación posterior al chancado primario, donde el mineral ya tiene una fracción granulométrica muy diferente al mineral ROM, y en el cual ya existen gran cantidad de partículas liberadas, y donde la fracción podría ser aprovechada como una eventual fuente de incremento de ley (figura 7).

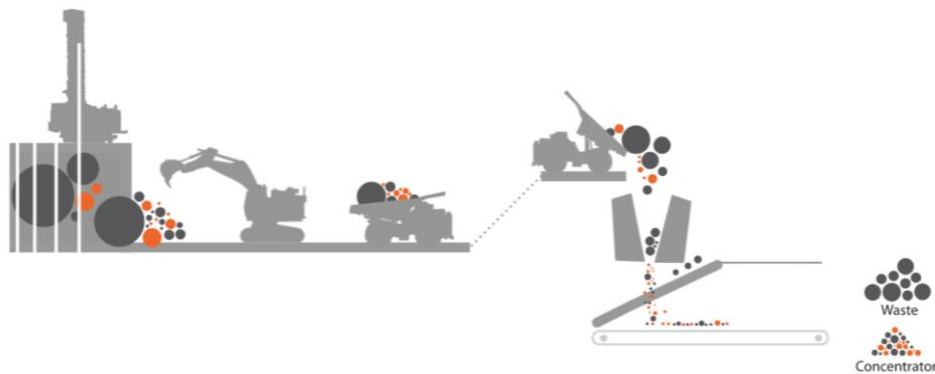


Figura 7: Clasificación post Chancado (modificado de CRC Ore).

4.2.3 Clasificación de mineral post-molienda SAG

Corresponde a la mencionada oportunidad de clasificación posterior al paso del mineral por los molinos SAG, lo cual genera una generación de pebbles que requiere ser estudiado en su generación de valor al negocio, ya que existe la hipótesis que estos podrían representar fragmentos de baja ley (figura 8).

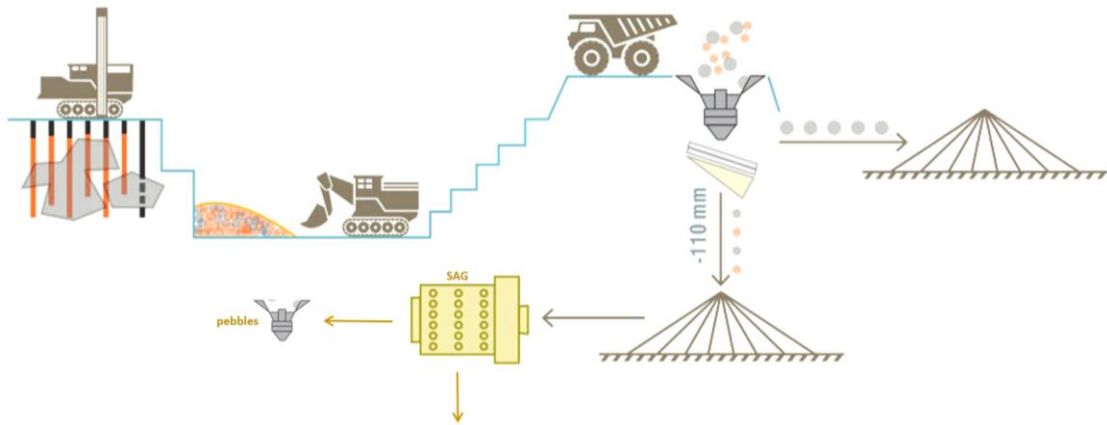


Figura 8: Clasificación post Chancado (modificado de CRC Ore).

4.3 TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

La clasificación de minerales se basa en medir una propiedad que es diferente en los componentes con valor económico y el lastre, utilizando algún tipo de sensor. Hay una variedad de sensores disponibles que se usan comúnmente en la industria incluyendo fotométrica, electromagnética, radiométrica y de rayos X. Un resumen de los tipos de sensores se presenta en la tabla 1.

Tipo de Sensor	Propiedad	Aplicación	Uso	Velocidad	Penetración
Resonancia magnética	excitación-detección espectros de radio frecuencia	selección de calcopirita	desarrollado para selectividad integral	segundos	penetra
Radiometría	radiación natural gamma	uranio, metales preciosos	selectividad de partículas	tiempo real	penetra
Transmisión R-X energía dual	absorción R-X (densidad atómica)	Metales base y preciosos, minerales industriales	selectividad de partículas	tiempo real	penetración parcial
Fluorescencia R-X	absorción R-X (densidad atómica)	Metales base y preciosos, minerales industriales	selectividad de partículas	tiempo real	superficie
Color (cámaras de color)	reflexión, absorción, transmisión	Metales base y preciosos, minerales industriales	selectividad de partículas	tiempo real	superficie
Photometría	reflexión monocromática	Minerales industriales	selectividad de partículas	tiempo real	superficie
Electromagnético	conductividad, permeabilidad	Metales base	selectividad de partículas	tiempo real	penetra
Gamma Neutrón	activación neutrónica	Metales base y preciosos, minerales industriales	mediciones in situ	minutos	penetra
Infrarojo Cercano	espectroscopía de reflectancia	caracterización mineralógica	mediciones in situ	tiempo real	superficie
Fluorescencia Laser	espectroscopía láser	caracterización mineralógica	mediciones in situ	tiempo real	superficie

Tabla 1: Tecnologías usadas en selectividad de mineral (modificado de Duffy et al, 2015)

Importante notar que, de todas estas tecnologías, la Fluorescencia de Rayos X ha mostrado un avance importante en los últimos años ya que ha entregado buenos resultados de precisión y exactitud comparado con leyes químicas, pero obtenidas en tiempo real. Esto ha permitido que esta tecnología pueda ser vista como un reemplazo al proceso habitual de muestreo en terreno, preparación de muestras, que son intensivas en mano de obra y costo elevado. Su instalación en dispositivos móviles ha abierto la posibilidad de ser usadas en palas, camiones, cargadores, o pistolas manuales, con importantes perspectivas para impulsar la selectividad de mineral.

5. GEOLOGÍA DE COLLAHUASI Y SU POTENCIAL PARA SELECTIVIDAD DE MINERAL

Una variable clave al evaluar el potencial para mejorar la selectividad de mineral en depósitos de cobre es su geología, ya que ésta condiciona la cantidad de dilución que ocurre durante el proceso de extracción en la mina. Depósitos con una gran variabilidad en leyes presentan una gran dilución al momento de ser explotadas. La dilución (tanto planificada, como operacional) es sustancialmente mayor en depósitos que tienen vetas de alta ley, zonas de lastre interno, y una geología compleja, lo cual repercute en que los bordes de los cuerpos minerales son muy irregulares y al momento de la extracción, cantidades importantes de lastre o mineral de baja ley puede ser alimentado debido a la gran escala de la operación (entre 3 y 8% de dilución puede ser estimado en yacimientos de alta variabilidad).

5.1 ASPECTOS RELEVANTES DE LA GEOLOGÍA DE ROSARIO

Rosario es un pórfido de Cu-Mo, perteneciente a la franja de yacimientos de clase mundial del Eoceno superior-Oligoceno (35 Ma) del norte grande de Chile, donde se ubican entre otros Chuquicamata, Escondida, El Salvador, etc. La roca huésped está compuesta de una secuencia de rocas volcánicas ácidas y andesitas, con intercalaciones de rocas sedimentarias, todas pertenecientes a la formación Collahuasi de edad Permo-Triásico. La mineralización primaria, el recurso más importante del yacimiento, está conformada en la periferia de un halo de baja ley de alta pirita y baja calcopirita, incrementando la cantidad de calcopirita hacia el centro lo que se suma a la aparición de núcleos de bornita con digenita, incrementando las leyes de cobre. El molibdeno aparece asociado a estas etapas tempranas, ubicado principalmente al centro del yacimiento. Sobreimpuesto a los sistemas de desarrollo temprano se desarrolla un sistema de vetas tardías de alta ley de cobre asociado también a las altas leyes de arsénico del tipo alta sulfidización.

El Sistema de Fallas Rosario también controla un evento supérgeno que lixivió la parte superior del depósito y generó zonas de enriquecimiento secundario, que no tiene un gran desarrollo como en Ujina. A su vez, los cuerpos de óxidos y mixtos tienen un muy bajo desarrollo, con pequeños cuerpos que aparecen a bajas profundidades respecto a la superficie actual.

El yacimiento Rosario Oeste es un depósito de Cu-(Ag) tipo epitermal de alta sulfidización que se ubica a 1.5 Km al SW del pórfido cuprífero Rosario (Figura 18). La mineralización (32.7 ± 1.6 Ma) corresponde en gran medida a sulfuros de cobre, predominantemente calcosina secundaria, además de bornita, enargita y covelina en menor proporción asociados a pirita, los que se encuentran en vetas, brechas, vetillas, y en menor grado como

diseminación en torno a las estructuras. La mena de cobre de alta ley deriva del enriquecimiento secundario que al igual que la formación de las vetas, se encuentra estrechamente relacionada a una serie de estructuras de rumbo NNW, NS, y NNE, con manteos sub-verticales, dentro de un área de 2 Km de largo por 1 Km de ancho. Al interior del depósito son observables bloques de roca en zonas con escaso fallamiento, donde predomina la alteración propilítica que se considera como lastre en todo el depósito. Se sobrepone a la alteración propilítica y argílica temprana una alteración supérgena dominada por asociaciones de arcillas, que se encuentra directamente relacionada a la lixiviación de la roca de caja y es acompañada por minerales oxidados de Fe, comúnmente goethita o hematitas, con jarosita subordinada.

El Sistema de Fallas Rosario Oeste, controla tanto la alteración como la mineralización. A su vez, los cuerpos de óxidos y mixtos tienen un muy bajo desarrollo, con cuerpos que aparecen a bajas profundidades. El Sistema de Fallas y el emplazamiento de dacitas tobáceas controlan un evento supérgeno que lixivió la parte superior del depósito y generó zonas de enriquecimiento secundario. El arsénico aparece asociado a éstas etapas tardías del emplazamiento epitermal.

Una planta y sección de leyes del modelo es mostrada para notar la variabilidad y su distribución espacial (figura 9).

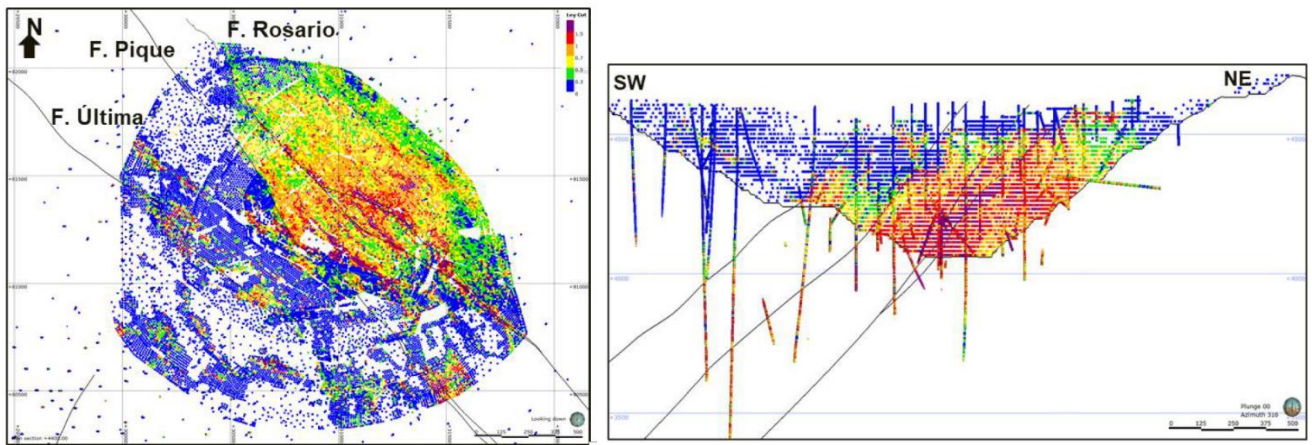


Figura 9: Distribución de leyes de cobre en Rosario (planta y sección NE).

Los recursos minerales declarados lo constituyen en un depósito de clase mundial, que actualmente sustentan el LoM (hasta el año 2088) y los casos de expansión que están en estudio. La estimación de sus recursos es realizada de acuerdo a las normas del código JORC (figura .

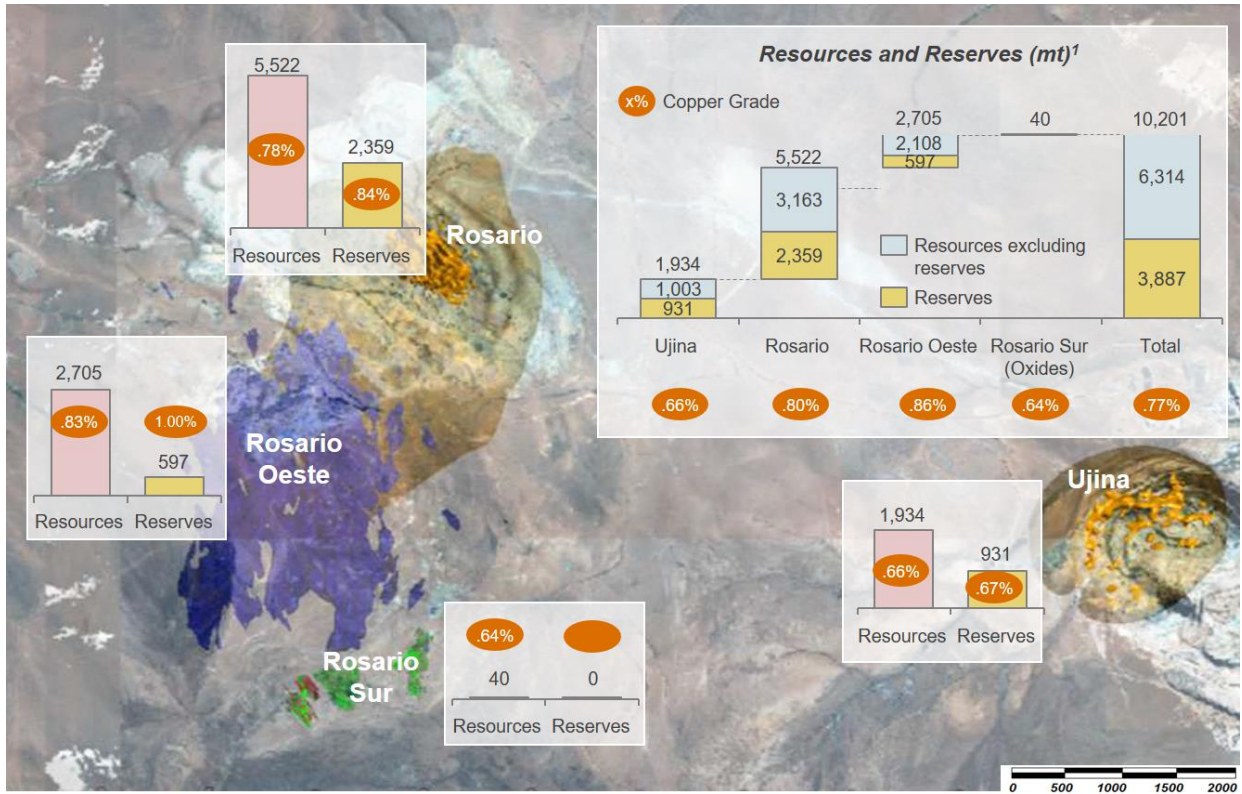


Figura 10: Recursos y Reservas 2020. Collahuasi (2020).

Al observar la información de leyes químicas de Cobre para las distintas unidades de estimación, se aprecia que existe una amplia distribución de leyes, que incluso llega a valores de hasta 20% en datos puntuales. Se observa una diferenciación importante en el dominio de vetas, con un quiebre de leyes en aproximadamente 2%, con una población de más del 15% de los datos en esa condición de alta ley. En las otras unidades de estimación también se observa una amplia distribución de leyes pero con una menor variabilidad (figura 11).

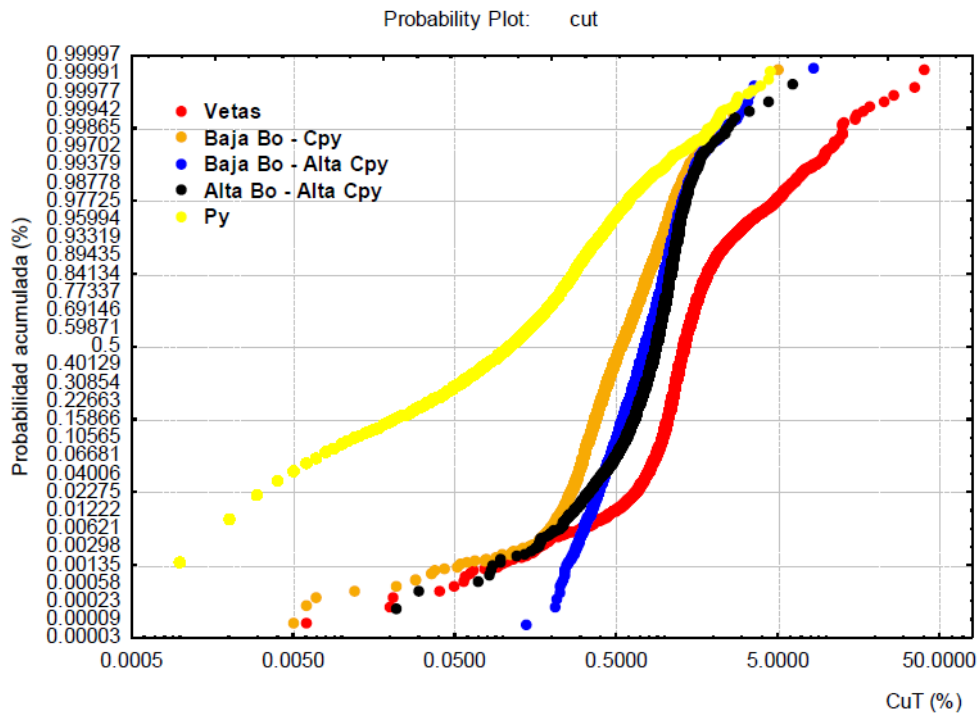


Figura 11: Distribución de leyes químicas de cobre para Rosario. Gráfico probabilístico.

En un gráfico de tonelaje-ley (curva tonelaje-ley) también es posible visualizar las particularidades del depósito Rosario, donde se aprecia que al aumentar la ley de corte, en cada incremento se observa un aumento de la ley media del depósito (figura 12). Esta curva creciente de la ley media es una rareza en este tipo de depósitos (pórfido de cobre) donde usualmente la curva de ley media va decreciendo al aumentar la ley de corte, tendiendo a hacerse plana hacia la derecha, contrario a lo que ocurre en Rosario.

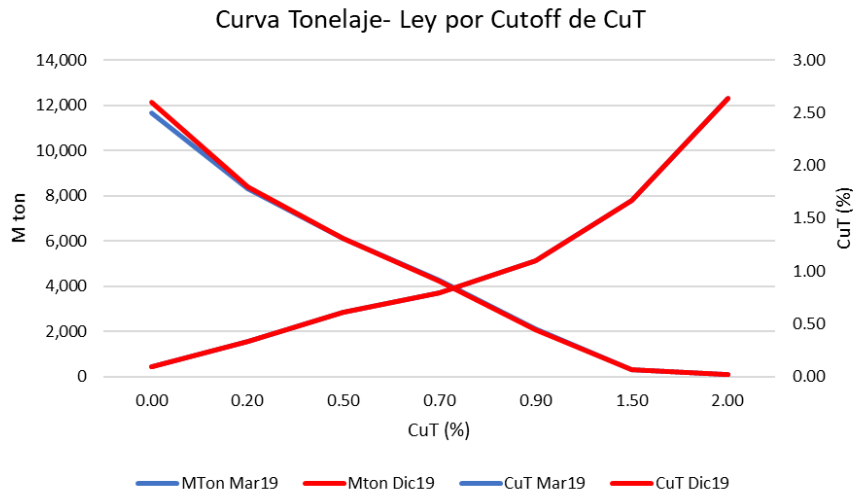


Figura 12: Curva tonelaje ley para el modelo de recursos Rosario.

Geológicamente, este hecho se debe a la existencia de un depósito de alta sulfidización sobreimpuesto al pórfido Rosario, lo cual es una de las particularidades más relevantes en Collahuasi. Esta superposición de un evento tardío que aporta cobre tiene además la particularidad de tener muy altas leyes y una gran variabilidad.

Basado en las características geológicas de Rosario se puede afirmar que el yacimiento tiene características especiales que lo hacen tener una estructura muy compleja, con una alta variabilidad en las leyes de cobre, zonas de lastre interno, y susceptible de tener una alta dilución durante su explotación.

Por lo anteriormente expuesto puede afirmarse que Collahuasi (pórfido Rosario) presenta características particulares que lo hacen **muy favorable para el uso de tecnologías de selectividad.**

6. PARÁMETROS ECONÓMICOS EN CASOS DE NEGOCIO

En los capítulos siguientes serán presentados tres estudios de casos relacionados a temas de **selectividad de mineral** con el fin de dimensionar el tamaño de la oportunidad y evaluar desde el punto de vista estratégico la posibilidad de recomendar o no estudios de Ore Sorting para Collahuasi.

La metodología utilizada en cada uno de los casos está relacionada al impacto que la selectividad de mineral puede tener en la ley de cabeza, es decir en la ley alimentada a la flotación. Los casos elegidos para su evaluación económica son tres:

- **Selectividad mediante uso de sensores de Rayos X en palas.**
- **Selectividad reduciendo la alimentación de "pebbles".**
- **Selectividad mediante segregación granulométrica.**

Conceptualmente, en todos los casos, la resultante es un aumento en la ley de cabeza, ya que mineral de baja ley es reemplazado por mineral de más alta ley, lo cual significa un aumento en el cobre fino producido. En cada uno de los casos el valor económico es calculado como el VAN (Valor Actual Neto) del cobre fino agregado, utilizando para ellos los valores referenciales de costos de procesamiento, comercialización, entre otros.

Los valores utilizados para cada caso fueron los siguientes:

Valores Unitarios	precio	Unidad
precio Cu	3	usd/lb
tc	80,8	usd/ton
rc	8,08	cusd/lb pay
costo var	4	USD/ton feed
costo flete	50	usd/ton
ley de concentrado	27,5	%

Tabla 2: Tecnologías usadas en selectividad de mineral
(modificado de Duffy et al, 2015)

En cada uno de los casos fue calculado el aumento de cobre fino producido, utilizando los parámetros del Caso Base actual del LoM de Collahuasi, que considera la expansión a 210 Ktpd a partir del año 2024. Bajo estas consideraciones el NPV es calculado para el período comprendido entre el año 2021 hasta el fin del LoM (toda la vida de la mina), y utilizando una tasa de descuento de 8%, que corresponde al estándar tanto de Collahuasi como de la industria minera.

En el capítulo 7 se detallan los supuestos técnicos de cada caso y la forma como fue construido el caso.

7. CASOS DE NEGOCIO COLLAHUASI

Se presentan a continuación tres casos de negocio relacionados a selectividad de mineral, los cuales son abordados utilizando diferentes metodologías de evaluación, ya que los niveles de información son diferentes. Por lo tanto, los niveles de confianza de la información son diferentes en cada caso. Los temas escogidos para ser evaluados son los siguientes:

- 1. Selectividad mediante uso de sensores de Rayos X en palas.**
 - a. El tema es desarrollado mediante simulaciones de distribución de leyes usando información real de pozos de tronadura.
- 2. Selectividad reduciendo la alimentación de "pebbles".**
 - a. El proyecto se evaluó en base a la hipótesis que los pebbles tienen una ley más baja que la media de alimentación. Esta hipótesis está sustentada en datos colectados durante mayo 2015 con muestreos sistemáticos de pebbles.
- 3. Selectividad mediante segregación granulométrica.**
 - a. Este proyecto tiene un nivel de confianza más bajo y se basa en información de Test de Heterogeneidad Rosario que muestra una concentración de leyes altas en granulometrías más finas.

La finalidad del análisis de cada uno de los casos de negocio es identificar el tamaño de la oportunidad. Los datos pueden ser depurados con un mayor análisis en etapas avanzadas, con estudios de ingeniería, distintos escenarios, sensibilizaciones por precios, entre otros análisis, a fin de robustecer la información.

El objetivo de los análisis presentados en esta tesis es tener una mirada de alto nivel que permita identificar si existe o no una oportunidad de negocio para Collahuasi en Ore Sorting, y a partir de ahí construir recomendaciones con una mirada estratégica.

7.1 SELECTIVIDAD MEDIANTE USO DE SENSORES DE RAYOS X EN PALAS

Las tecnologías disponibles revisadas en el capítulo anterior han ido siendo adaptadas a distintas problemáticas, especialmente relacionado a tener información en línea que permita tomar decisiones en el momento (tiempo real).

Dentro de las tecnologías que llevan la vanguardia en desarrollo de aplicaciones está la **Fluorescencia de Rayos X**, que como hemos mencionado tiene una gran variedad de métodos de ser aplicada ya que ha mostrado confiabilidad, precisión, exactitud, y sobretodo una capacidad y versatilidad para ser instalados en dispositivos estáticos o móviles, grandes o pequeños, según sea el requerimiento. Además han mostrado una gama amplia de elementos químicos que pueden ser medidos con niveles de resolución de entre 1 a 10 ppm, lo cual para la gran minería del cobre representa una oportunidad importante ya que las leyes de cabeza suelen estar entorno a 0,5 a 1% en peso (equivalente a 5.000 a 10.000 ppm).

Para obtener un dato a partir de un dispositivo de Fluorescencia de Rayos X (FRX) el tiempo necesario usualmente fluctúa entre pocos segundos hasta un par de minutos por cada lectura. Cuando son utilizados varios dispositivos simultáneamente podría considerarse que las lecturas son obtenidas en tiempo real. Esta es otra de las ventajas de esta metodología ya que en faenas mineras donde existe una serie de puntos potenciales para controlar la ley del mineral, cualquier adaptación nos va a entregar un valioso dato en tiempo real que antes no disponíamos de él.

Collahuasi, como parte de su estrategia de negocio en su actual etapa de crecimiento ha impulsado la identificación de algunas de estas tecnologías para ser evaluadas en faena y considerar su aplicabilidad a etapa industrial. Con este propósito fueron contactados los principales oferentes de este tipo de tecnologías identificándose a la empresa **MineSense**, que tiene alianzas con algunas de las más importantes empresas mineras del mundo (BHP, Anglo American, Glencore, Teck, etc), las cuales han estado probando la tecnología en algunas de sus operaciones. Esta empresa ofrece el dispositivo **Shovel Sense** que se instala en todos los equipos móviles que se utilizan normalmente en terreno: palas de cable, cargadores frontales, excavadoras y palas.

Según el proveedor, el sistema está diseñado para condiciones ambientales extremas para que pueda adaptarse fácilmente a cualquier equipo móvil existente; se puede instalar y mantener durante los programas regulares de mantenimiento de la mina. El sistema viene equipado con una HMI (interfaz hombre-máquina) que proporciona al operador información completa, incluido el tipo de mineral, dentro de cada ciclo de excavación. El sistema también

puede conectarse directamente a la gestión de flotas u otros sistemas de software de control existentes. La aplicación principal de ShovelSense es en el frente de carguío, a rajo abierto o en el punto de carga en una mina subterránea. Es igualmente eficaz trabajar en stocks y en zonas de mezclas donde se utilizan equipos móviles.

7.1.1 Shovel Sense

La tecnología opera mediante la instalación de sensores FRX que permiten medir la ley en cada una de las baldadas de una pala (figura 13), mejorando la asignación de destino de materiales ROM, con un consecuente aumento en la ley alimentada a la planta.

La tecnología permite cuantificar elementos como Cu, Fe, Mo y As, entregando como upside un mejor control del arsénico, razón Fe/Cu, y dilución, en los minerales alimentados a planta.

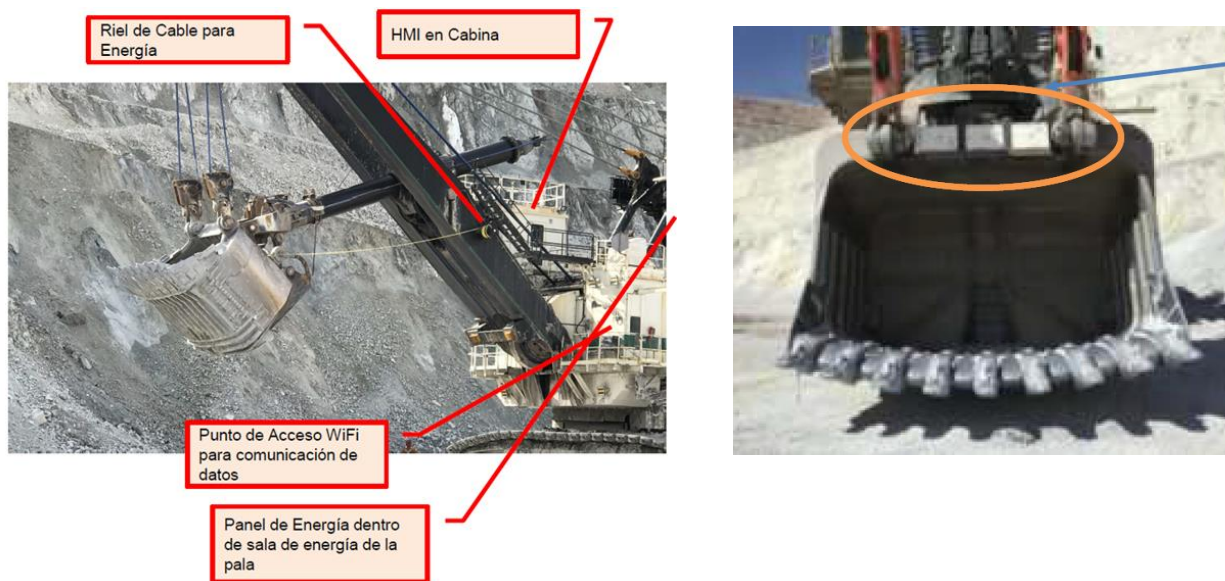


Figura 13: Esquema de Instalación de Shovel Sense en pala.

7.1.2 Características de la tecnología Shovel Sense

- Transformación del proceso, considera la incorporación de sensores en palas
- Tecnología se encuentra en etapa Operacional en Canadá (Mina Highland Valley Copper [Teck, 2 palas CAT 7495 y P&H 2800] & Copper Mountain, Hitachi EX5600, 50 Ton)
- Tecnología en pruebas industriales:
 - Antamina (P&H XPC4100)
 - Escondida (CAT 7495)
 - Carmen de Andacollo (CAT 994)
- Capacidad de ser instalada en cualquier equipo de carguío, de diferente tamaños (palas, cargadores frontales, u otros) (figura 14).

7.1.3 Aspectos Operacionales de la tecnología Shovel Sense

- No hay cambios en la forma de operar la pala con esta tecnología, ni distrae al operador.
- El vendor de la pala no objeta la instalación de la tecnología (piloto y operación), participa en mantenencias e instalación.
- No se cambia el plan matriz, ni se ve afectado en los tiempos de mantenimiento. Se hace coincidir con mantenimiento de pala.
- No existe afectación en el rendimiento de la pala con esta tecnología.
- La tecnología permite medición de Cu, Mo, Fe y As entre otros (generando la posibilidad de alerta por cualquiera de estos elementos)
- No hay interacción del operador con el sistema en su operación.

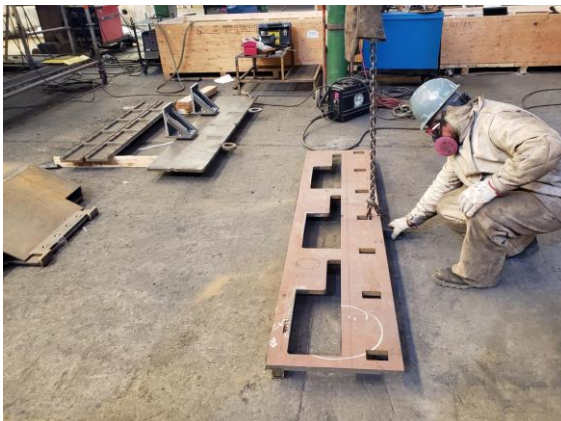


Figura 14: Esquema de Instalación de Shovel Sense en pala.

7.1.4 Confección del caso de negocio

El caso de negocio ha sido construido basado en el concepto de *mejorar la selectividad de mineral*, lo cual va a significar que materiales que son lastre y que previamente iban a chancado, ahora puedan ser sacados de la alimentación y ser enviados a botadero. Minerales que previamente eran enviados a botadero o stocks, en el caso de estudio serían enviados al chancado. De esta manera se mantienen los mismos tonelajes de mineral procesado y la mejor clasificación va a significar un aumento en la ley de cabeza.

La clasificación de minerales está relacionada a dos aspectos fundamentales:

- **Unidad mínima de selectividad (SMU):** Usualmente en la gran minería del cobre lo que gobierna el proceso de la extracción mina es el tonelaje, relacionado a las características de los equipos de carguío y transporte, que han ido migrando permanentemente al gigantismo.
- **Información obtenida de leyes en pozos de tronadura:** Durante la explotación de un yacimiento la información de mayor detalle con que se cuenta para decidir el destino de los minerales extraídos es la ley de pozos de tronadura (usualmente espaciados entre 8-10 m, con un largo de la altura de banco, es decir 15 m). Las leyes medidas en pozos de tronadura son llevadas a un modelo de bloques de dimensiones 10*10*15 metros, que para una densidad promedio de 2,5 gr/cm³ representan 3.750 toneladas.

El proceso geológico de definición de destino de minerales se adapta a las dimensiones de los equipos de carguío con una unidad mínima de selección de 2 a 4 bloques dependiendo de la información disponible, es decir, para la gran minería del cobre, la mínima selectividad está entre 7.500 y 15.000 toneladas.

La instalación de un dispositivo en las palas que permita medir la ley de cobre en tiempo real podría permitir llevar la unidad mínima de selectividad al tonelaje de la unidad mínima de transporte, es decir, aproximadamente 300 toneladas (entre 25 y 50 veces mejor resolución).

Para estimar el beneficio de una mejor clasificación se realizó una metodología de simulación con apoyo de empresa MineSense (Minesense, 2020) consistente en los siguientes pasos:

- Simulación de la variabilidad llevando la escala actual del modelo de bloques (10*10*15) (ejemplo en figura 15), a un modelo de tamaño similar a la capacidad de un camión, es decir con bloques de 5*5*5 metros. Cada bloque debiera representar aproximadamente 312 toneladas.
- Se tomó una ventana de tiempo de 8 meses entre enero 2020 y agosto 2020, como un caso real, en el cual se midieron las leyes de pozos de tronadura con la metodología habitual (muestreo + preparación mecánica + análisis químico, total aproximado 30.000 pozos de tronadura).
- La distribución real de leyes en pozos de tronadura fue simulada en los bloques de 5*5*5 m de manera separada entre según los dominios geológicos en los cuales se realiza el análisis.
- Se separaron dos dominios: veta y pórfido, con poblaciones de datos diferentes.

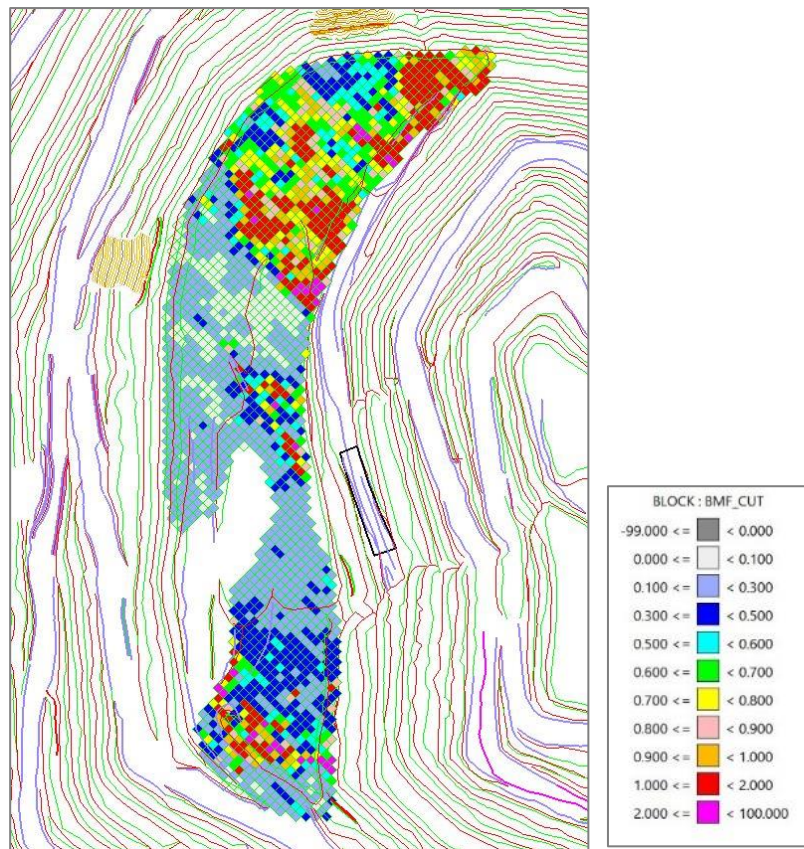


Figura 15: Modelo de bloques Corto Plazo (10*10*15), muestra una alta variabilidad de leyes (CuT).

La simulación lleva pasar de un modelo 10*10*15 a un modelo 5*5*5, visualizándose de la siguiente manera (figuras 16 y 17):

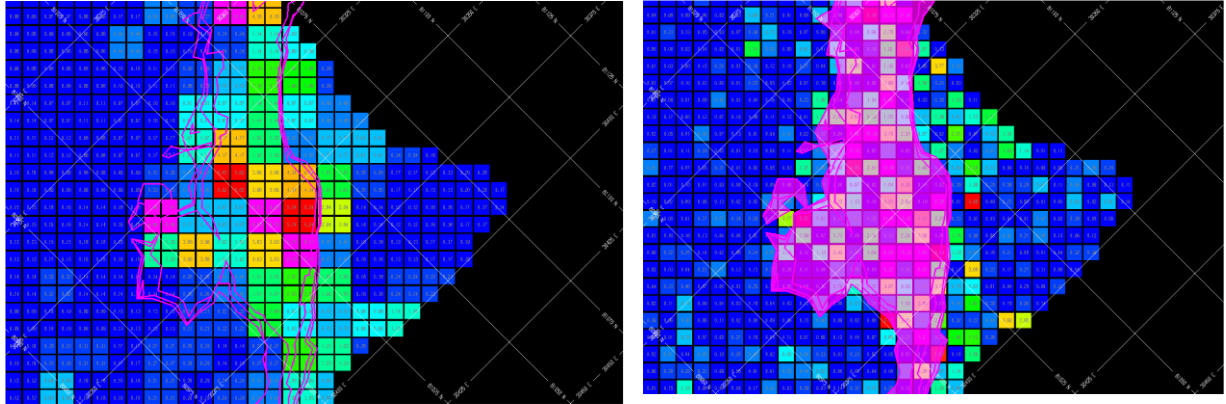


Figura 16: A la izquierda el modelo de bloques original (10*10), a la derecha el modelo rebloqueado (5*5) y simulado usando leyes reales de pozos de tronadura. En magenta el sólido de vetas.

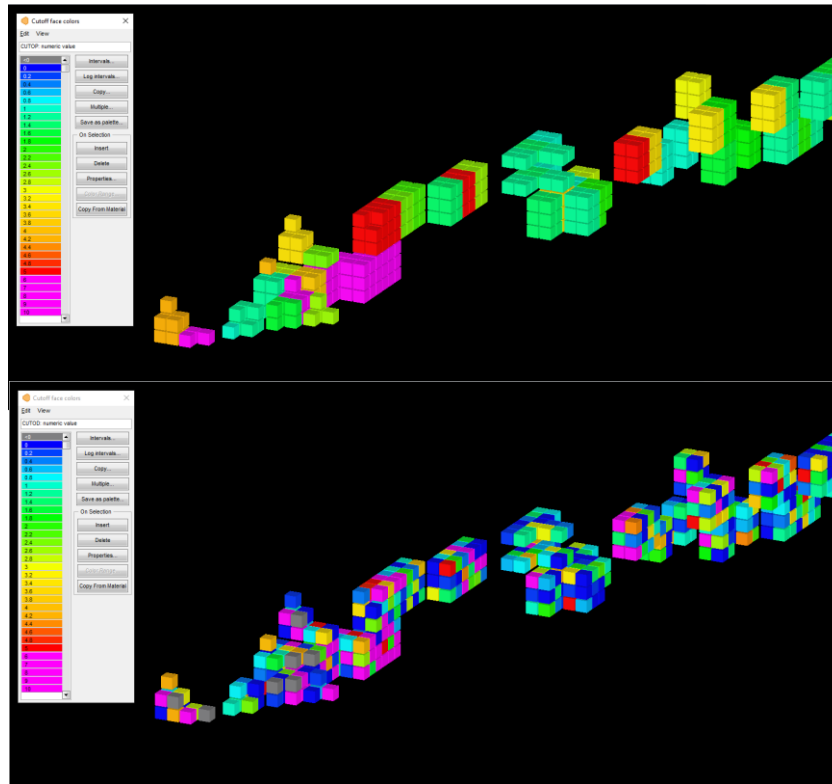


Figura 17: Arriba se observa en 3D el modelo original de la zona de mineral, y abajo el modelo rebloqueado y simulado a 5*5*5 m.

En las figuras 16 y 17 puede observarse que se genera una gran variabilidad a bloques de tamaño 5*5*5, los cuales podrían ser clasificados a

escala de un camión. La separación lastre mineral puede realizarse durante la operación eliminando el lastre que ingresa a chancado e incorporando el mineral que es enviado a botadero o stocks.

Al aplicar el destino de mineral se observa que existe una proporción similar al modelo no simulado, lo que da cuenta que se mantienen las mismas zonas de mineral, sin generar sesgo en la simulación (figura 18).

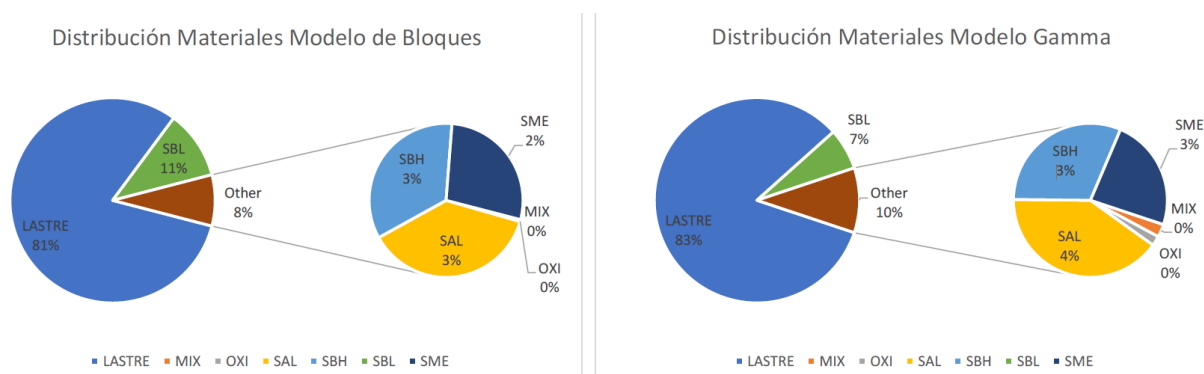


Figura 18: Comparación destino de materiales antes (izquierda, caso real) y después de la simulación (derecha).

A partir del modelo simulado se cubicaron los minerales reclasificados. Con estos resultados se realizó una comparación entre los dominios tanto veta como pórfido para los 8 meses enero-agosto 2020 obteniéndose que la reclasificación habría entregado aumento de cobre fino puesto en el Chancado por cada millón de toneladas alimentadas, en las siguientes proporciones:

Dominio	Cu Fino Add
Vetas	1.200
Pórfido	58

Tabla 3: Resultados de la simulación en CuFino agregado por año, normalizado para un año estándar en Collahuasi.

Los resultados muestran que, en las zonas de vetas, dada su importante variabilidad y heterogeneidad es donde más valor se agrega el uso de esta tecnología.

7.1.5 Evaluación económica caso de negocio

Posterior al análisis del cobre fino agregado por dominio geológico y por año a lo largo de toda la vida de la mina, se realizó el cálculo de NPV

utilizando los parámetros económicos del capítulo precedente. Los gastos Opex y Capex fueron obtenidos a partir de la información proporcionada por la empresa MineSense quienes ofrecen la tecnología.

Inputs críticos utilizados (tabla 4):

Item	MUS\$
Capex	8
Opex Anual	8
Sensores	4 sensores

Tabla 4: Resumen de inputs.

Los resultados muestran un incremento en cobre fino producido, en la medida en que se incrementa la proporción de vetas, con el ingreso de Rosario Oeste en el plan minero. El NPV obtenido para este ejercicio de simulación es de 1.302 MUS\$ (tabla 5).

UGM Alimentación Planta	NPV (8%)	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
UGM1		13.469.066	6.680.912	7.171.743	11.377.502	12.432.789	6.406.199	15.242.712	9.154.548
UGM2		4.084.607	2.926.446	9.573.955	5.752.813	5.237.909	4.459.333	2.305.586	4.804.224
UGM3		19.182.687	17.358.398	16.889.703	20.617.929	38.601.207	25.870.950	34.388.041	28.978.738
UGM4		12.831.335	26.332.453	16.304.419	8.252.006	8.510.853	3.349.520	9.309.587	2.821.856
UGM5		2.031.007	2.150.539	3.822.431	7.621.953	3.789.966	14.615.694	6.040.935	8.768.150
UGM6		1.312.546	1.358.291	2.673.210	7.089.237	2.681.483	8.549.412	2.153.739	1.526.344
UGM22		-	445	221.693	828.527	3.419.714	8.118.318	2.870.259	19.255.009
UGM23		-	5.213	734	325.658	392.984	5.511.745	4.640.739	2.166.050
Total Porfido (ton)		52.911.248	56.807.038	56.435.462	60.711.440	71.254.206	63.251.107	69.440.601	56.053.859
Total Vetos (ton)		-	5.658	222.427	1.154.185	3.812.699	13.630.063	7.510.998	21.421.059
Aumento CuFino Porfido (ton)		3.069	3.295	3.273	3.521	4.133	3.669	4.028	3.251
Aumento CuFino Vetos (ton)		-	7	267	1.385	4.575	16.356	9.013	25.705
Total Aumento CuFino (ton)		3.069	3.302	3.540	4.906	8.708	20.025	13.041	28.956
Recuperación		89%	88%	88%	88%	88%	85%	86%	85%
Total Aumento CuFinoRec (ton)		2.727	2.909	3.126	4.332	7.668	16.950	11.261	24.627
Ingreso (I) (MUS\$)	1.408.589.948	18.034.626	19.238.722	20.674.789	28.650.831	50.717.271	112.106.506	74.476.741	162.880.239
Costos Opex (US\$)		8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000
Costos Capex (US\$)		8.000.000							
Total Costos (II) (US\$)	107.039.129	16.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000
Beneficio Total (I - II) (US\$)	1.301.550.819	2.034.626	11.238.722	12.674.789	20.650.831	42.717.271	104.106.506	66.476.741	154.880.239

Tabla 5: Cálculos de cobre fino agregado, y NPV.

A pesar de estos resultados que pueden parecer muy alentadores, es importante apreciar que es un ejercicio teórico, cuyo principal obstáculo es que las prácticas operacionales impedirían hoy en día una escala de selectividad a nivel de un camión, ya que existe un input relevante en la minería actual cual es la altura de banco, que en general para la gran minería del cobre fluctúa entorno a un estándar a 15 metros de altura. Modificar esta condición fundamental de la minería a gran escala no es posible hoy, por tanto, para calcular un valor realista del caso se estima que la unidad mínima de selección permitiría capturar un cuarto del valor del proyecto.

No hay posibilidades de que ese número pudiera ser calculado, pero un cuarto parece ser una estimación adecuada comprendiendo las condiciones de operación de una pala en la frente de carguío. Esto nos lleva a que el NPV del proyecto asociado a las condiciones actuales de operación y bajo los supuestos de este ejercicio sería de **326 MUS\$**.

La TIR del proyecto (tasa interna de retorno) fue calculada pero por tratarse de un proyecto de bajo Capex y uso de stocks tiene un valor muy alto no representativo de la rentabilidad. Otros indicadores financieros no fueron calculados por el mismo motivo.

Eventuales upsides del proyecto, no considerados

- Aumento de stocks de ley media: El ejercicio arrojó que, además del aumento en la ley de cabeza, se generan al año aproximadamente 1 Mt de 0,78% de Cu como stocks, los cuales por la selectividad y capacidad limitada de la planta no entrarían a proceso, pero sí formarían parte del inventario de reservas mineras, que pueden competir en años sucesivos con los stocks existentes.
- Mejoras en recuperación: Usualmente se ha observado que las mejores leyes están asociadas a condiciones mineralógicas particulares que favorecen aumentos en la recuperación de cobre.

7.2 SELECTIVIDAD REDUCIENDO ALIMENTACIÓN DE PEBBLES

Collahuasi tiene actualmente una planta de chancado de Pebbles que permite procesar (chancar) aproximadamente 3,5 Mt al año, que representan entre el 6 y 8% del total de la alimentación planta. El costo anual de operación de esta planta fluctúa entre 8 y 10 MUS\$ anuales, considerando la operación y mantenciones relacionadas a su plan matriz (figura 19).

Como se explicó en los capítulos introductorios, como parte del proyecto de ampliación de la capacidad de la Planta Concentradora para llevarla a 210 Ktpd, se ha considerado la ampliación de la planta de Pebbles, considerando que el aumento de tratamiento va a generar un incremento en los pebbles generados. El Capex estimado para la ampliación de la planta de pebbles es aproximadamente 31 MUS\$ el cual debe ser ejecutado a partir del año 2022.



Figura 19: Izquierda: Situación actual planta Pebbles. Derecha: fotografía referencial de pebbles (Autentika.cl)

7.2.1 Caracterización Geológica de los pebbles

El año 2015 el equipo de geología de Collahuasi muestreó durante 1 mes muestras representativas de pebbles que son generados en los molinos SAG.

Las muestras colectadas fueron analizadas por CuT y otros elementos, además de ser realizada una caracterización geológica de los mismos, y comparada con la procedencia de los materiales alimentados.

Respecto al análisis de la geología, se obtuvo que las muestras generadas representan todo el espectro geológico del mineral alimentado, sin evidencias estadísticas de un sesgo o una característica preferencial en la generación de pebbles (figura 20).

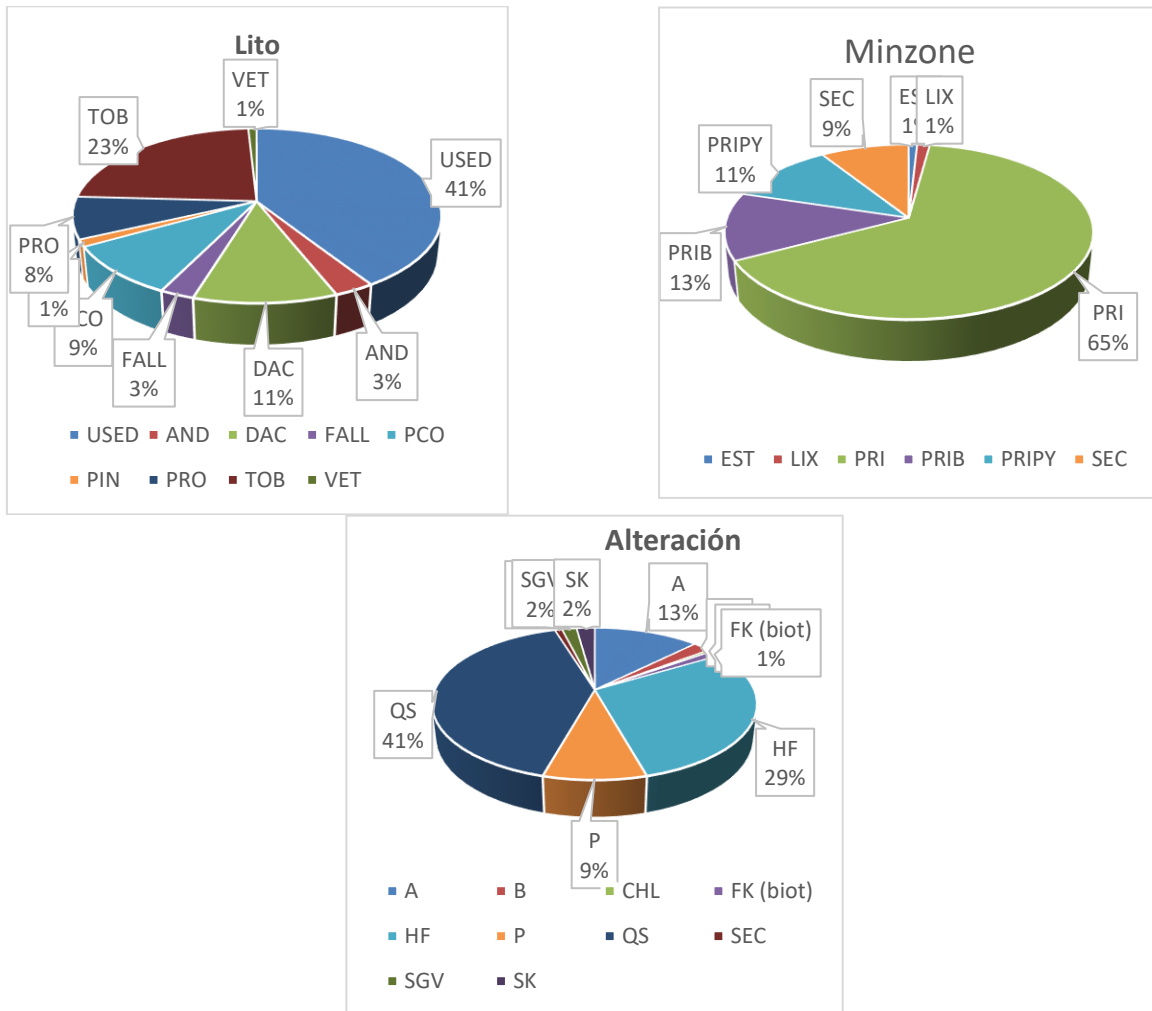


Figura 20: Gráficos de caracterización geológica de pebbles. Arriba izquierda Litología. Arriba derecha, zona mineral. Abajo Alteración.

La caracterización geológica fue realizada mediante mapeo muestra a muestra las cuales utilizaron los protocolos y nomenclatura existentes. Los datos muestran que no existen condiciones geológicas particulares respecto al mineral alimentado, no obstante, destacan las

unidades USED (roca sedimentaria) y la alteración cuarzo sericítica (QS), que, aunque estadísticamente no representan una correlación clara, merecen ser investigadas en una futura etapa de mayor detalle de esta investigación.

Al analizar las muestras desde el punto de vista de la ley de cobre, un hallazgo importante es que **la ley media de las muestras de pebbles es significativamente inferior a la media de la ley alimentada** (figura 21).

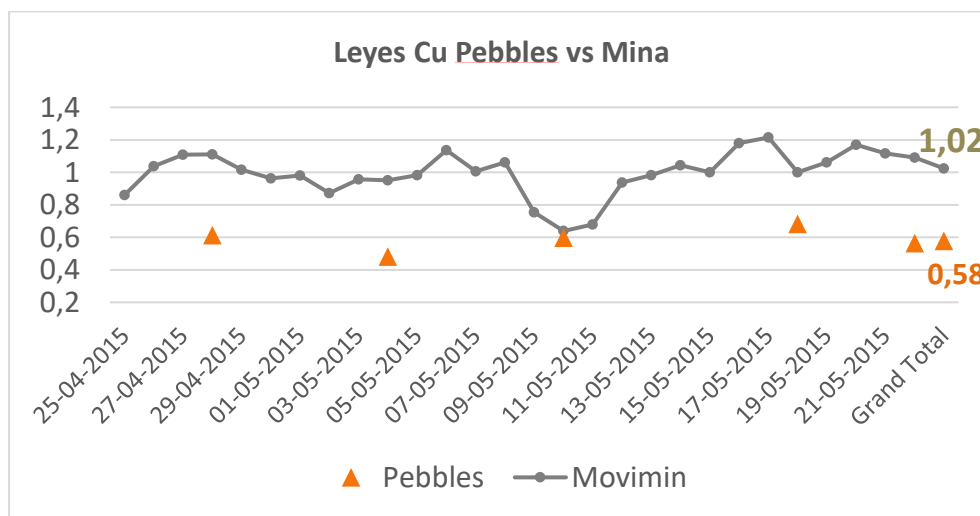


Figura 21: Comparación ley media alimentada vs Ley pebbles

Al realizar una comparación uno a uno identificando los minerales que entraron a los molinos SAG en el período de análisis pudo obtenerse una correlación prácticamente lineal en la cual la ley de los pebbles es aproximadamente 0,55 veces la ley media alimentada (figura 22). Bajo estos parámetros se estima que a lo largo del tiempo la mayor parte de los pebbles alimentados ha estado bajo la ley de corte operacional, aunque siempre sobre la ley de corte break even (ley de corte marginal).

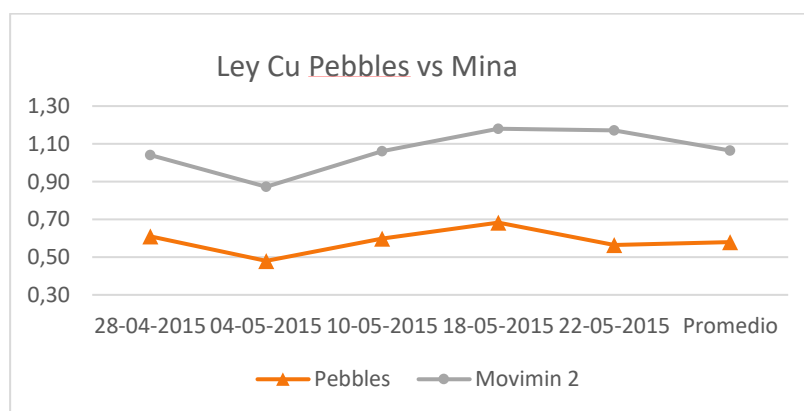


Figura 22: Ley de Pebbles vs Ley Mina

Los hallazgos realizados por el equipo de geología el año 2015 al analizar tanto la geología como las leyes químicas de los pebbles permiten adelantar una hipótesis relevante para los temas de Selectividad de Mineral:

Los pebbles generados en los molinos SAG para minerales que provienen de Rosario tienen leyes más bajas que la media del mineral, lo cual representa una fuente espontánea de selectividad de mineral en el SAG, que es necesario investigar en nuestro proceso, y poner en valor.

No existen muestreos sistemáticos de pebbles en Collahuasi, algo que debe incorporarse en los próximos meses.

7.2.2 Confección caso de negocio

La construcción de este caso de negocio tiene la misma lógica que el caso anterior, donde un mineral de baja ley es reemplazado por mineral de más alta ley, manteniendo constante los tonelajes de procesamiento.

Fueron generados dos escenarios posibles para confeccionar el caso:

- Escenario 1: eliminación de la Planta de Pebbles, reemplazando el mineral por stocks disponibles.
- Escenario 2: eliminación de la Planta de Pebbles, reemplazando el mineral por stocks generados por Proyecto Sensores en Palas (sinergia entre ambos proyectos).

Escenario 1 (E1): eliminación de la Planta de Pebbles, reemplazando el mineral por stocks disponibles.

Consideraciones y datos principales del caso:

- Pebbles son reemplazados por mineral desde stocks disponibles en el largo plazo.
- Se calcula el beneficio económico asociado a los pebbles, y se compara con el beneficio económico al ser reemplazado el mineral por mineral desde los stocks disponibles en el LP.
- Se consideran ahorros operacionales por la detención del funcionamiento de la planta (ahorro OPEX, datos del LoM).

- Se considera generación de un stock de pebbles para todo el LoM, ubicado en Ujina, validado por área de Medio Ambiente.
- Se considera agregar costo OPEX para transporte de Pebbles desde los molinos SAG hasta el stock de pebbles.
- Se considera ahorro de CAPEX relacionado a no construir la ampliación de la planta (31 MUS\$).
- Se utiliza Budget 2020 (período 2021-2025), y LoM.
- Se utiliza hipótesis que la ley de pebbles es 0,55 veces la ley de cabeza.
- Proyecto es evaluado a partir del año 2022 hasta el fin del LoM.
- La recuperación metalúrgica al usar stocks de largo plazo es castigada según criterios plan LoM.
- No se han considerado costos asociados a aumento del remanejo en la mina ya que son mitigables con una planificación adecuada del diseño de stocks.

Resultados

Bajo los parámetros del enunciado, el proyecto tiene un NPV positivo de **136 MUS\$**, relacionado principalmente a un aumento en la ley de cabeza de los minerales reemplazados.

En la tabla adjunta se muestran los resultados para los primeros 5 años del ejercicio, sin embargo, el cálculo del NPV considera la vida del LoM completa. Es importante volver a recalcar que el ejercicio se basa en la hipótesis fundamental que la ley de los pebbles es más baja que la ley media alimentada. Será muy importante durante el año 2021 comprobar esta hipótesis con muestreos sistemáticos que podría sustentar un caso de negocio más robusto y que permita tomar la decisión de ampliar o eliminar la actual planta de Pebbles.

		2022	2023	2024	2025	2026
CASO	Item	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Caso Base (Con Pebbles)	Tonelaje Seleccionado	3.700.000	3.700.000	3.700.000	5.358.621	5.358.621
	Mineral a Planta [t]	56.812.696	56.657.889	61.865.625	75.066.905	76.650.000
	Ley CuT Mineral [%]	1,06	1,14	1,11	1,05	1,05
	Ley Cu Pebbles	0,58%	0,63%	0,61%	0,58%	0,58%
	Rec	88%	88%	88%	88%	87%
	cu ton	19.060	20.478	19.956	27.194	26.824
	ingreso	101.530.005	109.081.899	106.305.218	144.859.292	142.891.266
	costo procesamiento	14.800.000	14.800.000	14.800.000	21.434.483	21.434.483
	costo tratamiento	6.153.980	6.611.718	6.443.417	8.780.273	8.660.986,24
	costo refinamiento	3.281.450	3.525.527	3.435.785	4.681.852	4.618.246
	costo flete	3.808.156	4.091.410	3.987.263	5.433.337	5.359.521
	Utilidad del Mineral	73.486.420	80.053.243	77.638.753	104.529.347	102.818.030
	Costo Operación (OPEX)	9.557.695	9.557.695	9.557.695	9.557.695	13.842.179
	CAPEX Ampliación Planta Caso 210 Ktpd				30.588.661	
CASH FLOW (I)	63.928.725	70.495.548	68.081.058	64.382.991	88.975.851	
Caso Sin Pebbles	Tonelaje	3.700.000	3.700.000	3.700.000	5.358.621	5.358.621
		0,57%	0,57%	0,57%	0,56%	0,56%
	Ley Cu reemplazo	0,68%	0,69%	0,68%	0,67%	0,67%
	Rec	76%	76%	76%	76%	76%
	cu ton	19.213	19.383	19.121	27.335	27.165
	ingreso	102.346.638	103.253.083	101.857.125	145.609.898	144.705.170
	costo procesamiento	14.800.000	14.800.000	14.800.000	21.434.483	21.434.483
	costo tratamiento	6.203.477,96	6.258.419,83	6.173.807,41	8.825.769,15	8.770.931,39
	costo refinamiento	3.307.843	3.337.140	3.292.022	4.706.112	4.676.871
	costo flete	3.838.786	3.872.785	3.820.425	5.461.491	5.427.557
	CAPEX Ampliación Planta Caso 210 Ktpd					
	Utilidad del Mineral	74.196.530	74.984.739	73.770.870	105.182.044	104.395.329
	Costo Operación	5.800.000	5.800.000	5.800.000	5.800.000	8.400.000
	CASH FLOW (II)	68.396.530	69.184.739	67.970.870	99.382.044	95.995.329
DIFERENCIA DE CASH FLOW (II-I)	4.467.805	-1.310.809	-110.188	34.999.053	7.019.478	
NPV	135.877.642	US\$				

Tabla 6: Evaluación económica del Escenario 1.

La TIR no fue calculada por tratarse de un proyecto sin Capex (salvo eventuales estudios de ingeniería), por tanto, va a tender a infinito, no representativo de la rentabilidad, y difícil de usar como indicador para comparar proyectos. Otros indicadores financieros no fueron calculados por el mismo motivo.

Escenario 2 (E2): eliminación de la Planta de Pebbles, reemplazando el mineral por stocks disponibles y stocks que se generan en el Proyecto de Sensores en Palas.

En la búsqueda de oportunidades para mejorar el caso de negocio de la eliminación de la planta de chancado de pebbles se ha visualizado la oportunidad de hacer sinergia con el caso anterior de Sensores en Palas. El análisis de los resultados del primer caso muestra que la reclasificación de minerales al utilizar sensores de Rayos X genera mineral excedente que no es posible de enviar a chancado porque la capacidad de procesamiento planta es limitada. Este mineral debiera ser enviado a stocks de mineral, y no formó parte del caso de negocios expuesto.

Como se expuso en el caso de Sensores en Palas, la estimación del mineral que se enviaría a stocks en el período analizado es aproximadamente 1 Mt @ 0,78% CuT. Esto permitiría mejorar el caso reemplazando parte del mineral de stocks de LP por este mineral, en un caso donde ambos proyectos estén operando (Sensores en Palas + Reemplazo de Pebbles). Un segundo upside además del aumento de la ley sería el aumento de recuperación metalúrgica, ya que los stocks transicionales (que se alimentan durante el mismo año en que son generados) conservan sus propiedades metalúrgicas, a diferencia de los stocks de largo plazo lo cuales se degradan, con la consecuente baja en la recuperación.

Bajo estas premisas las consideraciones y datos principales del escenario 2 son las siguientes:

- Pebbles son reemplazados por mineral desde stocks.
- La proveniencia del mineral tiene dos fuentes: stocks LP y stocks generados por el proyecto Sensores en Palas.
- Se calcula el beneficio económico asociado al escenario actual de pebbles, y se compara con el beneficio económico al ser reemplazado el mineral.
- Se consideran ahorros operacionales por la detención del funcionamiento de la planta (ahorro OPEX, datos del LoM).
- Se considera generación de un stock de pebbles para todo el LoM, ubicado en Ujina, validado por área de Medio Ambiente.
- Se considera agregar costo OPEX para transporte de Pebbles desde los molinos SAG hasta el stock de pebbles.
- Se considera ahorro de CAPEX relacionado a no construir la ampliación de la planta (31 MUS\$).
- Se utiliza Budget 2020 (período 2021-2025), y LoM.

- Se utiliza hipótesis que la ley de pebbles es 0,55 veces la ley de cabeza.
- Proyecto es evaluado a partir del año 2022 hasta el fin del LoM.
- La recuperación metalúrgica al usar stocks de largo plazo es castigada según criterios plan LoM.
- La recuperación metalúrgica de los minerales provenientes de stocks del Proyecto Sensores en Palas, conservan los datos que provienen del modelo metalúrgico.
- No se han considerado costos asociados a aumento del remanejo en la mina ya que son mitigables con una planificación adecuada del diseño de stocks.

Resultados

Bajo los parámetros del enunciado, el proyecto tiene un NPV positivo de **394 MUS\$**, relacionado principalmente a un aumento en la ley de cabeza de los minerales reemplazados.

En la tabla adjunta se muestran los resultados para los primeros 5 años del ejercicio, sin embargo, el cálculo del NPV considera la vida del LoM completa.

El importante incremento de la sinergia entre ambos proyectos de selectividad muestra que la problemática debiera ser abordada de manera integral, ya que existen oportunidades en distintos puntos desde el proceso mina y planta, donde pueden ser capturadas mejoras incrementales de valor.

A modo de resumen puede concluirse que para el caso de Eliminación de la Planta de Chancado de Pebbles en ambos escenarios el NPV es positivo y muestra aumentos de valor significativos, lo cual debe ser refrendado por más análisis de leyes de pebbles para confirmar la hipótesis que origina el proyecto, en que el SAG actúa como un selector natural de leyes durante el proceso de molienda.

		2022	2023	2024	2025	2026
ITEM		año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Caso Base (Con Pebbles)	Tonelaje Seleccionado	3.700.000	3.700.000	3.700.000	5.358.621	5.358.621
	Mineral a Planta [t]	56.812.696	56.657.889	61.865.625	75.066.905	76.650.000
	Ley CuT Mineral [%]	1,06	1,14	1,11	1,05	1,05
	Ley Cu Pebbles	0,58%	0,63%	0,61%	0,58%	0,58%
	Rec	88%	88%	88%	88%	87%
	cu ton	19.060	20.478	19.956	27.194	26.824
	ingreso	121.836.007	130.898.278	127.566.261	173.831.151	171.469.519
	costo procesamiento	14.800.000	14.800.000	14.800.000	21.434.483	21.434.483
	costo tratamiento	6.153.980	6.611.718	6.443.417	8.780.273	8.660.986,24
	costo refinamiento	3.281.450	3.525.527	3.435.785	4.681.852	4.618.246
	costo flete	3.808.156	4.091.410	3.987.263	5.433.337	5.359.521
	Utilidad del Mineral	93.792.421	101.869.623	98.899.797	133.501.205	131.396.283
	Costo Operación (OPEX)	9.557.695	9.557.695	9.557.695	9.557.695	13.842.179
	CAPEX Ampliación Planta Caso 210 Ktpd				30.588.661	
CASH FLOW (I)	84.234.726	92.311.928	89.342.102	93.354.849	117.554.104	
Caso Sin Pebbles	Tonelaje Stocks	2.700.000	2.700.000	2.700.000	3.910.345	3.910.345
	Ley Stocks	0,68%	0,69%	0,68%	0,67%	0,67%
	Tonelaje Stock-Pala	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.448.276	1.448.276
	Ley Stock-Pala	0,78%	0,78%	0,78%	0,78%	0,78%
	Tonelaje TOTAL	3.700.000	3.700.000	3.700.000	5.358.621	5.358.621
	Ley Cu TOTAL	0,71%	0,71%	0,71%	0,70%	0,70%
	Rec	79%	79%	79%	79%	79%
	cu ton	20.807	20.951	20.750	29.756	29.518
	ingreso	133.007.521	133.922.153	132.641.757	190.209.489	188.688.033
	costo procesamiento	10.800.000	10.800.000	10.800.000	15.641.379	15.641.379
	costo tratamiento	6.718.257	6.764.455	6.699.782	9.607.549	9.530.699
	costo refinamiento	3.582.336	3.606.970	3.572.485	5.122.976	5.081.998
	costo flete	4.157.337	4.185.925	4.145.905	5.945.265	5.897.710
	Utilidad del Mineral	107.749.591	108.564.802	107.423.585	153.892.320	152.536.246
Costo Operación	5.800.000	5.800.000	5.800.000	5.800.000	8.400.000	
CASH FLOW (II)	101.949.591	102.764.802	101.623.585	148.092.320	144.136.246	
DIFERENCIA CASH FLOW (II-I)	17.714.865	10.452.874	12.281.484	54.737.470	26.582.142	
NPV	393.598.691					

Tabla 7: Evaluación económica del Escenario 2.

La TIR no fue calculada por tratarse de un proyecto sin Capex (salvo eventuales estudios de ingeniería), por tanto, va a tender a infinito, no representativo de la rentabilidad, y difícil de usar como indicador para comparar proyectos. Otros indicadores financieros no fueron calculados por el mismo motivo.

7.3 SELECTIVIDAD POR GRANULOMETRÍA

La selectividad por tamaño ha sido utilizada en la industria para capturar la característica de algunos yacimientos donde los minerales tienden a exhibir una concentración preferencial en fracciones de tamaño específico (eg. Heron Resource, 2004). Usualmente existe un aumento de fases minerales con mayor valor económico en fracciones de tamaño más fino, o menos comúnmente asociado a la fracción más gruesa en algunos ambientes geológicos.

La ocurrencia de minerales en un yacimiento generalmente es muy compleja, con una serie de eventos sobreimpuestos, cada uno de ellos contribuyendo a generar la ley de cada zona mineral. Por tanto, es muy relevante el entendimiento cabal de la paragénesis, texturas y controles de la mineralización para asegurar que cuando el mineral es seleccionado, la decisión de usar una fracción de tamaño esta sea la correcta para cada tipo de mineral en el depósito.

El estudio básico que sustenta una oportunidad de selectividad por tamaño para selectividad es el Test de Heterogeneidad, el cual permite medir para muestras representativas de un depósito la cantidad de metales que contienen distintas fracciones de tamaño. Sin embargo, esta metodología usualmente no se hace cargo de fracciones gruesas por sobre 1 pulgada (2,5 cm). Se requiere tener estudios a tamaños más grandes (incluso para bloques de tamaño mayor a 1 m, para ser capaz de identificar la oportunidad tanto a nivel mina (en material ROM) o después de chancado.

7.3.1 Test de Heterogeneidad Rosario Primario

La realización de Test de Heterogeneidad es una actividad estándar de la industria minera, cuyo propósito es el cálculo de los errores fundamentales de muestreo para la generación de protocolos de toma de muestras y controles de calidad (QAQC). En Collahuasi se han construido para cada depósito test de heterogeneidad con materiales provenientes de los distintos yacimientos del distrito. Para el caso de la mineralización primaria de Rosario, el año 2009 se realizó un test de heterogeneidad con apoyo de consultores reconocidos (Magri, 2009). Los detalles del test son los siguientes:

Este estudio consideró un test de heterogeneidad realizado en la unidad geológica correspondiente a Rosario Primario (representativo del 80% del LoM). Los objetivos de este test fueron los siguientes:

- Calcular constantes de muestreo válidas para la unidad geológica ya mencionada para las variables cobre total (CuT),

cobre soluble en ácido sulfúrico (Cu H₂SO₄), oro (Au), plata (Ag), arsénico (As), molibdeno (Mo) y fierro (Fe).

- Estudiar la distribución de las leyes mencionadas anteriormente en las distintas fracciones granulométricas.
- Analizar la variabilidad de las constantes de muestreo para evaluar la incerteza asociada a estos valores.

Para este estudio se formó un compuesto de aproximadamente 300 Kg. representativo de la unidad geológica en estudio tomando fragmentos de 82 tramos de 2 m cada uno de sondajes de diamantina almacenados en la testigoteca. La preparación y análisis químico de las muestras generadas para el test fue realizada en el laboratorio Geoanálítica de La Serena. Los resultados del test, para las fracciones granulométricas (figura) muestran una concentración importante del Cu en las fracciones bajo 0,5 cm, la cual va acompañada por Au, Ag y Mo (figura), que representan créditos importantes del negocio.

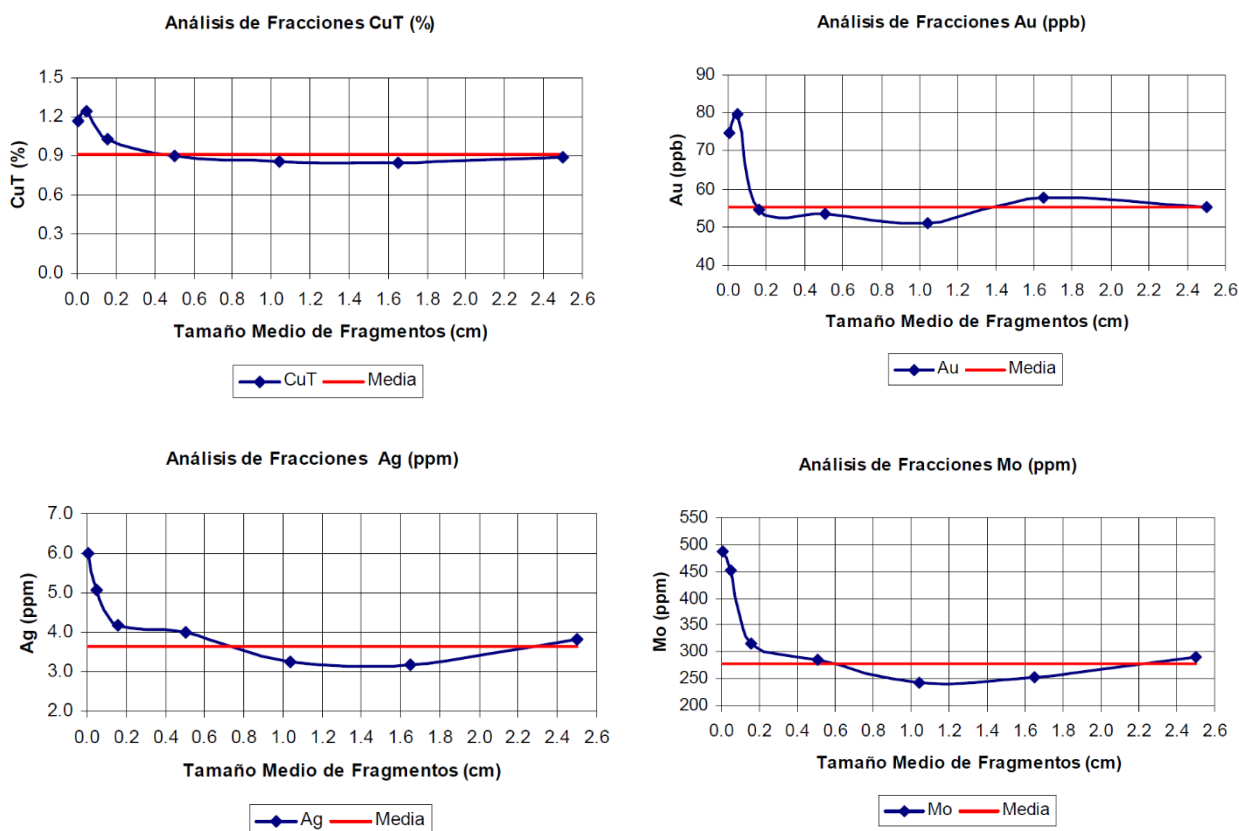


Figura 23: Resultados Test Heterogeneidad Rosario primario (Magri, 2009).

7.3.2 Caso de Negocio

Un inconveniente que es necesario abordar en un proyecto brownfield, donde el mayor valor está en maximizar el uso de la capacidad instalada (activos), es que la selección por granulometría produce un aumento en la ley, pero una disminución en el tonelaje, siendo necesario (en algunos casos) aumentar el movimiento mina para copar la capacidad de chancado y molienda.

Para yacimientos con concentraciones de leyes en fracciones más finas (menor a 1 pulgada) es necesario un proceso de chancado secundario o terciario que pueda llevar a la granulometría adecuada y elementos de selección granulométrica. No se han identificado experiencias en el mundo de evaluaciones asociadas a la industria del cobre en yacimiento similares, que pudieran ser aplicadas a Collahuasi, debido a que cada yacimiento tiene sus particularidades y el diseño de cada planta de selección por granulometría tendrá una configuración particular. Por tanto, no existen referencias de Capex asociados a un depósito similar a Collahuasi. Los casos de lixiviación aportan información valiosa donde usualmente el mineral es chancado bajo 1 pulgada.

Considerando que la oportunidad se identifica en rechazar parte del mineral entre 1 y 2 cm (figura 23), eso va a significar que una porción de la alimentación al mineral deberá ser La configuración de Collahuasi y sus molinos SAG im

Con estos antecedentes se construyó un caso de negocio "high level" con números referenciales, que requieren niveles de confianza superiores para evaluar si realmente una oportunidad en este caso. Los supuestos usados en este caso fueron los siguientes (información adicional en tabla 8):

- El caso considera sacar 10.000.000 de toneladas de mineral desde la correa transportadora y ser enviado a un circuito de chancado secundario y terciario más selección.
- El 20% chancado sobre 1 cm es sacado del circuito y reemplazado por mineral fresco (2 Mt/año).
- El 80% del mineral restante (bajo 1 cm) es devuelto al stockpile
- Se considera aumento de movimiento mina para compensar la disminución del tonelaje alimentado al SAG, el cual es reemplazado por mineral fresco.
- Cálculo de aumento de movimiento mina fue realizado para a costo unitario Capex de 2,8 US\$ la tonelada movida (inversión en equipos mina)

- Estimación de Capex de planta de chancado secundario + terciario + correas: 130 MUS\$ (datos consultor).
- Capacidad de planta de Chancado y selección es 10 Mt/año. Este caso fue elegido por representar un Capex abordable para el caso de negocio.
- Datos de Capex y rendimiento palas y camiones de casos de negocio Collahuasi.
- Mineral reemplazado (2 Mt) tiene un upgrade de ley de 20 % relacionado a los resultados de test de heterogeneidad.

Item	Movimiento (Ton/año)	Requerido	Capex unitario	Capex requerido
Aumento movimiento mineral	2.000.000			
Aumento movimiento lastre (L/M = 3/1)	6.000.000			
Movimiento Total	8.000.000			
Valores Unitarios				
Pala	28.000.000	0,3	25.900.000	7.400.000
Camiones	2.700.000	3	5.100.000	15.111.111
Planta Chancado-Selección (10 Mt/año)		1	130.000.000	130.000.000
TOTAL				152.511.111

Tabla 8: Datos para el caso de negocio.

Resultados

El ejercicio muestra un NPV positivo para una capacidad de selectividad de 10 Mt anuales, entregando un valor presente de **167 MUS\$** (tabla 9). Importante destacar que para este proyecto se requiere un Capex de 152 MUS\$ lo que lo transforma en un proyecto con mucho mayor riesgo que los anteriores, y por lo tanto los supuestos geológicos del caso deben ser validados, al igual que los datos de diseño de planta y sus Capex asociados. Hechas algunas sensibilidades por tamaño e inversión, todos los casos dieron NPV positivo, sin embargo, al sensibilizar por upgrade de ley, bajo un 10% de upgrade el NPV se hace negativo. Este es un argumento más para tratar de entender de mejor manera la distribución de leyes por fracciones para distintas unidades de mineralización del depósito.

		2025	2026	2027	2028	2029
ITEM		año 0	año 1	año 2	año 3	año 4
Caso Base	Tonelaje Seleccionado	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.896.552
	Mineral a Planta [t]	52.911.248	56.812.696	56.657.889	61.865.625	75.066.905
	Ley CuT Mineral [%]	1,28	1,06	1,14	1,11	1,05
	Ley Cu	1,28%	1,06%	1,14%	1,11%	1,05%
	Rec	89%	88%	88%	88%	88%
	cu ton	22.731	18.732	20.125	19.613	26.726
	ingreso	145.304.251	119.740.547	128.646.957	125.372.247	170.841.426
	costo procesamiento	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	11.586.207
	costo tratamiento	7.339.369	6.048.138	6.498.003	6.332.597	8.629.261
	costo refinamiento	3.913.528	3.225.012	3.464.891	3.376.693	4.601.329
	costo flete	4.541.689	3.742.659	4.021.042	3.918.686	5.339.889
	Utilidad del Mineral	121.509.665	98.724.738	106.663.020	103.744.272	140.684.739
	Costo Operación (OPEX)					
	CAPEX					
CASH FLOW	121.509.665	98.724.738	106.663.020	103.744.272	140.684.739	
Caso con Selección de 2 Mt	Tonelaje restante	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.896.552
	Ley restante	-	0,68%	0,69%	0,68%	0,67%
	Tonelaje Agregado	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.448.276
	Ley agregada	0,85%	0,78%	0,78%	0,78%	0,78%
	Tonelaje TOTAL	3.700.000	3.700.000	3.700.000	3.700.000	5.358.621
	Ley Cu TOTAL	1,54%	1,28%	1,37%	1,33%	1,26%
	Rec	89%	88%	88%	88%	88%
	cu ton	27.277	22.478	24.150	23.536	32.071
	ingreso	174.365.101	143.688.656	154.376.348	150.446.697	205.009.711
	costo procesamiento	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000	11.586.207
	costo tratamiento	8.807.243,12	7.257.765	7.797.604	7.599.116	10.355.113
	costo refinamiento	4.696.233	3.870.014	4.157.870	4.052.031	5.521.595
	costo flete	5.450.027	4.491.191	4.825.250	4.702.423	6.407.867
	Utilidad del Mineral	147.411.598	120.069.686	129.595.624	126.093.126	171.138.929
	Costo Operación					
	CAPEX Palas - Camiones	22.511.111				
CAPEX Planta Chancado - Selección	130.000.000					
CASH FLOW	-5.099.513	120.069.686	129.595.624	126.093.126	171.138.929	
CASH FLOW DIF	-126.609.178	21.344.948	22.932.604	22.348.854	30.454.189	
NPV	NPV	\$167.165.114				

Tabla 9: Resultados de la estimación económica del caso.

8. DISCUSIÓN

La industria minera en los últimos 15 años ha comenzado evaluar tecnologías que podrían entregar saltos de valor respecto a la forma actual de hacer minería. Entre esos temas se han ido instalando la necesidad de hacer minería más selectiva, donde pueda capturarse de mejor manera el valor de los activos, buscar economías en consumo de energía, movimiento mina, tamaño de las operaciones, entre otros impactos positivos para el negocio.

Las tecnologías de selectividad de mineral han ido mostrando con el pasar de los años que se irán transformando en una palanca transformadora de la manera de operar en minería.

Como se ha enunciado previamente, el propósito de esta tesis, más que tener casos de negocios depurados o con niveles de ingeniería de detalle, es poder, mediante algunos casos evaluados, identificar si para Collahuasi existe o no una oportunidad en incorporarse a las tendencias mundiales de **selectividad de mineral**. Es importante en la actual etapa de crecimiento en la que está ingresando Collahuasi poder discutir si comenzar a incorporar este tipo de tecnologías que, con bajo Capex, son capaces de generar aumento de valor al negocio.

Tamaño de la oportunidad

Considerando las evaluaciones de alto nivel de los proyectos evaluados se puede afirmar que iniciativas de selectividad podrían agregar valor importante al negocio, especialmente si son tomadas de manera integral. Los casos de negocio analizados corresponden a una pequeña parte de los proyectos que podrían ser implementados y cuyos beneficios podrían sumarse y potenciarse. La sumatoria de los proyectos entrega NPV de 887 MUS\$, que aunque es high level permite hacernos una idea del tamaño de la oportunidad (tabla 10).

No	Caso de Negocio		NPV (MUS\$)
1	Sensores en Palas		326
2	Eliminación Pebbles	Caso sin sinergia (E1)	136
		Sinergia con Palas (E2)	394
3	Clasificación granulométrica		167
TOTAL			887

Tabla 10: Resumen de proyectos evaluados

Valor agregado de la selectividad

Las dimensiones del aporte de la selectividad de mineral han sido evaluadas desde una perspectiva más amplia que la estrictamente económica por diversos autores y la síntesis que es presentada en Duffy et al (2015) grafica bastante bien el valor agregado a lo largo de toda la cadena de valor de una empresa minera. Es destacable que una minería más selectiva será en el futuro menos invasiva, con menor intervención en el medio ambiente y finalmente se podrá transformar también en un aporte a la sustentabilidad del negocio minero.



Figura 24: Valor agregado selectividad de mineral (modificado de Duffy et al, 2015).

Más tratamiento o más selectividad?

La respuesta más bien debiera que construirse desde el riesgo, hoy la tecnología está en desarrollo, hay pocas experiencias a escala industrial, y no existen experiencias en la gran minería del cobre que sean tomar y realizar. Hoy la industria tiene procesos estandarizados, normados, con resultados positivos y comprobables. La incorporación gradual de la industria minera hacia una nueva manera de operar deberá ir acompañada por el paso gradual en faenas más pequeñas donde algunas tecnologías pueden ser probadas a un

riesgo menor. Las dimensiones de Collahuasi hacen difícil la incorporación de tecnologías no probadas en el corto plazo, sin embargo, dentro de los próximos años hay decisiones que van a comprometer inversiones importantes, y la incorporación temprana de tecnologías puede mejorar ostensiblemente casos de negocio que hoy en día son menos atractivos. Lograr maximizar el uso de los activos más relevantes de la compañía como es el circuito de molienda y flotación es desafío permanente que los proyectos de selectividad con fuentes de selectividad aguas arriba es clave para lograr los desafíos de disminución de costos, y sustentabilidad del negocio.

Ante la pregunta si el crecimiento debe ir por la vía de más tratamiento o más selectividad, la respuesta sin duda es ambas. En la medida que se hagan las inversiones en pruebas a escala piloto o industrial las tecnologías irán madurando y podrán formar parte del Plan de Negocios de Collahuasi, de manera de ir dando los primeros pasos hacia la minería del futuro.

9. CONCLUSIÓN

Los tres casos de negocio de selectividad de mineral (Ore Sorting) evaluados en la presente tesis muestran para estas metodologías un importante potencial de agregar valor a Collahuasi. Las estimaciones de costos y flujo de caja muestran un VAN positivo para los tres proyectos, con un acumulado de **887 MUS\$**. La sumatoria de otros proyectos podrían incrementar de manera importante el valor actual del negocio, con impactos positivos en costos y productividad.

Más allá de las experiencias en la industria minera utilizando diversas técnicas de selectividad, hoy no existe una fórmula integral para la gran minería del cobre que pudiera ser aplicada en el corto plazo. Más bien existen algunas soluciones que están comenzando a ser testeadas a escala industrial y gran parte de las empresas de la gran minería están invirtiendo en pruebas para validarlas e incorporarlas pronto en sus operaciones.

No obstante el estado de avance, aún en etapa de maduración, las experiencias en el mundo muestran un gran valor potencial en poder viabilizar proyectos marginales o buscar mejoras de producción mediante inversiones en selectividad de mineral, y la tendencia mundial ha pasado del escepticismo a tomar en serio el valor agregado del tema, y hoy se visualiza como uno de los tópicos que marcará la transformación de la industria minera en el futuro.

Finalmente se visualiza la necesidad que Collahuasi incorpore de manera temprana algunas pruebas para acelerar la maduración de estas tecnologías, considerando el importante valor potencial constatado en las características geológicas de su depósito: gigante, de alta ley, con alta variabilidad, características propicias para cualquier metodología de selectividad de mineral.

BIBLIOGRAFÍA

Bamber, A, 2008. Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased sustainability of hard rock metal mining, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver.

Bergmann, C, 2009. Developments in ore sorting technology, Council for Mineral Technology.

Collahuasi, 2018, Informe EIA, DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA Y MEJORAMIENTO DE CAPACIDAD PRODUCTIVA DE COLLAHUASI.

Collahuasi, 2019. Geología de Collahuasi. Informe Interno.

Collahuasi, 2020. Statement de Recursos y Reservas Collahuasi. Reporte Interno.

Duffy, K., Valery, W., Jankovic, A. and Holtham, P., 2015. Integrating Bulk Ore Sorting into a Mining Operation to Maximise Profitability. Conference Paper, Research Gate.

Ebrahimi, A, 2013. The importance of dilution factor for open pit mining projects.

Foggiatto, B., Bueno, M., Lane, G., McLean, E. and Chandramohan, R., 2014. The economics of large scale ore sorting, Technical Solutions, Ausenco Services Ltd., Brisbane, Australia

Hall, B, 2014. Cut-off Grades and Optimising the Strategic Mine Plan, 311 p (The Australian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Heron Resource Ltd., 2004. Kalgoorlie Nickel Project Kalgoorlie Nickel Project An Emerging World Class Nickel Producer. Annual General Meeting 2004.

Logan, A. and Krishnan, N., 2012. NewCrest Technology Step Changes. XXVI INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS(IMPC) 2012 PROCEEDINGS / NEW DELHI, INDIA / 24 - 28 SEPTEMBER 2012.

Magri Consultores, 2009, Heterogeneidad y muestreo para Rosario Primario, Informe Interno Collahuasi.

Manouchehri, H, R, 2004. Sorting: possibilities, limitations and future.

MineSense, 2020. Simulaciones para construcción de caso de negocio. Informe Interno para Collahuasi.

Miljak, D. 2011, Ore sorting provides sustainable future for mining, CSIRO. Pokrajcic, Z, Lewis-Gray, E, 2010. Advanced comminution circuit design – essential for industry, AusIMM Bulletin, August 2010, pp 38 – 42.

Powell, M. S. and Bye, A. R., 2009. 'Beyond mine-to-mill – Circuit design for energy efficient resource utilisation', Proceedings 10th Mill Operators' Conference, pp 357-364 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Rutter, J, 2017. CRC ORE White Paper: Grade Engineering and GE View.

Seerane, K. and Rech, G. (2011) 'Investigation of sorting technology to remove hard pebbles and recover copper bearing rocks from an autogenous milling circuit', Proceedings of the 6th Southern African Base Metals Conference 2011 (The Southern African Institute of Mining and Metallurgy: Johannesburg).

Tong, Y. (2012) Technical amenability study of laboratory-scale sensor-based ore sorting on a Mississippi valley type lead-zinc ore, Master Thesis, The University of British Columbia, Canada.

Wotruba, H, 2006. Sensor sorting technology – is the minerals industry missing a chance?

Ziemski, M., 2019. Increasing energy efficiency in processing – some examples from industry, Sustainable Minerals Institute, University of Queensland, presentación interna.