

# Impacto de la metodología Mina a Planta en la rentabilidad global de la industria Minera

Ronald Emerson Ticona Humpiri<sup>1</sup> y Jair Fernando Alarcón Zamorano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Orica, Calle Dionisio Derteano 144, San Isidro, Lima, Perú (ronald.ticona@orica.com)

<sup>2</sup> Orica, Av. Costanera Sur 2730, Las Condes, Santiago, Chile (jair.alarcon@orica.com)

## RESUMEN

Generalmente, la operación de perforación y voladura se gestiona de forma independiente a los resultados de la planta de procesamiento. Por lo tanto, la segmentación técnica para determinar los diseños de perforación y voladura del mineral no incluye las propiedades de la roca de la planta de procesamiento, como el Bond Work Index, Axb, Drop Weight Index u otros. El año 2021, en la operación de una mina de cobre del Perú, de acuerdo a su plan de minero tendría una dureza de molienda SAG significativamente mayor, lo que impactaría directamente en la producción de concentrados de cobre. Se volvió necesaria la búsqueda una estrategia integrada entre mina a planta para mantener los niveles de producción.

Históricamente, el mineral tenía un Axb entre 36 y 50; sin embargo, desde el segundo trimestre de 2021 hasta el cuarto trimestre de 2021 alcanzó valores de 25 a 38. Según la experiencia de la planta de molienda con este tipo de mineral, el rendimiento de la planta de procesamiento se reduciría significativamente. Para enfrentar el desafío de desempeño, se implementó una estrategia práctica de mina a planta, que incluyó el parámetro Axb en las segmentaciones de diseño de perforación y voladura del mineral y la aplicación de explosivos más energéticos para mejorar la fragmentación y el rendimiento de la planta de procesamiento.

Este artículo presenta la evaluación de este período, destacando las mejoras de la fragmentación de perforación y voladura y su influencia en la planta de procesamiento. La producción diaria se incrementó en promedio de 93,082 tpd a 95,641 tpd, equivalente a 330 kt de mineral adicional con una utilidad neta de US\$ 5.8MM en los nueve meses evaluados.

## 1. Introducción

En las minas a tajo abierto, las actividades de perforación, voladura, carguío, acarreo, chancado y molienda, en ocasiones tienen estrategias direccionadas a la reducción de costos individualmente (silos). Para solventar esta situación e ir en línea con el objetivo de toda empresa de incrementar la

rentabilidad del negocio, diversos estudios han demostrado que los resultados de la voladura, como la fragmentación tiene un impacto significativo en la eficiencia de los procesos aguas abajo y por tanto en la rentabilidad general del negocio.

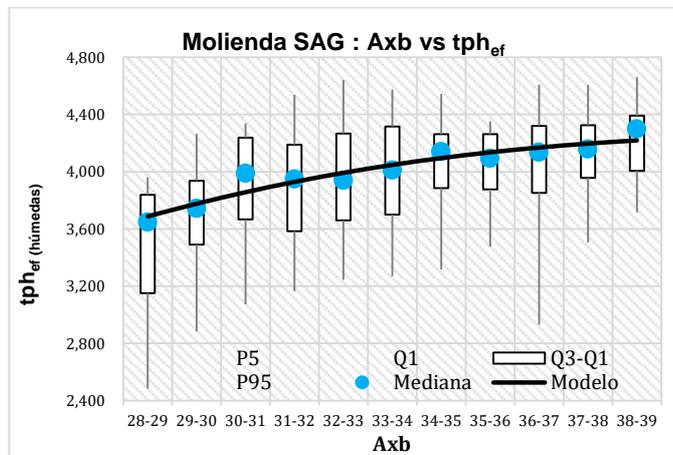
La mina en estudio, identificó de acuerdo al área de planeamiento de largo plazo, que para el 2021. se tendría una dureza de molienda SAG significativamente mayor, lo que impactaría directamente en forma negativa en la producción de concentrados de cobre, como se muestra en la figura 1.

La mina en estudio reconoció la necesidad de realizar un estudio mine to plant, con el fin de optimizar los resultados de fragmentación, modificando los parámetros de perforación y voladura y así obtener la máxima productividad en molienda.

Una vez aprobado el proyecto mine to plant, cuyo objetivo principal fue lograr una mejora general en la productividad de los procesos de minado y molienda a través de cambios en los parámetros de perforación y voladura. es decir, a partir de nuevos diseños de perforación y voladura, que permiten una mejor distribución de la energía durante la detonación, se ha logrado mejorar la fragmentación y obtener una mayor eficiencia en los equipos, mejora en la productividad en los procesos de carga, transporte y finalmente un impacto significativo en la planta con la generación de incrementos en el procesamiento de molienda y reducción del consumo de energía. Para ello, se han considerado los siguientes objetivos particulares:

- Optimizar la fragmentación de voladuras, reducir el P80 y aumentar el porcentaje de finos.
- Incrementar el procesamiento del molino SAG al optimizar el tamaño del material alimentado al molino.

**Figura 1**  
Impacto de la dureza de roca vs tph MSAG



*Nota:* La Figura muestra el impacto negativo de la dureza de la molienda SAG Axb en el tratamiento en el tph del MSAG (M2P). Fuente: Elaboración Propia.

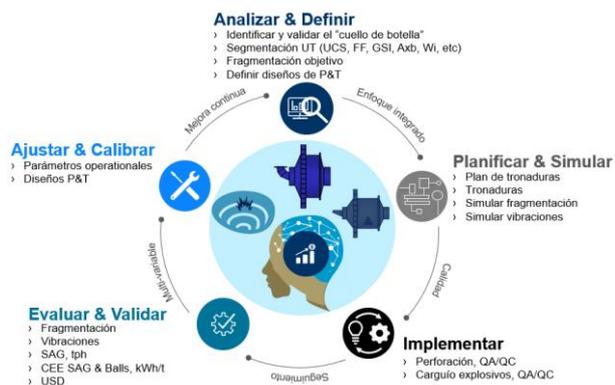
## 2. Metodología Mine to Plant

### 2.1. Definición de la metodología

El objetivo principal de la voladura es la primera etapa de conminución, por lo cual es posible enfocar su fragmentación a las necesidades de la planta de procesamiento (estrategia integración mina-planta) para buscar beneficios a través del aumento de producción (sin inversión de capital), recuperación del metal de interés, disminución del consumo específico de energía en planta de conminución, disminución de costos del negocio global de operación mina-planta y reducción de emisiones.

La metodología Mine to Plant se divide en 5 pasos los cuales se desarrollan en una lógica de mejora continua, como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2**  
Metodología Mine to Plant



*Nota:* La figura muestra el ciclo virtuoso de mejora continua de la metodología mine to plant tomado de Mine to Plant methodology in Codelco Andina mine de Jair Alarcon and Williams Soto, 11th International Mineral Processing Conference – Procemin 2015, Chile, 2015.

### 2.2. Analizar y definir

Fragmentación objetivo según las propiedades geometalúrgicas y procesos planta. En esta etapa, se analizan los circuitos y equipos involucrados, a partir de la información histórica de los sistemas de control, identificando el cuello de botella, las condiciones operacionales y las propiedades geometalúrgicas del mineral, para así establecer oportunidades de mejora con una visión integral de la mina a la planta.

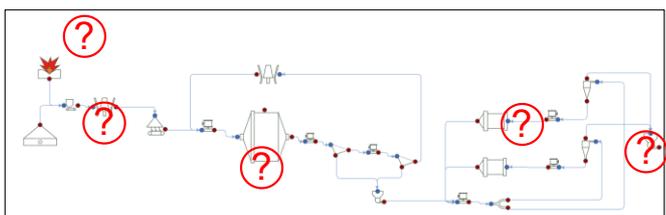
Las tecnologías en productos explosivos, software de simulación e ingeniería, permiten ajustar las curvas de fragmentación de voladura de acuerdo con lo requerido por la planta de procesamientos. Para definir la curva de fragmentación óptima de la planta, es necesario evaluar en forma conjunta con el equipo de la planta de Candelaria, para determinar los tamaños claves para maximizar el rendimiento de esta, para ello se deben construir modelos empíricos de fragmentación versus tratamiento. Con los tamaños claves y los porcentajes objetivos, se retroalimenta al equipo especializado de voladura, para que defina los diseños de P&V que permitirán alcanzar los resultados.

#### 2.2.1. Determinar el cuello de botella

Bozarth y Handfield (2006) describen el cuello de botella como las limitaciones de producción en los sistemas de producción en general. En la minería, los sistemas se diseñan comúnmente en torno al ya conocido cuello de botella. Los cuellos de botella conocidos o del sistema son los procesos con menor capacidad en la cadena de valor. Por otro lado, desafortunadamente, muy pocos procesos se utilizan a su máxima capacidad en la minería. Por lo tanto, es

probable que el cuello de botella del sistema pase a otro proceso sin atraer la atención de la gerencia. Esta investigación pretende abordar el enfoque general sobre los verdaderos cuellos de botella en los procesos. Esto se hace identificando y clasificando primero los verdaderos cuellos de botella en el proceso de mina a planta como se observa en la figura 3.

**Figura 3**  
Proceso de conminución mina a planta

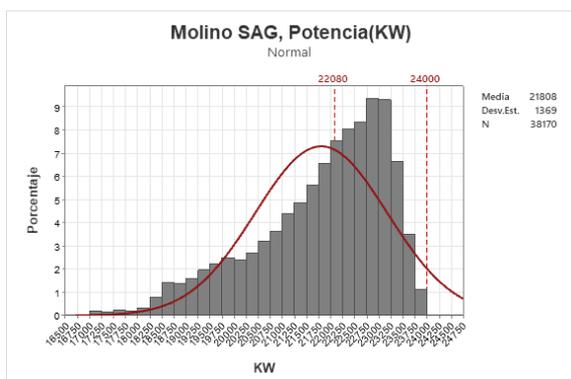


Nota: La figura muestra el diagrama de flujo del proceso de conminución de mina a planta, Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los datos históricos para la roca dura (Axb<40) de la potencia del molino SAG, mostraron que el consumo de energía promedio fue de 21,808 kW (alrededor del 91 % de la potencia disponible) no superando la potencia de 24,000 kW, como se muestra en la Figura 4.

No obstante, se observa que entre el percentil 75 = 22,883KW y el percentil 95 =23,898KW de la potencia se encuentra la mayor cantidad de información, superando la potencia recomendada 22,080 (92% de la potencia disponible), por este motivo el molino SAG, para este tipo de roca con Axb<40 es un cuello de botella para el proceso.

**Figura 4**  
Histograma de potencia del molino SAG



Nota: La figura Histograma del consumo de potencia del molino SAG para mineral con Axb<40, Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Identificar las propiedades de roca:

En la mina de estudio, se vio que las propiedades de matriz de roca y propiedades de macizo rocoso fueron homogéneas, la significancia radicaba en la propiedad de roca de la planta procesos, específicamente el Axb, es por eso motivo que la caracterización geometalúrgica del mineral está dada principalmente por los parámetros de ruptura por impacto de A y b. la cual se determina mediante el modelo el geometalúrgico de la mina y continuamente validado por la planta.

2.2.2. Segmentar para diseños P&V

Una vez se finalizó el estudio de la etapa de caso base con los diseños tradicionales de perforación y voladura usando el explosivo de 161 RBS (Relative Bulk Strength), se han realizado cambios a los diseños de perforación y voladura, donde el principal fue el uso de un explosivo de mayor energía con 180 RBS, gaseado químicamente, el cual está compuesto por un 70% de emulsión y un 30% de nitrato de amonio de alta densidad, cuyo VOD promedio es 5,833 m/s, y reducción del diseño del patrón de perforación (B x E).

El análisis de pruebas nos permitió establecer recetas de mallas de perforación y voladura en base a las variables de mayor relevancia, teniendo en cuenta el cuello de botella y las propiedades de la roca de la planta procesos Axb.

Los nuevos parámetros de diseño se muestran a continuación en la tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de diseño de voladuras de la mina por rangos de propiedad de roca de planta de procesos.

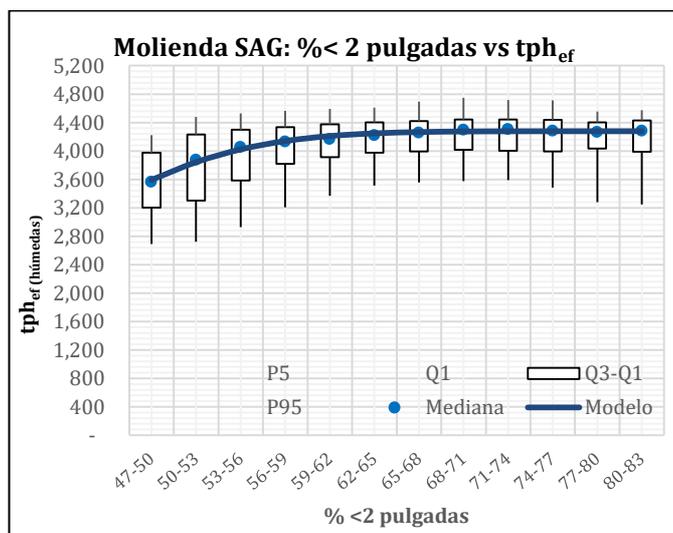
Tipo de Explosivo	Etapas MZP	Rango Axb	BXE (m)	Carga (Kg)	F.P (kg/t)	Primas c/u	Cámara aire c/u
Caso Base Explosivo RBS = 161	ETAPA 0	<40	6.6x7.6	930	0.475	1	1
	ETAPA I	<40	6.6x7.6	930	0.475	1	0
ETAPA II	6.0x7.0		930	0.557	2	1	
ETAPA III	6.3x7.3		930	0.519	1	1	
Mine to Plant Explosivo RBS = 180	ETAPA IV	<35	6.3x7.3	1000	0.557	1	0
		35-40	6.3x7.3	930	0.519	1	1

2.2.2. Fragmentación objetivo:

En el inicio de la metodología se identifican los targets de fragmentación y variables relevantes del proceso, de esta manera se enfocan los diseños de Voladura en consideración con los patrones de perforación, condición geomecánica y geometalúrgica, lo anterior con la búsqueda de incrementar el procesamiento de la planta de conminución, como se muestra en la figura 4.

**Figura 4**

*Modelo empírico del %<1 pulgada y el rendimiento de la molienda SAG, del segundo trimestre del 2021*



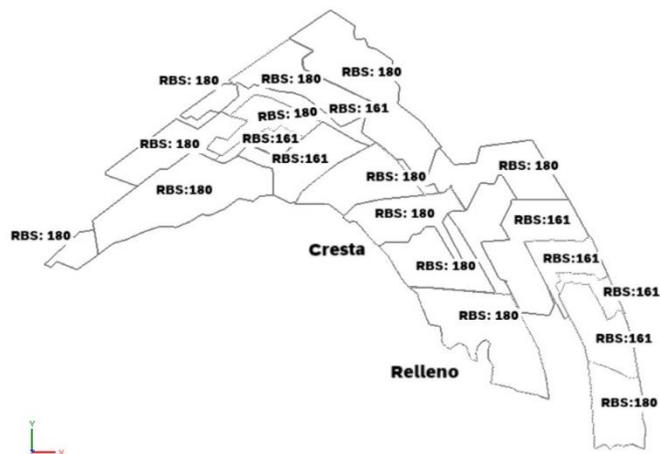
Nota: La figura muestra el impacto del tamaño -1 pulgada en el rendimiento de la molienda SAG, del segundo trimestre del 2021. Fuente: Elaboración Propia.

### 2.3. Evaluar y validar

Se identifico el banco 3825 a inicios del primer trimestre del 2021 en el cual se tenía una menor Axb, para el inicio de las pruebas con el explosivo de mayor energía, como se muestra en la Figura 5. se muestra 11 proyectos usando el explosivo con mayor energía 180 RBS y 07 proyectos usando el explosivo de caso base de 161 RBS.

**Figura 5**

*Banco de implementación de los diseños mine to plant*



Nota: La figura muestra el banco 3825, en el cual se implementó el explosivo de mayor energía con RBS = 180, Fuente: Elaboración propia.

### 2.4. Evaluar y validar

En esta etapa se confirman la correcta implementación y controles operacionales si cumplen con los desafíos planteados. Es en este paso se valida el incremento en tratamiento de la planta de procesamientos si cumplen con lo planteado inicialmente.

### 2.5. Ajustar y calibrar

A medida que se ve que la fragmentación de la voladura mejora, los equipos de trituración se ven confrontados con curvas de fragmentación distintivas de las que están acostumbrados a operar, por lo tanto, a menudo es necesario realizar algunos ajustes de configuración para aprovechar al máximo el equipo instalado.

## 3. Modelamiento Empírico

El modelo empírico representa una aplicación de las matemáticas que describe el proceso de estudio como una relación entre las variables dependientes (y) e independientes (x) sin explicar el mecanismo involucrado, como se muestra en la figura 6.

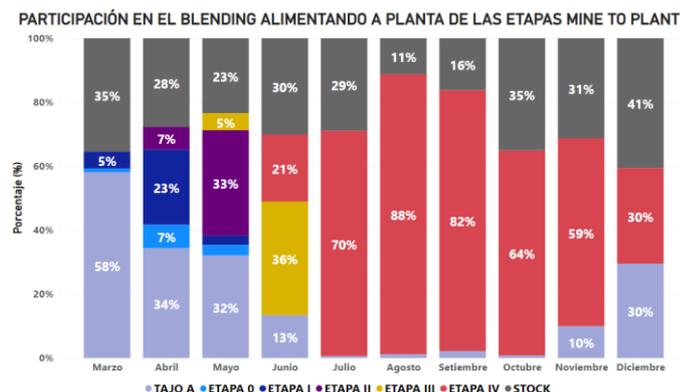
El modelo empírico consiste principalmente en la formulación de una ley matemática que reúne los datos experimentales, observaciones disponibles, para dar respuestas pertinentes al proceso examinado.

Con la ayuda de los datos experimentales, podemos determinar la forma del modelo, dependiendo del tipo y cantidad de datos, características del problema, se puede elegir entre dos enfoques diferentes:

- Interpolación: Encontrar una función que contenga todos los puntos de datos.
- Regresión o ajuste del modelo: Encontrar una función que esté lo más cerca posible de contener todos los puntos de datos.

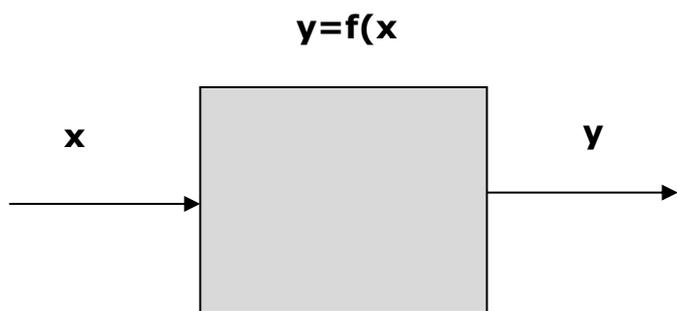
A veces, necesitará combinar estos métodos, ya que la curva de interpolación puede ser demasiado compleja y el modelo de mejor ajuste no es lo suficientemente preciso.

*Porcentaje de alimentación directo desde mina a planta por Etapas de diseños P&V Mine to plant.*



Nota: La participación de las etapas de diseños perforación y voladura mine to plant en el 2021, Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6**  
*Variables involucradas en el modelo empírico*



Nota: La figura muestra la relación de las variables del modelo empírico Fuente: Elaboración propia.

## 4. Discusión de Resultados

### 4.1. Trazabilidad mineral Mine to plant

A través de la identificación de las voladuras se realizará el seguimiento hasta los destinos, utilizando los reportes del sistema de envíos de despachos, esta información hizo posible el seguimiento del mineral de acuerdo con la zona de origen y su vinculación con el comportamiento en la planta de procesamiento. En este punto, se identificarán los períodos mine to plant en que se alimentaron el mineral de interés y su impacto en los procesos de conminución en función del tratamiento efectivo durante todo el periodo del proyecto, como se observa en la figura 7.

**Figura 7**

### 4.2. Fragmentación

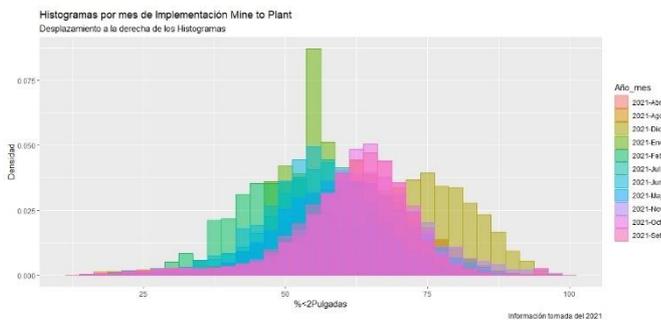
#### 4.2.1. Análisis de la fragmentación

Mediante la aplicación del explosivo de mayor energía, Implementación de los nuevos parámetros de diseño segmentando por el Axb, ha permitido un mayor control de mallas, se incrementó la cantidad de finos (%<2 pulgadas) de 54 a 61 % y el P80 se redujo de 3.7 a 2.9 pulgadas.

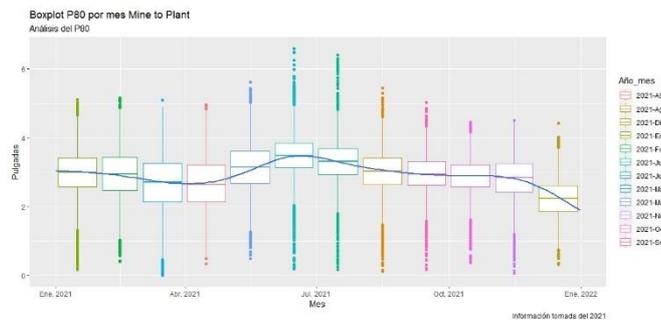
En todas las etapas aplicadas de manera mensual desde abril del 2021, se observa que hay una mejora en la fragmentación, incrementando los porcentajes menor a 2 pulgadas, en comparación a la línea base (enero – marzo 2021), como se observa en la figura 8.

Se observa una correlación directa entre los diseños de perforación y voladura mine to plant y la generación de los porcentajes menor a dos pulgadas, a mayor energía suministrada en los diseños, mayor porcentaje menor a 2 pulgadas obtenido como se muestra en las figuras 9 y 10.

**Figura 8**  
*Histogramas de la evaluación mensual por Etapas mine to Plant*



Nota: se muestra un desplazamiento a la derecha de los histogramas del porcentaje menor a dos pulgadas, el cual indica una mejora en la fragmentación en los meses de aplicación del proyecto mine to plant, Fuente: Elaboración propia.



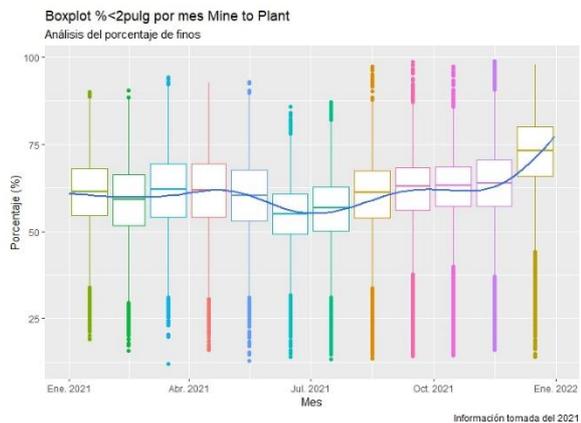
Nota: Se muestra una reducción del tamaño P80 en pulgadas, el cual indica una mejora en la fragmentación en los meses de aplicación del proyecto mine to plant, Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2. Impacto de los Resultados en la molienda SAG

Se presenta la evaluación del impacto de las voladuras mine to plant, que han sido alimentadas directamente desde mina al chancador primario, para mineral con Axb menor a 40.

**Figura 9**

*Evolución histórica del porcentaje menor a dos pulgadas por mes de aplicación del proyecto mine to plant*



Nota: Se muestra un incremento del porcentaje menor a dos pulgadas, el cual indica una mejora en la fragmentación en los meses de aplicación del proyecto mine to plant, Fuente: Elaboración propia.

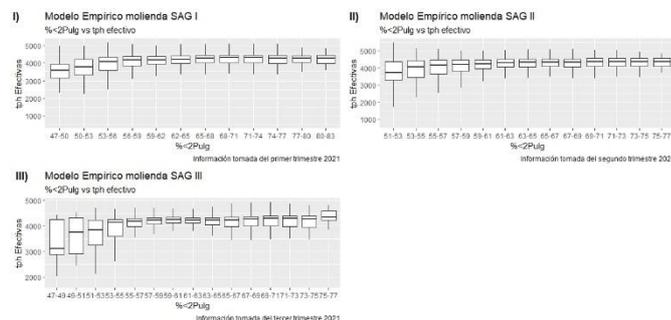
**Figura 10**

*Evolución histórica del tamaño P80 en pulgadas por mes de aplicación del proyecto mine to plant*

De la figura 11, se observa que en cada rango del porcentaje bajo dos pulgadas existe una distribución en el tratamiento, lo que se explica por la variabilidad de la dureza de los minerales, el mismo rango de la fragmentación y otros parámetros operacionales.

**Figura 11**

*Modelos empíricos implementados durante el proyecto mine to plant.*



Nota: Se muestra los modelos empíricos implementados construidos Fragmentación medida %<2 pulgadas y tph de mineral fresco alimentando al molino SAG considerando condiciones normales de operación, Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo matemático se consideran las medianas de tph para cada rango de porcentajes de bajo dos pulgadas, las cuales se muestran en (1), (2) y (3), así mismo se muestra un resumen en la tabla 2.

$$tph_{ef} = 4,278.495 * (1 - e^{-26.428*(\%<2")^{3.690}}).....(1)$$

$$tph_{ef} = 1,685.59 + 2,664.39 * (1 - e^{-99.10*(\%<2")^{6.35}}).....(2)$$

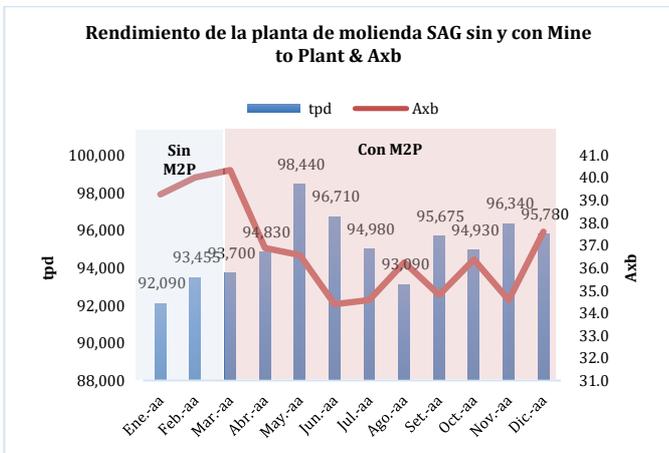
$$tph_{ef} = 2,000 + 2,281.51 * (1 - e^{-801.34*(\%<2")^{9.37}}).....(3)$$

**Tabla 2.** Resumen de los modelos empíricos generados en el proyecto mine to plant.

Modelos Empíricos	Rango de Axb	R <sup>2</sup>
Modelo SAG I (1)	<40	0.994
Modelo SAG II (2)		0.978
Modelo SAG III (3)		0.971

Como resultado de los cambios realizados en el diseño de voladura de la unidad minera, fue el incremento de las toneladas molidas por día (tpd) de 93,082 tpd a 95,641 tpd en la molienda SAG Figura 12,

**Figura 12**  
Rendimiento de la planta de molienda SAG durante el proyecto mine to planta y el Axb.



Nota: Se muestra el impacto del mine to plant en el rendimiento de la molienda SAG así se observa el escenario adverso antes mencionado de la alta

competencia durante el proyecto (Reducción del Axb), Fuente: Elaboración propia.

**5. Beneficios económicos:**

Se realizó la evaluación por los 09 meses de duración del proyecto, considerando como línea base el tonelaje 93,082 tpd las cuales fueron procesadas en el periodo sin mine to plant, producto de la optimización de la voladura que aseguro el porcentaje de finos que eran necesarios para la planta de procesos se incrementó el tonelaje en 95,641 tpd. Con este adicional de tonelaje molido por día se logró incrementar en 330,000 toneladas de mineral molido acumulado durante los nueve meses del proyecto, lo que significa un beneficio económico neto de 5.8M US\$.

**Conclusiones**

- La mina ahora entiende que la reducción del Axb como propiedad de roca de molienda repercutirá directamente en su capacidad de producir cobre fino, ya que la fragmentación suministrada a la planta se verá afectada. Además, saben que las nuevas técnicas y tecnologías de voladura pueden ayudarlos a afrontar estos nuevos desafíos con una implementación rápida. Por lo tanto, cada vez que tengan un nuevo desafío en términos de conminución de mineral, siempre habrá un enfoque en encontrar una solución integrada desde la voladura hasta la molienda con la aplicación de la metodología Mine to Plant.
- Producto de la optimización de la voladura se obtuvo un incremental de 330 kt de mineral molido acumulado durante los nueve meses del proyecto, lo que significa un beneficio económico neto de 5.8M US\$.
- En todas las etapas se observa que hay una mejora en la fragmentación, incrementando los porcentajes menor a 2 pulgadas, en comparación a la línea base.
- Se observa una correlación directa entre los diseños de perforación y voladura mine to plant y la generación de los porcentajes menor a 2 pulgadas.
- A mayor energía suministrada en los diseños en los diseños de perforación y voladura, mayor porcentaje menor a 2 pulgadas el cual se incrementó en 13% pasando de 54% a 61 % y menor P80 obtenido, reduciéndose en 22% pasando de 3.7 a 2.9 pulgadas.

- Se logro incrementar en 3% el tonelaje procesado por la planta de molienda SAG pasando de 93,082 tpd a 95,641 tpd.
- Se observa que el periodo mine to plant existe una reducción significativa del Axb con respecto al caso base, el cual hubiese impactado en el rendimiento de la Molienda si no se hubiera aplicado el proyecto mine to plant.
- El modelo empírico, representa a toda la variabilidad de la dureza de la roca, condiciones de la planta y fragmentación en ese periodo, representando el comportamiento de la propiedad de la roca y también a las condiciones de la planta en las cuales está operando en cada periodo, así mismo muestra la tendencia, comportamiento y mejora de fragmentación mine to plant en el mismo periodo.

### Agradecimientos

Agradecemos a Orica por la confianza en nuestro equipo Process Plant y al compromiso de Operaciones Orica que permitieron la exitosa implementación del Mine to Plant.

### Referencias

- Alarcón, J., Soto, W., Araya, R., 2015. Mine to Plant methodology in Codelco Andina mine, 11th International Mineral Processing Conference – Procemin 2015.
- Bozarth, C. C., Handfield. R. B., 2006. Introduction to Operations and Supply Chain Management. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Grundstrom, C., Kanchibotla, S., Jankovich, A. y Thornton, D. (2001). Blast Fragmentation for Maximizing the SAG Mill Throughput at Porgera Gold Mine. The International Society of Explosive Engineers Annual Conference Proceedings (pp. 932).
- Scott, A., Kanchibotla, S., Morrel, S., (1999) Blasting for mine to mill optimization.
- Workman, L., Eloranta, J., (2003) The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption.
- Lucero, A., Huaman, A., Ticona, R., (2020), Impact of Blasting on Downstream Process to Maximize the Profitability of Mining Industries. The Journal of Explosives Engineering Volume 37 Number 1, January/February 2020, p.6-16.

**Ronald Ticona:** Ingeniero Metalúrgico, Máster en

Ingeniería Metalúrgica, Máster en Ingeniería de software. Con 5 años de experiencia en proyectos de Mine to Plant el cual tiene como objetivo la optimización de la fragmentación y la cuantificación del beneficio generado aguas abajo del proceso minero en la minería del Perú. Actualmente se desempeña como Lead Process Plant Specialist en Orica Perú.

Nombre del autor: Ronald Emerson Ticona Humpiri

Cargo: Lead Process Plant Specialist, Peru

Empresa: ORICA

Correo electrónico: [ronald.ticona@orica.com](mailto:ronald.ticona@orica.com)

Teléfono / Celular: (+51-1) 2176000/+51 941632349

Dirección: Calle Dionisio Derteano 144, Of. 1901, San Isidro. Lima

**Jair F. Alarcón:** Es Ingeniero Civil en Metalurgia y tiene un Master of Business Administration (MBA). Con más de 19 años de experiencia en minería de cobre oro y fierro. Ha liderado equipos de operaciones, ingeniería de procesos y servicios técnicos. Actualmente se desempeña como Lead Technology Blast Engineering en Orica Latino América

Nombre del coautor (1): Jair Fernando Alarcón

Zamorano

Cargo: Lead Specialist, Orica Latinoamérica

Empresa: ORICA

Correo electrónico: [jair.alarcon@orica.com](mailto:jair.alarcon@orica.com)

Teléfono / Celular : (56-2) 2715-3982/+56 9 9822 2865

Dirección: Av. Costanera Sur 2730, piso 3, Las Condes, Región Metropolitana, Chile