

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Optimización del *Throughput* en la planta de procesos  
mediante el aumento de porcentaje de finos, aplicando  
cambios en las variables de perforación y voladura en  
una mina de Cuzco-Perú**

Giancarlo Rafael Reynaldi Roman

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero de Minas

Arequipa, 2019

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a Dios y mi familia.

A Dios por estar a mi lado en cada paso y  
decisión que tomo.

A mis padres por guiarme por el camino de  
superación.

A mi esposa e hijos por estar a mi lado siempre  
apoyándome, por brindarme tiempo y  
comprensión para culminar mis tesis.

A mis amigos, maestros y colegas quienes me  
han apoyado y por sus consejos

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por guiarme a lo largo de toda mi vida, porque él es la fortaleza que necesito en momentos de dificultad.

A mi familia, por ser los pilares de mi vida, quienes siempre apoyan mis metas, por su confianza, sus consejos y valores y principios.

A la universidad que me permitió afianzar mis conocimientos a lo largo de mi carrera profesional, a los docentes que me han brindado sus conocimientos.

## Resumen

La perforación y voladura es un proceso clave dentro de la cadena operativa en toda mina, ya que es la primera operación del ciclo minero y sus resultados son condicionantes en gran medida para el rendimiento y costos de las operaciones subsiguientes.

Es así que el presente proyecto tuvo como objetivo principal aumentar el *throughput* en la Planta de Procesos mediante la generación y aumento del porcentaje de finos, a través de cambios en las variables de perforación y voladura, de modo que se pueda evaluar el impacto económico de la reducción de tamaño de minerales, con altos índices de dureza, en las etapas de chancado y molienda. Además, se pretende lograr que las curvas granulométricas sean modeladas y controladas significaría para operaciones en la mina, esto será un avance de modo que reafirme su compromiso con la innovación y la mejora continua.

Además del impacto positivo que significó el aumento en el *throughput* respecto a la generación de ingresos por ventas de concentrado, también cabe recalcar lo siguiente: la energía utilizada en el proceso de conminución constituye entre el 50% y 70% del total del consumo energético en el procesamiento de minerales.

El proyecto fue satisfactorio de acuerdo al análisis granulométrico, pues el P80 de la línea mejorada se redujo a 1.48", comparada con el de la línea base que fue de 3.70", por lo que se obtuvo un aumento en el *throughput* en 166 TMS/H (toneladas métricas secas por hora) promedio. Esto significa un ingreso anual adicional de US\$ 17.38 MM (millones de dólares).

**Palabras clave:** perforación, voladura, aumento de *throughput*, porcentaje de finos.

## **Abstract**

Drilling and Blasting is a key process within the operating chain in all mines, since it is the first operation of the mining cycle and its results are largely conditioning the performance and costs of subsequent operations.

Thus, the main objective of this project was to increase the *throughput* in the Process Plant by generating and increasing the percentage of fines, through changes in drilling and blasting variables, so that the economic impact of the reduction of mineral size, with high hardness indexes, in the crushing and grinding stages. In addition, achieving that the granulometric curves are modeled and controlled would mean an advance for Mina Operations so that it reaffirms its commitment to innovation and continuous improvement.

In addition to the positive impact of the increase in *throughput* with respect to income generation from concentrate sales, the following should also be emphasized: the energy used in the comminution process constitutes between 50% and 70% of the total energy consumption in the processing of minerals.

The project was satisfactory, according to the granulometric analysis, the P80 of the improved line was reduced to 1.48 ", compared to the baseline that was 3.70", obtaining an increase in *throughput* of 166 TMS/H (dry metric tons per hour) average. This means an additional annual revenue of US \$ 17.38 MM (millions of dollars).

**Keywords:** drilling, blasting, increased *throughput*. Percentage of fines.

## Lista de Contenidos

Portada.....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimientos .....	iii
Resumen .....	iv
Lista de Contenidos .....	vi
Lista de Tablas .....	ix
Lista de Figuras .....	ix
Introducción .....	xiii
<b>Capítulo I: Planteamiento del Estudio</b> .....	<b>14</b>
1.1. Planteamiento y Formulación del Problema.....	14
1.1.1. Planteamiento del problema .....	14
1.1.2. Formulación del problema.....	14
1.2. Objetivos .....	15
1.2.1. Objetivo general.....	15
1.2.2. Objetivos específicos .....	15
1.3. Justificación e Importancia.....	15
1.4. Hipótesis.....	16
1.5. Operacionalización de Variables.....	16
<b>Capítulo II: Marco Teórico</b> .....	<b>18</b>
2.1. Antecedentes del Problema.....	18
2.2. Definición de Términos Básicos.....	20
<b>Capítulo III: Metodología</b> .....	<b>30</b>
3.1. Métodos y Alcance de la Investigación .....	30
3.1.1. Tipo de investigación .....	30
3.1.2. Nivel de investigación .....	30
3.2. Diseño de la Investigación .....	30
3.3. Población y Muestra .....	30

3.3.1. La población .....	30
3.3.2. Muestra.....	30
3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	31
3.4.1. Fuentes.....	31
3.4.2. Diagnóstico y diseño de la nueva propuesta .....	32
<b>Capítulo IV: Análisis y Diagnóstico del Problema .....</b>	<b>37</b>
4.1. Ubicación de la Mina .....	37
4.1.1. Plano de ubicación.....	37
4.1.2. Plano de accesibilidad .....	38
4.2. Antecedentes.....	38
4.3. Características de la Roca Mineralizada .....	39
4.3.1. Línea base .....	43
4.3.1.1. <i>Perforación</i> .....	43
4.3.2. Última voladura con línea base realizada el 27 de octubre del 2018.....	45
4.3.2.1. <i>Antecedentes</i> .....	45
4.3.2.2. <i>Diseño de salida por simulación</i> .....	46
4.3.2.3. <i>Resultados</i> .....	47
4.3.2.4. <i>Análisis de fragmentación</i> .....	48
<b>Capítulo V: Aplicación de la Línea Mejorada .....</b>	<b>51</b>
5.1. Línea Mejorada.....	51
5.1.1. Burden y espaciamiento de la malla de perforación .....	51
5.1.2. Diámetro y longitud de los taladros .....	53
5.1.3. Voladura línea mejorada.....	54
5.1.4. Aplicación de la línea mejorada .....	54
5.1.4.1. <i>Primera voladura línea mejorada</i> .....	54
5.1.4.2. <i>Segunda voladura línea mejorada</i> .....	60
5.1.4.3. Tercera Voladura Línea Mejorada .....	64
5.1.4.4. Cuarta Voladura línea mejorada.....	68



5.1.5.	Cantidad de explosivo utilizado y tonelaje generado por proyecto de voladura	75
5.1.6.	Optimización en la generación de microfracturas del material volado	77
5.1.7.	Optimización en el tiempo de carguío y productividad de pala	78
5.1.8.	Optimización en el <i>Throughput</i> de planta	79
5.1.9.	Optimización en el <i>throughput</i> de mina	81
5.2.	Evaluación Económica	82
5.2.1.	Costos Unitarios en perforación y voladura	82
5.2.2.	Venta Anual Estimada por aumento en <i>Throughput</i>	86
<b>Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones</b>		<b>88</b>
Conclusiones		88
Recomendaciones		89
Referencias Bibliográficas		90
Anexos		92

## Lista de Tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables .....	16
Tabla 2. Factor de potencia - mineral .....	43
Tabla 3. Promedio de factor de Potencia .....	46
Tabla 4. Factor de potencia para línea mejorada.....	54
Tabla 5. Factor de potencia primera voladura línea mejorada .....	54
Tabla 6. Factor de potencia segunda voladura línea mejorada .....	60
Tabla 7. Factor de potencia tercera voladura línea mejorada .....	65
Tabla 8. Factor de potencia primera cuarta línea mejorada.....	69
Tabla 9. Factor de potencia y P80 de la línea Mejorada.....	72
Tabla 10. Factor de potencia de la línea mejorada promedio P80 – 1.48.....	73
Tabla 11. Análisis granulométrico ingreso chancadora primaria línea base .....	74
Tabla 12. Análisis granulométrico ingreso chancadora primaria línea mejorada .....	75
Tabla 13. Tiempo de carguío y productividad de pala .....	78
Tabla 14. Cuantificación del resultado de optimización del Througput .....	80
Tabla 15. Cuantificación optimizada del resultado de optimización del Througput .....	82
Tabla 16. Costos unitarios en perforación y voladura .....	83
Tabla 17. Parámetros de perforación.....	83
Tabla 18. Costo de perforación.....	84
Tabla 19. Incrementos de costos en voladura .....	84
Tabla 20. Costos de accesorios de voladura .....	85
Tabla 21. Costos y sobrecostos de perforación.....	85
Tabla 22. Estimación anual del sobrecosto de perforación y voladura .....	86
Tabla 23. Consideraciones para el cálculo de la utilidad adicional anual.....	86
Tabla 24. Toneladas adicional al año por aumento de Througput .....	87
Tabla 25. Ganancia adicional estimada anual .....	87

## Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Yacimiento de mineral .....	20
<i>Figura 2.</i> Perforación .....	22
<i>Figura 3.</i> Razón de reducción .....	23
<i>Figura 4.</i> Ciclo de acarreo.....	27
<i>Figura 5.</i> Esferas para análisis de fotos.....	34
<i>Figura 6.</i> Análisis de fotos utilizando Split Desktop.....	35
<i>Figura 7.</i> Análisis granulométrico.....	35
<i>Figura 8.</i> Plano de ubicación .....	37
<i>Figura 9.</i> Plano de accesibilidad .....	38
<i>Figura 10.</i> Características de la roca mineralizada .....	40
<i>Figura 11.</i> Mineralización presente en el área de extracción .....	40
<i>Figura 12.</i> Características geológica de la mina .....	41
<i>Figura 13.</i> Niveles de dureza .....	41
<i>Figura 14.</i> Modelos de bloques.....	42
<i>Figura 15.</i> Mallas habituales con espaciamiento 10.5 y burden 9.1.....	43
<i>Figura 16.</i> Diseño de carga para taladros línea base .....	45
<i>Figura 17.</i> Simulación de secuencia de salida .....	46
<i>Figura 18.</i> Resultados de voladura programada.....	46
<i>Figura 19.</i> Ausencia de gases nitrosos.....	47
<i>Figura 20.</i> Frentes amarrados.....	48
<i>Figura 21.</i> Fotografías para el análisis en Split-Desktop.....	49
<i>Figura 22.</i> Análisis de las fotos con el <i>software</i> .....	49
<i>Figura 23.</i> Resultado del análisis de fragmentación $P80=3.70''$ .....	50
<i>Figura 24.</i> Mallas mejorada con espaciamiento 8.0 y burden 7.0 sin sobre perforación.....	52
<i>Figura 25.</i> Tiempo de detonación en mallas mejorada .....	53
<i>Figura 26.</i> Diseño de carga, línea mejorada .....	55
<i>Figura 27.</i> Prevoladura .....	55
<i>Figura 28.</i> Simulación de secuencia de salida .....	56
<i>Figura 29.</i> Fotografías de secuencia del disparo .....	56
<i>Figura 30.</i> Fotografía post voladura – 1.....	57

<i>Figura 31.</i> Fotografía post voladura – 2. ....	57
<i>Figura 32.</i> Postvoladura sin presencia de gases nitrosos.....	58
<i>Figura 33.</i> Toma de fotografías para análisis granulométrico .....	58
<i>Figura 34.</i> Análisis de distribución granulométrica por imágenes .....	59
<i>Figura 35.</i> Resultado del análisis de fragmentación P80=1.62”.....	59
<i>Figura 36.</i> Diseño de carga, línea mejorada .....	60
<i>Figura 37.</i> Prevoladura .....	61
<i>Figura 38.</i> Simulaciones de la secuencia de salida, disparo ciego. ....	61
<i>Figura 39.</i> Secuencia de disparo. ....	62
<i>Figura 40.</i> Fotografía postvoladura .....	62
<i>Figura 41.</i> Voladura con leve generación de gases.....	63
<i>Figura 42.</i> Resultado del análisis de fragmentación P80=1.49”.....	63
<i>Figura 43.</i> Fotografía de prevoladura.....	64
<i>Figura 44.</i> Diseño de carga, tercera voladura-línea mejorada .....	65
<i>Figura 45.</i> Simulación de secuencia de Inicio de disparo .....	66
<i>Figura 46.</i> Secuencia de voladura. ....	66
<i>Figura 47.</i> Esponjamiento y fragmentación superficial.....	67
<i>Figura 48.</i> Voladura con mínima presencia de gases nitrosos.....	67
<i>Figura 49.</i> Resultado del análisis de fragmentación P80=1.48”.....	68
<i>Figura 50.</i> Diseño de carga, cuarta voladura-línea mejorada .....	69
<i>Figura 51.</i> Fotografía prevoladura.....	69
<i>Figura 52.</i> Inicio de detonación .....	70
<i>Figura 53.</i> Secuencia de detonación.....	70
<i>Figura 54.</i> Fotografía postvoladura.....	71
<i>Figura 55.</i> Postvoladura sin emisión de gases.....	71
<i>Figura 56.</i> Resultado del análisis de fragmentación P80=1.46”.....	72
<i>Figura 57.</i> Explosivo utilizado y tonelaje generado por proyecto de voladura.....	76
<i>Figura 58.</i> Factor de potencia (kg/tn) .....	77
<i>Figura 59.</i> Carga de rotura y resistencia a la compresión uniaxial.....	78
<i>Figura 60.</i> Optimización en el tiempo de carguío y productividad de pala - Time Loading vs. Productividad .....	79
<i>Figura 61.</i> Diagramas de Throughput .....	80

<i>Figura 62. Optimización en el Throughput TMS L base Vs TMS L mejorada. ....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 63. Optimización en el Throughput – línea base vs. línea mejorada.....</i>	<i>82</i>

## Introducción

Según el área de geología de la mina en estudio, la mineralización de mayor grado se correlaciona con las zonas de mineral hipógeno con alteración fílica y potásica. En el pórfido la mayoría de la mineralización ocurre como disseminaciones, Stock Works de vetas de cuarzo y relleno de sulfuros por fractura, asociado principalmente con el pórfido de monzonita 1, además la matriz es rosácea, con magnetita más pequeña y cristales de ortoclasa.

Con la presente tesis titulada “Optimización del *throughput* en la planta de procesos mediante el aumento de porcentaje de finos, aplicando cambios en las variables de perforación y voladura en una mina de Cuzco-Perú”, se busca Aumentar el *throughput* en la Planta de Procesos mediante el incremento de finos (<1.5") y generación de microfracturas (#) en mineral. Se tuvo en cuenta que para el caso considerado se tiene una alimentación diaria de la planta de 75Ktpd (Kilo toneladas por día), sin embargo, con la información obtenida, se identificó que al procesar mineral tipo hipógeno con alteración potásica el *throughput* tendía a disminuir debido a que las etapas de chancado y molienda presentaban problemas para la conminución de este tipo de material específico por su alto índice de dureza. Todo esto hacía que casi nunca se cumpla el nuevo “target” propuesto de 90Ktpd.

Para solucionar el problema antes descrito se realizara cambios en las variables de perforación y voladura, disminuyendo el burden y espaciamiento para aumentar el factor de potencia del explosivo, cambiando el diseño de la malla de perforación de cuadrada a triangular equilátera obteniendo mejor interacción entre taladros, cambiar y combinar diseños de amarre o conexión entre taladros, con todos estos cambios se podrá disminuir la granulometría de la roca fragmentada y cumplir con la nueva meta de planta de procesos.

Es necesario analizar el *throughput* en la Planta de Procesos, antes y después de aplicar estos cambios en las variables de perforación y voladura, y con estos resultados evaluar el impacto económico, que se obtuvo con la reducción del tamaño de minerales, con altos índices de dureza, en las etapas de chancado y molienda.

## Capítulo I: Planteamiento del Estudio

### 1.1. Planteamiento y Formulación del Problema

#### 1.1.1. Planteamiento del problema

El yacimiento en estudio presenta una alta mineralización hipógena, trayendo dificultades en su procesamiento y disminución en el *throughput* debido a que las etapas de chancado y molienda presentaban problemas para la conminución de este tipo de material específico por su alto índice de dureza. Como consecuencia la meta propuesta de 75Ktpd no se cumplía. Lo alarmante es que el yacimiento contiene el 84% de mineral tipo hipógeno, a esto se suma que operaciones Planta quiere aumentar su producción de procesamiento de mineral de 75Ktpd a 90Ktpd

Es necesario realizar cambios en las variables de perforación y voladura reduciendo los parámetros de perforación y aumentando el factor de potencia del explosivo para obtener fragmentos más pequeños, de modo que se pueda evaluar el impacto económico de la reducción de tamaño de minerales, con altos índices de dureza, en las etapas de chancado y molienda. Además, es necesario lograr que las curvas granulométricas sean modeladas y controladas, esto significaría para operaciones mina un avance significativo de modo que reafirme su compromiso con la innovación y la mejora continua.

#### 1.1.2. Formulación del problema

Por lo planteado anteriormente se formula la siguiente pregunta; ¿Es posible aumentar el *throughput* en la Planta de Procesos mediante la generación de porcentaje de finos a través de cambios en las variables de perforación y voladura en un yacimiento de cobre con 84% de mineral tipo hipógeno y en menores proporciones minerales tipo supérgeno , skarn , mixto y highzinc?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Aumentar el *throughput* en la Planta de Procesos mediante el incremento de finos ( $P_{80} < 1.5''$ ) y generación de microfracturas (#) en mineral, mediante pruebas y análisis de resultados de cambios en las variables de perforación y voladura, de modo que se evalúe la influencia del proyecto en la rentabilidad de la operación global.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Realizar la fragmentación de roca teniendo en cuenta las características geológicas, dureza y tipo de mineral, y utilizar un adecuado diseño de malla de perforación y columna de carga explosiva de voladura.
- Lograr que las curvas granulométricas sean modeladas y controladas.
- Disminuir el tiempo de carguío de la pala y aumentar sus productividades.
- Reducir el consumo de energía en las etapas de chancado y molienda.
- Brindar una mayor flexibilidad a las distintas áreas de planta.

## **1.3. Justificación e Importancia**

La presente investigación es necesaria debido a que la perforación y voladura es un proceso clave dentro de la cadena operativa en toda mina, ya que es la primera operación del ciclo minero y sus resultados son los condicionantes, en gran medida, de los rendimientos y los costes de las operaciones subsiguientes (Dávila, 2015).

Por ello es importante realizar mejoras en este proceso, ya que representará un impacto positivo que se evidencia en el aumento del *throughput* respecto a la generación de ingresos por ventas de concentrado, además la mina en estudio está comenzando a trabajar con un mineral más duro, este factor no puede ser controlado por la operación, lo que lleva a un aumento de tiempo para su respectiva reducción de tamaño. Es así que para un flujo de alimentación constante, el volumen de la carga aumentará junto con la dureza del mineral.



Finalmente, según los informes del área de granulometría el Run Of Mine (ROM) no es uniforme en lo que respecta a su composición y presenta un tamaño de partícula demasiado grueso y duro para seguir el proceso de conminución. Este tamaño de partículas está relacionado además con la cantidad de energía necesaria para fracturar y moler el mineral a un tamaño específico. Inherente al propósito técnico (reducción de tamaño), obviamente existe un fundamento económico, ya que por una parte se busca maximizar la recuperación de las especies de valor en el proceso (recuperación metalúrgica, grado de concentrado) y, por otro lado, se busca minimizar los costos de operación.

Por lo tanto los cambios de variables y diseño en perforación y voladura aumentarían el *throughput* en la Planta de Procesos mediante el incremento de finos (<1.5") y generación de microfracturas (#) en mineral.

#### 1.4. Hipótesis

El incremento del *throughput* en la planta de procesos mediante la generación y aumento del porcentaje de finos, a través de cambios en las variables de perforación y voladura, influye positivamente en la rentabilidad de la operación global en una mina a tajo abierto.

#### 1.5. Operacionalización de Variables

Tabla 1

*Operacionalización de variables*

Variable	Indicadores
<b>Variable independiente</b>	Burden y espaciado de la malla de perforación.
Parámetros de perforación y voladura	Diámetro y longitud de los taladros. Factor de carga del explosivo. Factor de Potencia del explosivo.
<b>Variable dependiente</b>	Rentabilidad de Mineral, según el mercado internacional

---

Rentabilidad de la operación  
global en una mina a tajo abierto

Incremento de Finos, adecuados para  
procesar en Chancadora Primaria

---

Consumo de energía

Generación de micro fracturas para facilitar  
el chancado de los fragmentos

---

Paradas no programadas

---

## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes del Problema

Poma (2012) en su tesis titulada “Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso de Gold Mill” realiza un estudio sobre la problemática del *throughput* de la Planta Gold Mill, específicamente en la operación de la Chancadora Primaria, donde halló una reducción de trabajo de 800 a 720 tph, por lo cual el autor analizó los procesos operativos relacionados con la obtención del material fragmentado de la Chancadora Primaria con el objetivo de determinar las causas del problema. Encontró que el tamaño de la fragmentación obtenida en las operaciones de perforación y voladura es influyentes en el *throughput*. En el análisis del proceso operativo los autores pudieron establecer que el 80% de la roca existente en el Tajo “El Tapado” es de tipo sílice masiva de dureza alta (UCS mayor a 150 Mpa) y que se obtuvo P80 de 14.6 cm, el cual afectaba el *throughput*. El autor realizó un aumento en el factor de potencia mediante la reducción de los parámetros de perforación (burden y espaciamiento), el cambio en el tiempo de detonación utilizando detonadores electrónicos para trabajar con tiempos cortos de 4ms y 6ms, relación de impedancia de 324 Kcal/tn. Este autor usando el *software* Power Sieve analizó los finos de material fragmentado, obteniendo la disminución del P80 de 14.6 a 6.5 cm., con lo cual el *throughput* tuvo una mejora de 720 a 841 tph, consiguiendo mejoras en la Chancadora Primaria de la Planta Gold Mill.

Calderón (2015) en su tesis titulada “Optimización de las prácticas de perforación y voladura en el avance y producción de la minería de mediana escala– Unidad minera Macdesa” muestra que, el diseño de la perforación y voladura, las características mecánicas y físico-químicas, así también, la estratigrafía y los rasgos estructurales del macizo rocoso juegan un papel significativo, así, el principio de una correcta voladura se fundamenta en un óptimo diseño de la malla e inspección al proceso de perforación. Para el desarrollo de la investigación, el autor realizó un diagnóstico de las operaciones de minado y sus consecuencias respecto a los costos de operación de la minera, seguido por la utilización de factores de mejora de perforación y voladura que le permitieron proponer

propuestas de mejoras mediante el control operativo y por ende la disminución de los costos operativos de la empresa. El autor buscó optimizar las metodologías de perforación y voladura para perfeccionar el avance y la producción, minimizar costos en la Minera Macdesa, el diseño de una malla de perforación y voladura en base a la programación geomecánicas, permitió optimizar la distribución de la energía, optimizar las operaciones unitarias, facilitando la limpieza, carguío, acarreo, transporte y molienda del material.

Huanca (2018) en su trabajo titulado “Predicción de la fragmentación en la voladura de bancos de producción de la unidad minera Tacaza”, busca optimizar la fragmentación del material volado de los bancos de producción proveniente del tajo y alcanzar un tamaño con un 80% de fragmentos menores a cinco pulgadas utilizando modelos matemáticos, para obtener un aumento en el *throughput* de la chancadora primaria de la planta, y así, acrecentar el volumen del tratamiento de planta. Por lo que el autor realizó un estudio comparativo, de la fragmentación predicha versus la fragmentación obtenida, identificando que el modelo matemático Kuz-Ram es el más confiable, ya que devuelve resultados variando los parámetros de perforación y voladura con una variación de +-3%, con este diseño de perforación y voladura (burden y espaciamiento de 1.80 m X 1.80 m a 1.50 m x 1.50 m) logrando obtener la fragmentación requerida, además se evidencio un incremento de la producción en la planta concentradora de 743 toneladas métricas secas por día (TMSD) hasta 820 TMSD, finalmente se obtuvo una reducción del costo de producción de 25.34 US\$/tms a 21.03 US\$/tms.

Jáuregui (2009) en su tesis titulada “Reducción de los costos operativos en mina, mediante la optimización de los estandartes de las operaciones unitarias de perforación y voladura” el cual tuvo como objetivo presentar la factibilidad de la minimización de precios operativos en una empresa minera, utilizando estándares óptimos de trabajo en las operaciones de perforación y voladura, para lo cual se realizó un control y medición exhaustiva de las operaciones y capacitaciones continuas, la implementación y aplicación de los estándares aseguran una operación económicamente rentable.

## 2.2. Definición de Términos Básicos

**Minerales.** Sustancias inorgánicas naturales que poseen una composición y estructura química definida (Agreda, 2006).

**Mena.** Es la asociación de minerales de los que puede ser obtenidos uno o varios los cuales a la vez darán un valor económico rentable. La mena está constituida por dos partes: el mineral es la parte relativamente abundante del metal que se desea extraer y que muestra una composición química bien definida y la ganga, la cual se considera como desperdicio o mineral estéril (Agreda, 2006).

**Ganga.** Material que se descarta al extraer la mena de un yacimiento de mineral, por carecer de valor económico. Generalmente está constituida por especies principalmente cuarzo, mineralógicas terrosas o pétreas, o ciertos minerales metálicos sin valor comercial como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), etc. y otros que son perjudiciales como arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), rejalgar ( $\text{AsS}$ ), oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), estibina ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), etc. (Dávila, 2015).

**Yacimiento.** Proviene de procesos geológicos que llevan a la concentración anómala, sea en volumen de explotación de minerales de interés económico. Los yacimientos de cobre porfídico se caracterizan por la presencia de vetillas mineralizadas y no mineralizadas que constituyen parte en su evolución. (ITG, 2004)

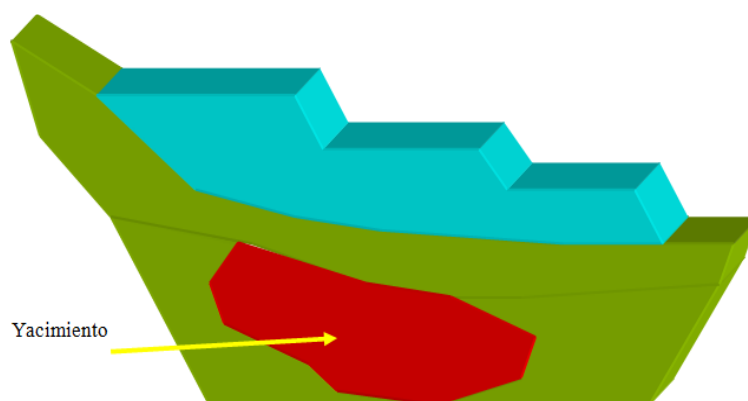


Figura 1. Yacimiento de mineral. Adaptado de "Métodos de explotación a cielo abierto", por E. Aviles, 2004.

**Mineralización.** Proceso por el cual se concentran minerales de mena en las rocas, puesto que en la generalidad de los casos los minerales de mena se concentran posteriormente a la formación de la roca (Poma, 2012).

**Alteración.** Es un proceso (hidratación, oxidación, etc.) generalmente tardío y superficial, que transforma un mineral en otro (u otros) (Poma, 2012).

**Litología.** Conjunto de caracteres petrográficos de una masa de rocas que se caracterizan por formaciones, estratos y otros (ITG, 2004).

**Ley.** Concentración de un elemento, metal o mineral en una roca o en una mena, expresada en porcentaje en peso (salvo algunas excepciones). Ley de *cut off*: Manejada o comandada por el sistema de tratamiento. Ley más baja con la cual un yacimiento puede ser explotado de una manera rentable con respecto a un mineral dado. Ley de cabeza: ley que presenta el material que sale del tajo o, lo que es lo mismo, con la que el material llega a la planta de tratamiento. (ITG, 2004)

**Perforación.** La perforación (figura 2) es la primera parte de la minería y consta de las siguientes Variables:

- Diámetro de taladro. Diámetro del hoyo perforado.
- Burden. Distancia más corta al punto de alivio en el momento que un taladro detona.
- Espaciamiento. Distancia entre taladros en una misma fila.
- Altura de banco. Es la altura de un nivel de minado a otro nivel.
- Sobre perforación o pasadura. Es la perforación adicional a la altura de banco para asegurar el nivel de piso del banco inferior.

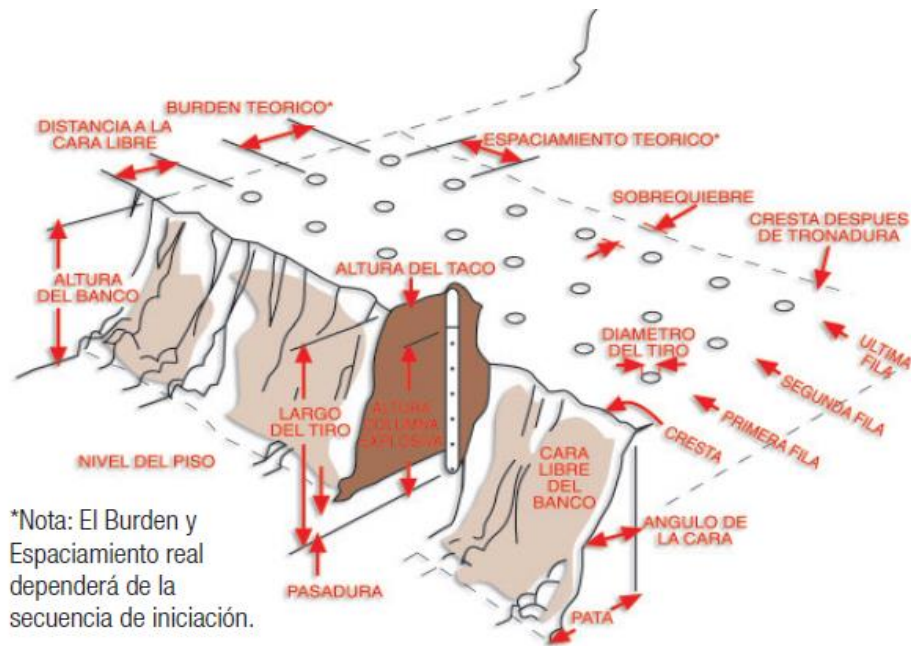


Figura 2. Perforación. Adaptado de “Guía del explosivista” por Empresa Enaex de Chile, 2006. Recuperado de [www.enaex.com](http://www.enaex.com)

Tomando en cuenta el modelo geológico de reservas vigente, el área de planeamiento de mina define la secuencia de perforación de acuerdo al plan de extracción y alimentación a la planta de procesos establecido en el presupuesto anual. Esta secuencia es generada en forma de contornos definidos como proyectos de voladura, los cuales son enviados al área de Perforación y Voladura (P&V) para el diseño de malla y carga explosiva respectivo. El diseño del proyecto de voladura toma en cuenta el tipo de material y dureza del macizo rocoso (ITG, 2004).

Una vez marcada la malla en campo, se inicia con el proceso de perforación para lo cual se cuenta con 03 perforadoras Pit Viper-271, en el presente trabajo reduciremos el burden y el espaciamiento, para mejorar la interacción en los taladros.

**Voladura.** Una vez culminada la perforación, el área de geología realiza el muestreo de los conos generados como producto de la perforación con la finalidad de enviar las muestras al laboratorio y usar dicha información en la generación de los polígonos de minado. Paso seguido, se inicia el proceso de carguío de taladros siguiendo estrictos protocolos de seguridad y cumplimiento del diseño de carga

establecido. Asimismo, las voladuras se llevan a cabo generalmente al medio día. El informe de una voladura contiene información relevante tales como los resultados del monitoreo de vibraciones, presión sonora y detalles particulares de cada disparo. El resultado de cada voladura de mineral es analizado al detalle, debido a su relevancia en las siguientes etapas del proceso. (López & López, 2013), para el presente trabajo se incrementará el factor de potencia.

**Factor de carga & factor de potencia.** Describe la cantidad de explosivo usado para romper un peso unitario de roca. El Factor de Carga tiene como unidades dimensionales al kg/m<sup>3</sup> (comúnmente usado en minería subterránea), mientras que el factor de potencia tiene como unidades dimensionales al kg/ton (comúnmente usado en minería superficial) (ITG, 2004).

**Conminución.** Es la reducción de tamaños de rocas grandes en fragmentos pequeños de tamaños específicos. Con este proceso, la energía cinética mecánica de una máquina u objeto es transferida a un material produciendo en él, fricciones internas y calor que originan su ruptura (Marcañaupa, 2008).

**F<sub>80</sub>.** Es el tamaño de abertura de malla por donde pasa el 80% del material inicial, en micrones (Marcañaupa, 2008).

**P<sub>80</sub>.** Es el tamaño de abertura de malla en la que pasa el 80% del producto obtenido, en micrones (Marcañaupa, 2008).

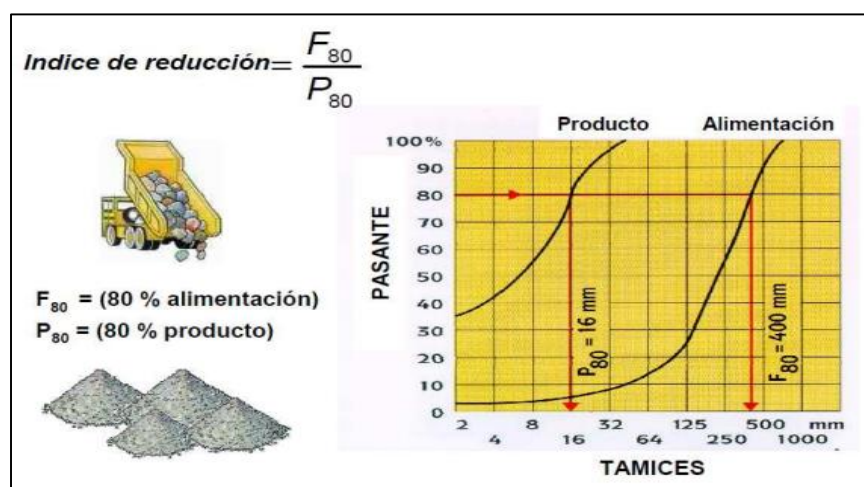


Figura 3. Razón de reducción. Adaptado de “Razón de reducción”, por FIUBA facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires-Trituración y Molienda, 2013



**Carguío.** Una vez realizada la voladura de un material, y establecidas las características de dicho material en el polígono correspondiente, el polígono queda dispuesto para su minado en correspondencia con el plan de corto plazo (López & López, 2013).

El minado se realiza mediante tres (03) palas Hitachi EX5600-6 de 27m<sup>3</sup> de capacidad nominal y un (01) cargador frontal CAT 994H, como complemento, de 19 m<sup>3</sup> de capacidad nominal. Este cargador es requerido para que proporcione flexibilidad en el *blending*. Asimismo, la altura máxima del frente de minado será siempre de 15 metros, teniendo la obligación de bajar la altura en caso esta exceda esta medida.

**Equipos auxiliares.** Se incluyen equipos auxiliares que no son directamente responsables de la producción, pero se necesita su programación regular en la mina para trabajos de mantenimiento de vías de acarreo, mitigación del polvo, perfilado de taludes, conformación y/o empuje en las zonas del WRF y TMF, etc. (Poma, 2012).

**Ignition.** Es un *software* basado en lenguajes de programación y sistemas de generación como servidores web, bases de datos y OPC-UA. Este *software* permite visualizar datos en tiempo real, ver alarmas, diagnosticar problemas y controlar los procesos de la Planta de producción (Vidal, 2015).

**MineSight.** *Software* especializado en minería, utilizado en la optimización de pit, diseño de mina, Planeamiento a largo plazo (LTP), planeamiento a mediano plazo (MTP), planeamiento a corto plazo (STP) y requerimiento de flota (Vidal, 2015).

**Control Sense System.** Es un *software* que integra a la perfección todos los aspectos de las operaciones mineras, lo que permite la configuración, gestión, control y optimización de toda la flota en la operación. Todo esto es posible gracias a las tecnologías GPS, sucesiones de algoritmos de optimización de procesos matemáticos, etc. Esta aplicación provee información importante y precisa tales como las posiciones de las palas en los frentes de minado, seguimiento al acarreo

y los puntos de descarga, estados de los equipos en la operación y las productividades de los mismo, tipos de material y sus características mineralógicas y metalúrgicas, registro de los ciclos (tiempos), etc. Cabe recalcar que el optimizador depende de varios parámetros, que el controlador deberá ingresar a manera de estrategia, para que el optimizador llegue a la mejor repuesta (Vidal, 2015).

**Estados de los equipos de campo.** Los equipos pueden estar en diversos estados, esto dependerá del desarrollo de labores dentro del campo de operaciones, para ello, en el Control Sense System se han considerado cinco estados que se podrán visualizar a lo largo de las actividades que desarrollan los equipos en campo; entre las actividades tenemos (López & López, 2013):

- **Ready.** El presente estado indica que el equipo se encuentra realizando alguna actividad asignada por el centro de control. En este estado pueden ocurrir todos los cambios de actividad de los equipos de acarreo y carguío. Asimismo, si fuera necesario un cambio de operador del equipo de carguío, obligatoriamente tendrán que realizarse en un estado diferente a *ready*. Como ya lo mencionamos anteriormente, *ready* no se podrá visualizar en la zona de estados descrita, ya que los equipos que se encuentran en este estado generalmente se encuentran realizando una actividad propia del ciclo de trabajo. En conclusión, es el tiempo que el equipo se encuentra funcionando con regularidad.
- **Delay.** Este estado nos muestra que existe una dilación, retraso o demora operativa, que pueden ser ocasionados por diversas razones, es decir, los equipos se encuentran con el motor en funcionamiento, pero sin realizar una actividad, puesto que se trata de una demora habitual de la operación.
- **Standby.** En este estado sucede algo similar al estado *delay*, ya que la demora es de carácter operativo. Sin embargo, la diferencia radica en que el equipo se encuentra con el motor apagado, debido a que se trata de una demora que no está relacionada directamente al ciclo regular de la operación.

- **Maint.** Nos muestra que el equipo se encuentra en mantenimiento, esto quiere decir que el equipo se encuentra en el taller con los técnicos de mantenimiento o en el área de mantenimiento.
- **Outofplan.** No se considera al equipo para la optimización y realización del trabajo operativo, debido a diversas causas, por ejemplo, ya sea que un camión nuevo que está por ensamblar y armar o ya sea uno que está desarmado y no podrá ser considerado dentro del plan operativo. Este estado nos muestra que un equipo sale de los cuatro estándares y por lo general no se encuentra considerado en el plan de operaciones.

**Tiempo de motivos-KPI de mantenimiento.** Disponibilidad% (Av): Representa un porcentaje del tiempo total en que el equipo está disponible para la operación (ITG, 2004).

**Uso de la disponibilidad% (UOA).** Porcentaje que representa el tiempo relacionado directamente con la operación desde el momento en que el equipo no está en mantenimiento, este porcentaje indica cómo se gestiona el tiempo en espera.

**Uso% (Uso).** Porcentaje que indica cómo se gestiona el tiempo de demora en la operación.

**Usage% (USG).** Porcentaje que indica el tiempo que el equipo estaba trabajando con respecto al tiempo en que el equipo no está en mantenimiento.

**Utilización% (Utz).** Porcentaje que indican el tiempo que el equipo estuvo operativo con respecto al tiempo total disponible para el equipo.

### **Parámetros y Fórmulas de Productividad**

**EFH (Equivalent Flat Haul)-Equivalente del transporte Fleet.** Este parámetro transforma las distancias de gradiente en un plano, en la forma en que se podría hablar de la misma unidad de medida de la distancia.  $EFH \text{ distancia} = \text{Distancia} \times \text{velocidad a un gradiente de } 0 / \text{velocidad en una pendiente diferente de } 0$ : (López & López, 2013).

**Cola (%).** Este porcentaje indica, en función del tiempo de ciclo de camión, la cantidad de cola en el equipo de carga.  $Queue = \text{tiempo de cola} / \text{tiempo ready}$  de ese camión. (Poma, 2012)

**Productividad de acarreo (t/h).** Se refiere a la cantidad de tonelaje que cargan los equipos de acarreo por unidad de tiempo de operativo, en este caso por hora.  $Productividad\ de\ acarreo = \text{tonelaje} / \text{tiempo ready acarreo}$  (ITG, 2004).

**Productividad de carguío (t/h).** Se refiere a la cantidad de tonelaje que cargan los equipos de carguío por unidad de tiempo operativo, en este caso por hora.  $Productividad\ de\ carguío = \text{tonelaje} / \text{tiempo ready carguío}$  (ITG, 2004).

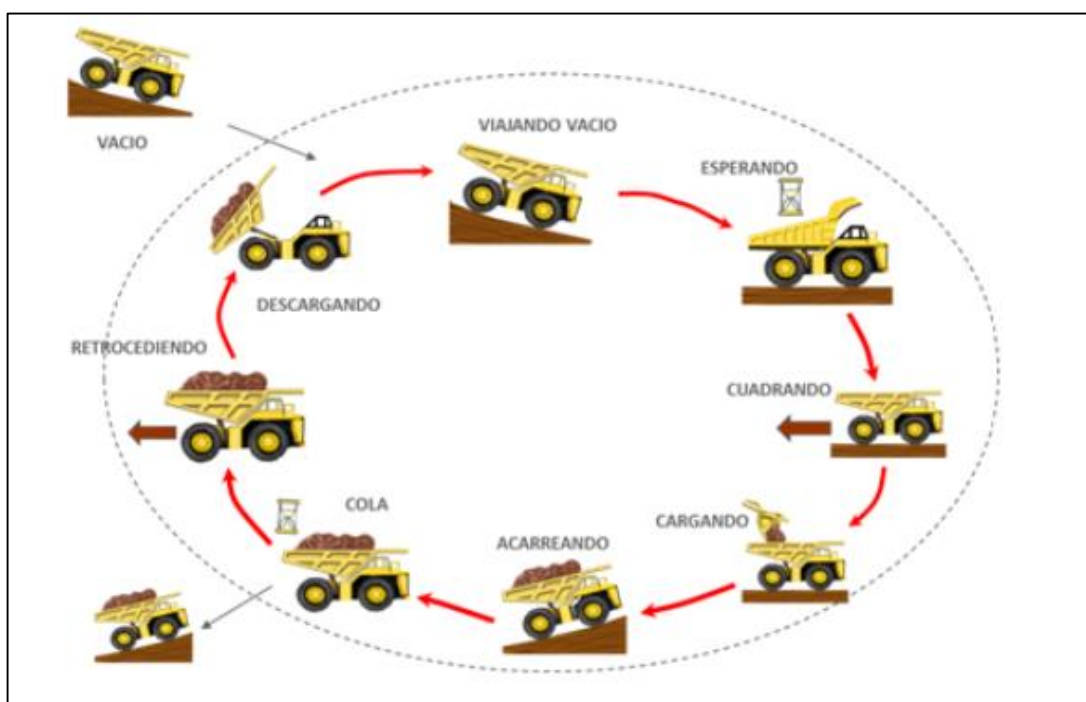


Figura 4. Ciclo de acarreo. Adaptado de "Ciclo de acarreo", por Proyecto de mejoras sistema JMINEOPS-Ing. C. Paredes, 2015

**Productividad efectiva.** Es similar a la productividad de equipos, pero sin el tiempo de suspensión, puede considerarlo como si el equipo de carguío tiene un tiempo de espera igual a 0, esta será la productividad, y también la producción por hora, si el uso de la disponibilidad es 100 %.  $Productividad\ efectiva = \text{tonelaje} / (\text{tiempo ready cargando} - Hang\ Time)$  (ITG, 2004).

**Tasa de excavación.** Se podría entender como si la pala continúa cargando, esta será la producción.  $Dig\ Rate = \text{tonelaje} / \text{tiempo de carga}$ . (ITG, 2004)

**Porcentaje de cola (%).** Este es el porcentaje de tiempo que el equipo de carga está a la espera para los camiones.  $Hang = \text{Hang Time} / \text{tiempo ready cargando}$ . (ITG, 2004)

**BWI (Bond Work Index, Kwh/Tm).** Es el índice de trabajo y se define como la energía total, en kw/h por tonelada, necesaria para reducir una alimentación muy gruesa a un tamaño tal que el 80% del producto pase a través de un tamiz de 80-100 micrones o es la resistencia del material para ser reducido. El BWI, permite hacer estimaciones más reales de las necesidades de energía de las trituradoras y molinos industriales (Samaniego, 2004).

**SPI (SAG Power Index; min).** Se expresa en minutos, y se define como el tiempo necesario para reducir una muestra de mineral desde un tamaño característico (F80) hasta un tamaño característico de producto (P80). Un tiempo de molienda mayor, respecto de la media de la distribución de datos capturados del depósito, indica mayor resistencia a la molienda, es decir, un mineral duro. (López & López, 2013).

**Proceso de minado.** El proceso de minado se divide en dos etapas: preminado y minado. La etapa del preminado consiste en la remoción del material sin valor, con la finalidad de exponer el mineral. Para ello, se aplican las operaciones unitarias de perforación, voladura, carguío y acarreo. Mientras que durante la etapa de minado, el mineral extraído de los tajos, luego de las operaciones iniciales de perforación y voladura, será cargado y acarreado directamente hacia la chancadora, luego pasará por un proceso de molienda y finalmente por un proceso de concentración a través de la Flotación (ITG, 2004).

**Recuperación.** Es el porcentaje del total del metal contenido en el mineral de cabeza que se recupera en el concentrado. (López & López, 2013).

**Concentrado.** Se obtiene por el proceso de concentración, por el que se obtiene material valioso, el cual tiene un valor económico alto por su valor mineralógico.

**Relave.** Es el sobrante del tratamiento de obtención de mineral valioso, está compuesto principalmente por ganga y lleva algo de mena (ITG, 2004).

## **Capítulo III: Metodología**

### **3.1. Métodos y Alcance de la Investigación**

#### **3.1.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada, ya que tiene como objetivo crear nueva tecnología a partir de conocimientos adquiridos a través de la investigación básica para determinar si estos pueden ser útilmente aplicados para propósitos definidos (Tam, Vera, & Oliveros, 2008).

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

El nivel de investigación es experimental y descriptivo, experimental porque se determinará las características de la mejora a implementar, y descriptiva porque es necesario conocer la situación actual y así poder saber esto será posible de contrastar con una mejora implementada.

### **3.2. Diseño de la Investigación**

El diseño cuasiexperimental, ya que el objeto de estudio no fue asignado aleatoriamente, por el contrario, se utiliza una muestra no probabilista intencional.

### **3.3. Población y Muestra**

#### **3.3.1. La población**

Está conformada por la operación de mina, 48 proyectos de perforación y voladura al año, así como también la planta de procesos.

#### **3.3.2. Muestra**

La muestra está conformada por cuatro proyectos de perforación y voladura realizados en un mes.

### **3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

#### **3.4.1. Fuentes**

Se emplearon fuentes primarias, pues la información se obtendrá de la base de datos de la mina antes y después de simular los parámetros de perforación y voladura, aplicando un análisis postvoladura para realizar la mejora continua.

Asimismo, para lograr los alcances planteados anteriormente, es necesario realizar diversas actividades para poder obtener la información, ya que para la elaboración de esta investigación fue necesario realizar la verificación diaria en los frentes de minado de las características granulométricas de los polígonos pertenecientes a los proyectos de voladura con malla reducida.

Además, se tomó muestras relevantes en campo; se *stockearon*, en los *finger*, material de los polígonos de malla reducida para su posterior análisis granulométrico e índice de resistencia a la carga puntual.

También, se recopiló la información de Control Sense: equipos de carguío, frentes de minado, tonelajes acarreados, puntos de descarga, productividades, etc.

Además, se recopiló la información proporcionada por geología: mineralización, litología, alteración, SPI y WBI.

Así como, se recopiló información de perforación y voladura: características de mallas, carga utilizada de explosivos, factores de potencia, tonelajes generados, polígonos pertenecientes a cada proyecto volado, etc.

Igualmente, se recopila información del programa Ignition: velocidades, potencias y tonelajes por línea.

Mientras que las fuentes secundarias empleadas se recopilaron mediante publicaciones de internet, artículos, diarios, libros, entre otras fuentes.



### 3.4.2. Procesamiento estadístico

El procesamiento estadístico se realizó utilizando el análisis de proyección estadística del *software* Split-Desktop.

Asimismo, se realizó la comparación directa del *throughput* (toneladas métricas secas por hora-TMSH) que proporciona el programa de Planta *Ignition*.

Por último, se elaboró cuadros comparativos, obteniendo media y promedio de los resultados operativos.

### 3.4.2. Diagnóstico y diseño de la nueva propuesta

Se realizó comparaciones de resultados antes y después de aplicar los cambios en perforación y voladura, operaciones mina y planta de procesos.

**Línea base.** Son los parámetros de perforación y voladura anteriores al cambio; malla de perforación con un burden (distancia más corta al punto de alivio en el momento en que un taladro detona) 9.1 metros y espaciamiento (distancia de taladro a taladro) 10.5 metros, factor de potencia en voladura (kilogramos/tonelada de roca rota) de 0.18.

**Línea mejorada.** Son los nuevos parámetros de perforación y voladura, propuestos para lograr los objetivos; Malla de perforación con un burden de 7 metros y un espaciamiento de 8 metros, factor de potencia de 0.31 (Kilogramos/Tonelada de roca).

A partir de datos previos (2017-2018) de los parámetros de perforación y voladura (línea base) se realizó una preevaluación que permitió elaborar un nuevo diseño de perforación y voladura (línea mejorada), así como, establecer nuevos parámetros de voladura. La viabilidad de esta propuesta fue evaluada por simulación utilizando el *software* JKSimblast (Split-Engineering). El análisis arrojó resultados positivos con respecto al diseño propuesto mostrando su viabilidad.

### Evaluación de la nueva propuesta

Para validar los resultados obtenidos a partir de la simulación, descrita en la sección anterior, se realizó la primera voladura con los nuevos parámetros de

perforación y voladura. El análisis de la fragmentación fue realizado con el *software* Split Desktop (*Split-Engineering*), comparándolas con los resultados anteriores al cambio, el resultado fue positivo, ya que se realizaron más voladuras y comparaciones.

Operaciones mina realizó un seguimiento a su equipo de carguío, para comparar el tiempo de minado con voladuras de línea base y línea mejorada.

Asimismo, se utilizó una prueba controlada con el cual se determinó el aumento del rendimiento en planta (*throughput*), manteniendo en todo momento similitudes en cuanto a las características geológicas de los polígonos analizados como el tipo de mineralización, litología, alteración, SPI y BWI.

Además, se realizó una comparación directa del *throughput* (toneladas métricas secas por hora - TMSH) que proporciona el programa de Planta *Ignition*.

Así como, se utilizó los siguientes programas para la obtención de resultados.

### **Split Desktop**

Split-Desktop® es un estándar aprobado por la industria para la determinación del tamaño de roca de forma manual y off-line. Más de 500 licencias han sido vendidas en sus 16 años de historia (Anexo 7).

Es un *software* para el análisis de fragmentos de roca producto de la voladura, el cual analiza las imágenes digitales adquiridas en campo para determinar la distribución de tamaños de roca fragmentada en cualquier etapa del proceso de trituración. Las imágenes pueden ser de una pila de material, un volquete, pilas de lixiviación, puntos de extracción, pilas de almacenamiento, o cualquier ubicación, las imágenes con escaladas manualmente y editadas para optima precisión.

### **Toma de fotografías**

La toma de fotos es la principal variable de entrada, por ende, es importante definir bajo qué condiciones y de qué manera se puede lograr representatividad de toma de fotografías en los frentes de minado, es decir, en las pilas de mineral

después de la voladura y después que un equipo de carguío ya sea pala o cargador frontal esté removiendo dicho mineral cargando camiones, para de esa manera obtener muestras reales. Para la toma de fotos se utiliza esferas de tamaño específico para realizar el comparativo de tamaño entre las esferas y la roca.



Figura 5. Esferas para análisis de fotos. Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

### **Digitalización y análisis de las fotos**

Posterior a la toma de fotos, las cuales son entre tres como máximo por línea de muestreo y una foto como mínimo (lo cual está en función de la uniformidad del material volado), se procedió a analizarlas en el software de predicción estadística granulometría Split desktop. Posteriormente, se concluyó un porcentaje pasante por foto, es decir, por punto de muestreo y posteriormente un análisis en conjunto de todos los puntos de muestreo.

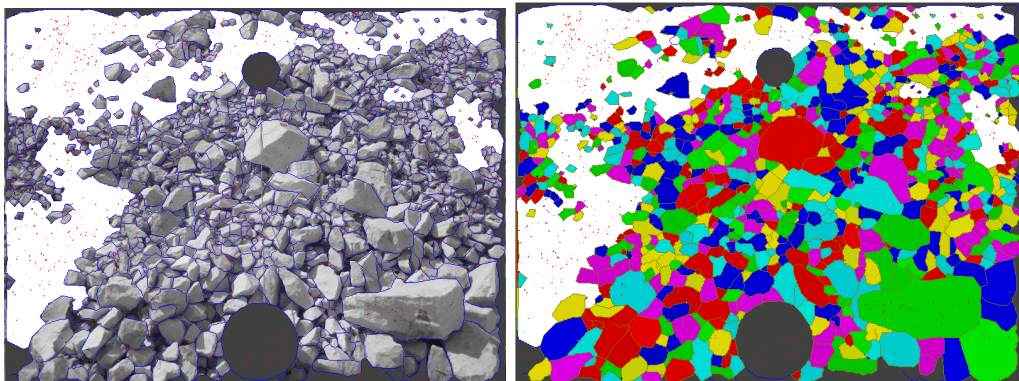


Figura 6. Análisis de fotos utilizando Split Desktop. Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

En el reporte de análisis granulométrico debe adjuntarse el porcentaje pasante en P80% o P90% en función a las necesidades del cliente, logrando de esta manera representatividad en el pasante logrado, el cual debe cumplir con los requerimientos del cliente.

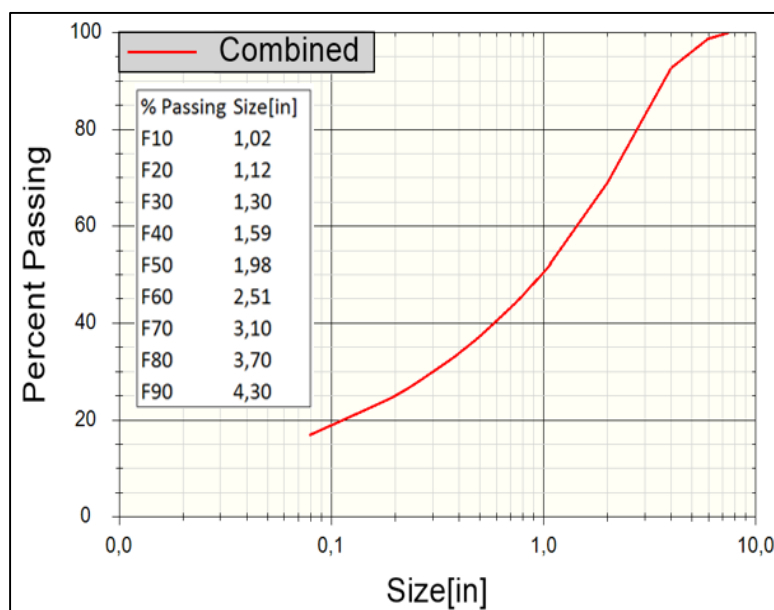


Figura 7. Análisis granulométrico. Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

**Jk Simblast.** Es un *software* que posibilita la simulación de voladura, respecto a las actividades asociadas con diseño, simulación, análisis y optimización, además es posible el almacenamiento y manipulación de modelos, datos y resultados, es un premiado sistema de *software* de uso general, desarrollado por JK Tech de Brisbane, Australia. Este *software* posibilita simulación y administración informática de voladura a partir de coordenadas UTM o puntos de perforación, para luego simular el diseño de carga explosiva taladro por taladro y posteriormente simular la conexión entre taladros, de esta manera obtenemos datos que nos indican cual es la mejor opción para realizar la voladura en minas y operaciones referentes. El sistema modular es diseñado para ingenieros en

necesidad de estandarizar su control de voladura, integrando toda la labor asociada con diseño, simulación, análisis y optimización. Esto incluye almacenamiento y manipulación de modelos, datos y resultados, dentro de un solo sistema.

## Capítulo IV: Análisis y Diagnóstico del Problema

### 4.1. Ubicación de la Mina

Esta mina está localizada en el sureste de los andes del Perú, en la provincia de Chumbivilcas en la Región de Cusco. La propiedad está aproximadamente a 600 km al sureste de Lima, coordenadas por el N 8399516 por el E 201883, a una elevación entre 4,000 a 4,500 m.s.n.m. y a 100 km al sur de la ciudad de Cusco.

#### 4.1.1. Plano de ubicación

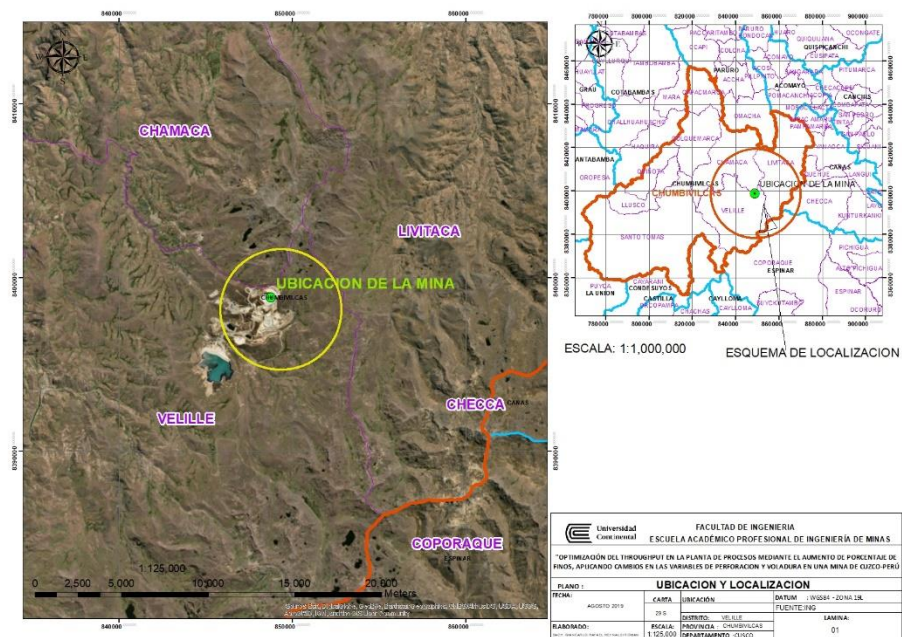


Figura 8. Plano de ubicación. Tomado de Software ArcGis Version 10.4.1 [software de computadora], por ESRI.

#### 4.1.2. Plano de accesibilidad

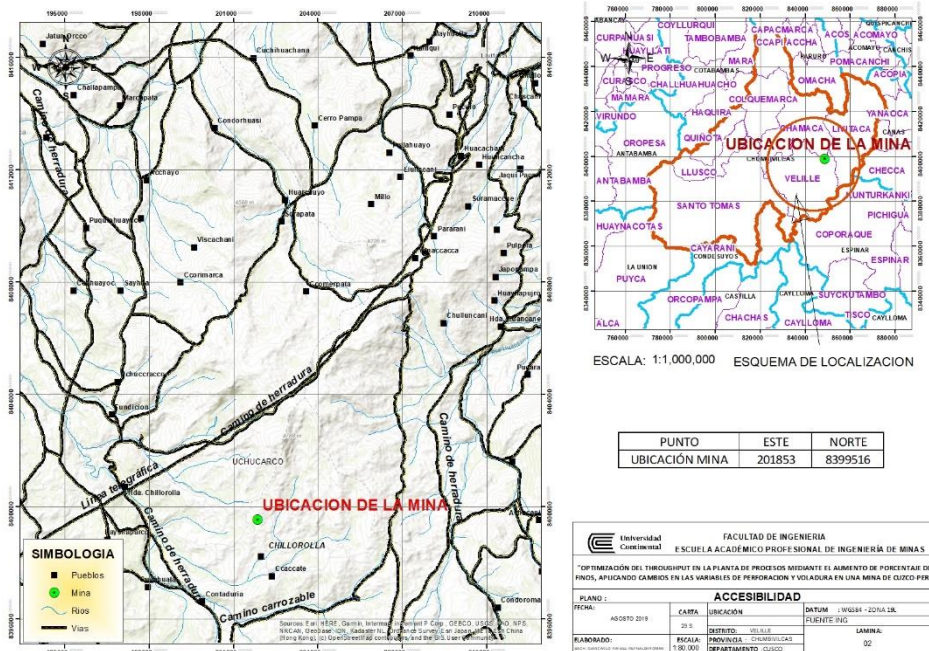


Figura 9. Plano de accesibilidad. Tomado de Software ArcGis Version 10.4.1 [software de computadora], por ESRI.

#### 4.2. Antecedentes

La línea base es la primera etapa de la investigación, se tuvo en cuenta que para el caso considerado se tiene una alimentación diaria de la planta de 75Ktpd y consta en general de lo siguiente: chancado, *stock pile*, molienda, flotación, remolienda, espesado, filtración, sistema de relaves y una planta de molibdeno, sin embargo, con la información obtenida, se identificó que al procesar mineral tipo hipógeno con alteración potásica el *throughput* tendía a disminuir debido a que las etapas de chancado y molienda presentaban problemas para la conminución de este tipo de material específico por su alto índice de dureza. La suma de esto hacía que casi nunca se cumpla el nuevo *target* propuesto de 90ktpd.

Entonces, como primer paso se contó con toda la información geotécnica y geológica que sirvieron como datos de entrada para la realización del diseño de perforación y voladura. Las decisiones tomadas giraron en torno al tipo de material involucrado en los proyectos de voladura, sea este mineral o desmonte. Esto se

realizó mediante la superposición de información en Minesight de las mineralizaciones, alteraciones, litologías.

### **4.3. Características de la Roca Mineralizada**

La mina es un yacimiento con 84% de mineral tipo hipógeno (Hy); en menores proporciones se encuentran los minerales tipo Supérgeno (Sp), Skarn (Sk), Mixto (Mx) y HighZinc (HZn).

Este tipo de depósitos está conformado por minerales de cobre diseminados y minerales de cobre en vetas y brechas distribuidas de modo relativamente uniforme en grandes volúmenes de roca, dando origen a grandes tonelajes de mineralización. Asimismo, producto del origen volcánico de estos depósitos, se pueden distinguir diferentes tipos de alteración asociadas con las zonas mineralizadas. Entre ellas podemos mencionar como principales la alteración argílica avanzada, sericítica, y potásica. En el esquema mostrado, el enriquecimiento de calcosina está generalmente asociado a la alteración sericítica, mientras que los sulfuros hipógenos se relacionan principalmente a la alteración potásica. Esta correspondencia es importante y se debe tener en mente, ya que explica el incremento de mayor uso de energía en la medida que profundizamos la explotación de los yacimientos del tipo pórfido.



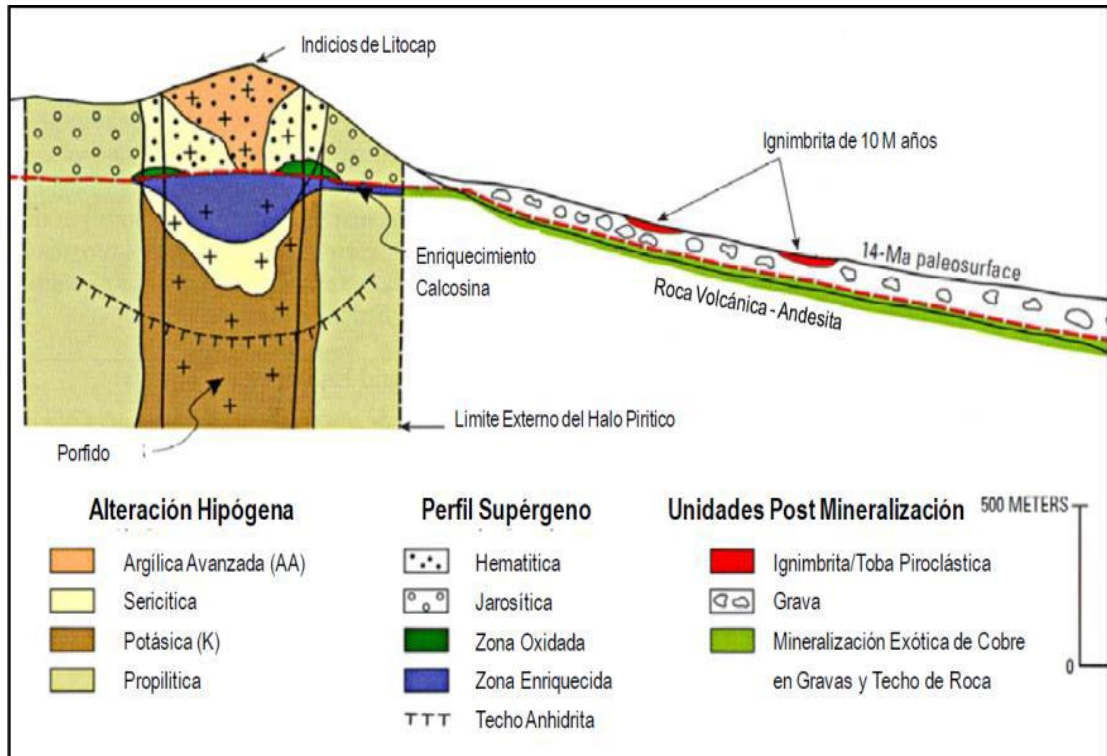


Figura 10. Características de la roca mineralizada. Tomado de MineSight Software Solutions Version 10 [software de computadora], por Mintec, INC.

Es importante resaltar también que los recursos minerales son heterogéneos y poseen propiedades físicas, químicas y mineralógicas variables; inevitablemente el mineral procesado en los primeros años es diferente al procesado en los últimos años. Este cambio ocurre en la medida que la zona de mineralización secundaria, donde descansan minerales tipo supérgeno, y que generalmente está asociada a altas leyes porque tienen mayor presencia de calcocita ( $\approx 0.68\%$  Cu) y covelita ( $\approx 0.60\%$  Cu), gradualmente es reemplazada por mineralización hipógena, la cual está asociada generalmente con menores leyes debido a que está compuesta en su mayoría de calcopirita ( $\approx 0.33\%$  Cu).

Respecto a la mineralización que presenta, en el siguiente gráfico se podrá apreciar que prácticamente está compuesto por mineral tipo hipógeno en su totalidad.

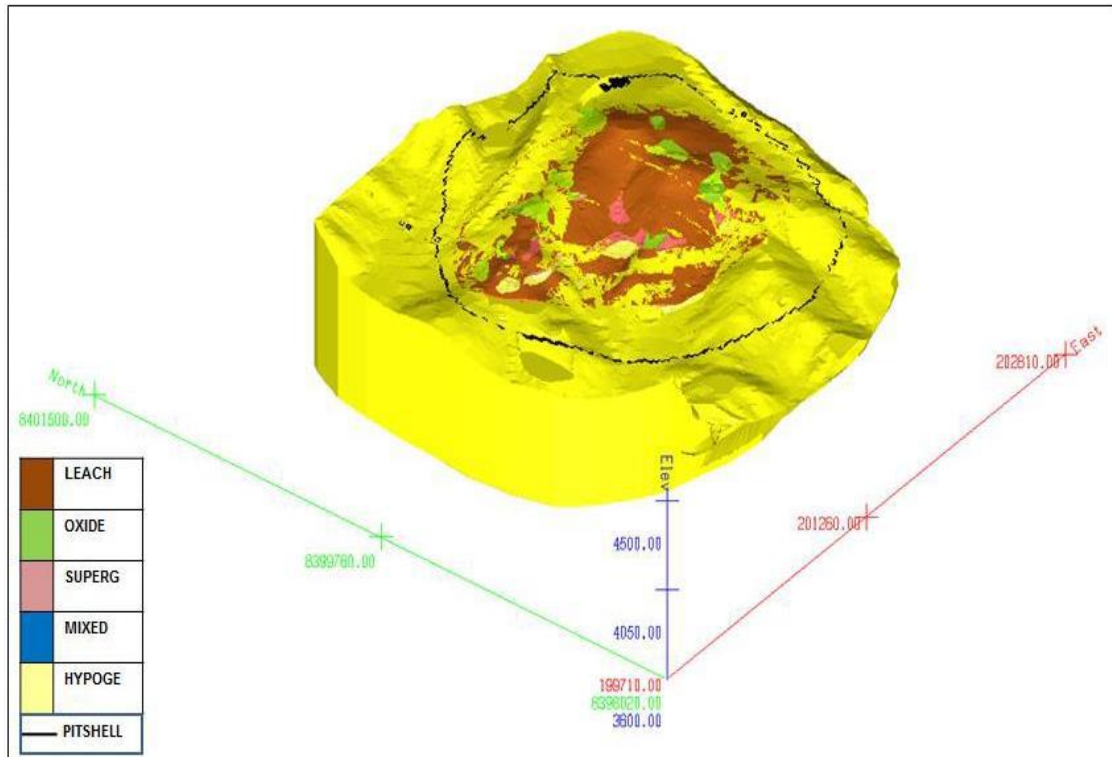


Figura 11. Mineralización presente en el área de extracción. Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

Así mismo, presenta la típica zonación de alteración de pórfido: argílica en la parte superior, fílica y potásica en el medio, con la alteración propilítica que rodea el depósito. La mineralización de mayor grado se correlaciona con las zonas de alteración fílica y potásica.

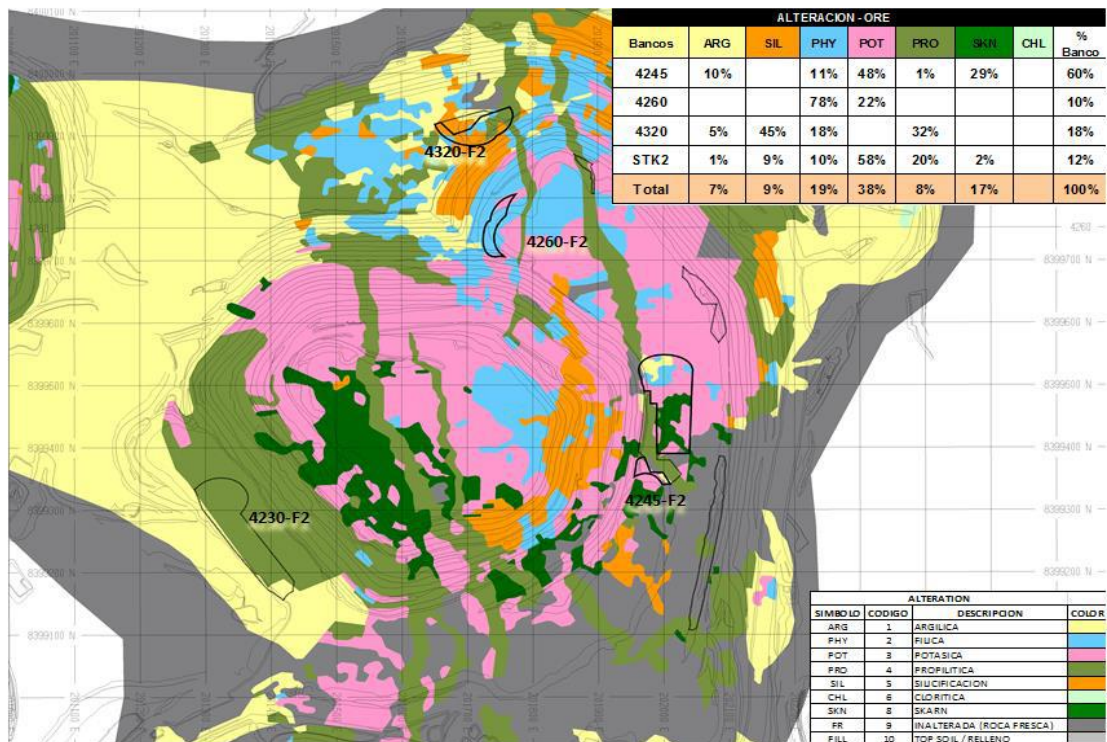


Figura 12. Características geológicas de la mina. Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

Es así que la ejecución, seguimiento y evaluación de este proyecto solo se enfocó en analizar el comportamiento del mineral con mineralización hipógena, debido a su alta presencia a lo largo de la vida de la mina (LOM) y las dificultades que tenía este respecto a su procesamiento.

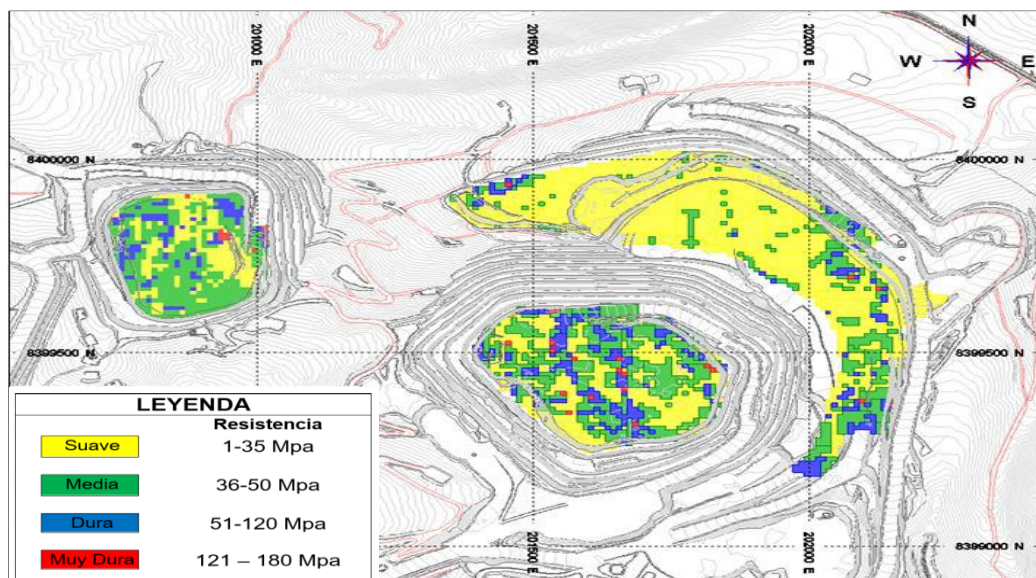


Figura 13. Niveles de Dureza. Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

Para la identificación del factor de potencia (FP) se puede tomar como indicador el tipo de alteración ya que este está correlacionado con niveles de dureza (figura 13). Otra información importante a tener en cuenta es la resistencia expresada en Mpa y que es proporcionada y monitoreada por Geotecnia.

Por último, tenemos información del modelo de bloques (figura 14) respecto al SPI y BWI que son otros dos indicadores claves para determinar el FP a utilizar. Una práctica vital es contar con información del monitoreo realizados en bancos superiores de modo que se pueda establecer un factor de potencia estratégico que permita controlar el costo por explosivo eficiente y eficazmente, de modo que no se arriesgue el resultado de la fragmentación del disparo.

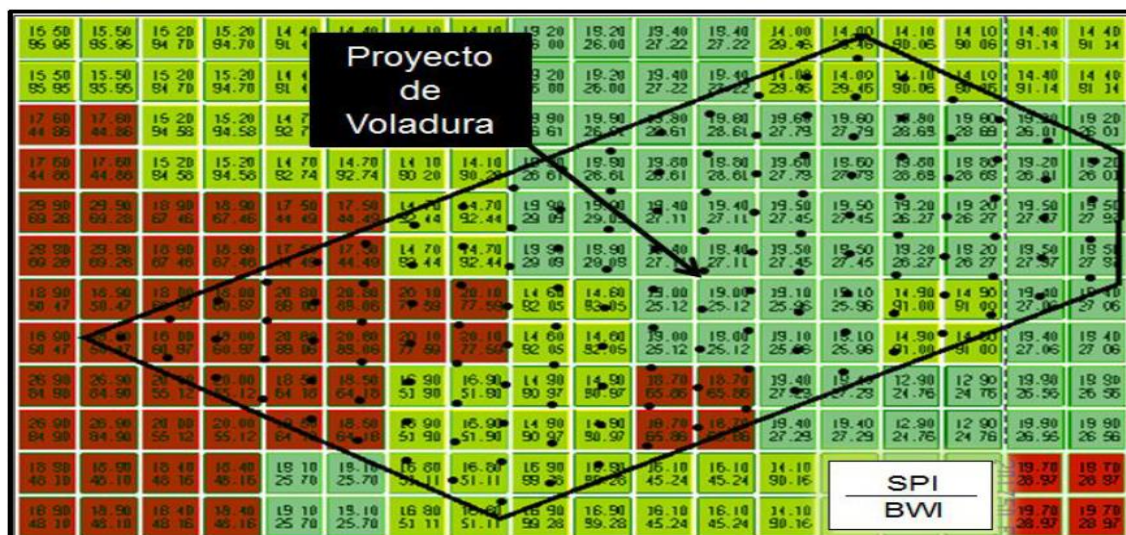


Figura 14. Modelos de bloques. Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

#### 4.3.1. Línea base

##### 4.3.1.1. Perforación

La línea base consideraba mallas habituales con espaciamiento de 10.5m y burden de 9.1m y 15 metros de altura (figura 15).

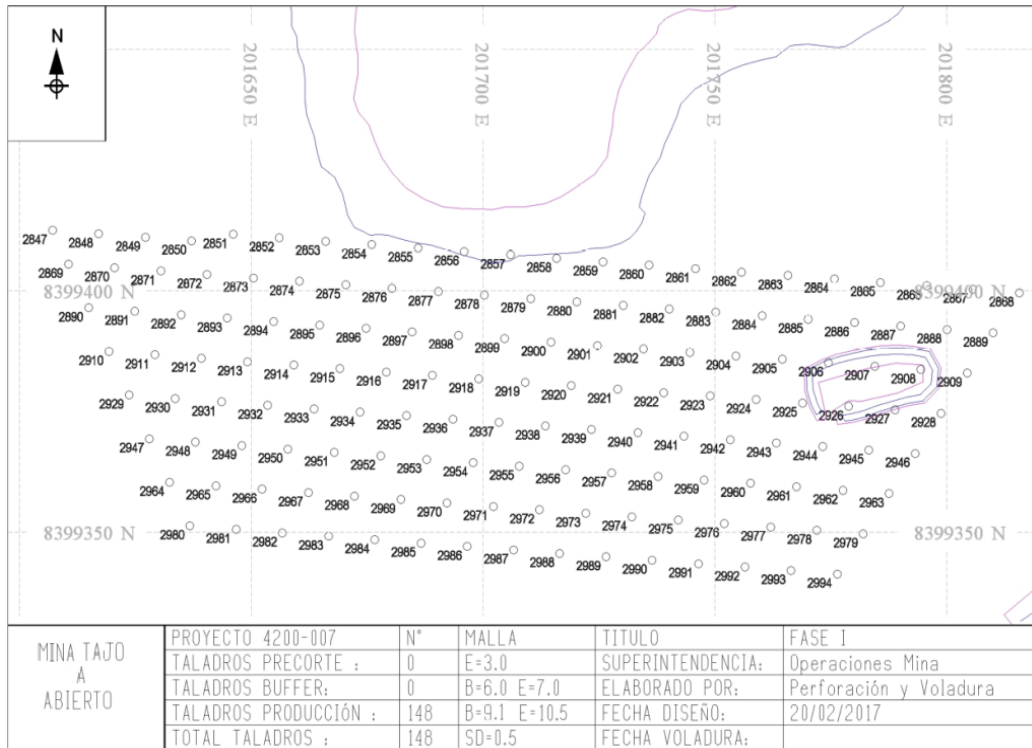


Figura 15. Mallas habituales con espaciamiento 10.5 y burden 9.1. Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

#### 4.1.1.2 Voladura

En la línea base el factor de potencia (kilogramos de explosivo/tonelada de roca fragmentada) era 0.18Kg/ton en promedio, se aplicaba de acuerdo al tipo de roca y la presencia de agua en los taladros tal como muestra la tabla 2.

Tabla 2

*Factor de potencia - mineral*

Factor de Potencia-mineral			
Dureza de roca	Taladros secos	Taladros con agua	Promedio FP
Suave	0.15	0.16	0.18
Media	0.17	0.18	
Dura	0.20	0.20	

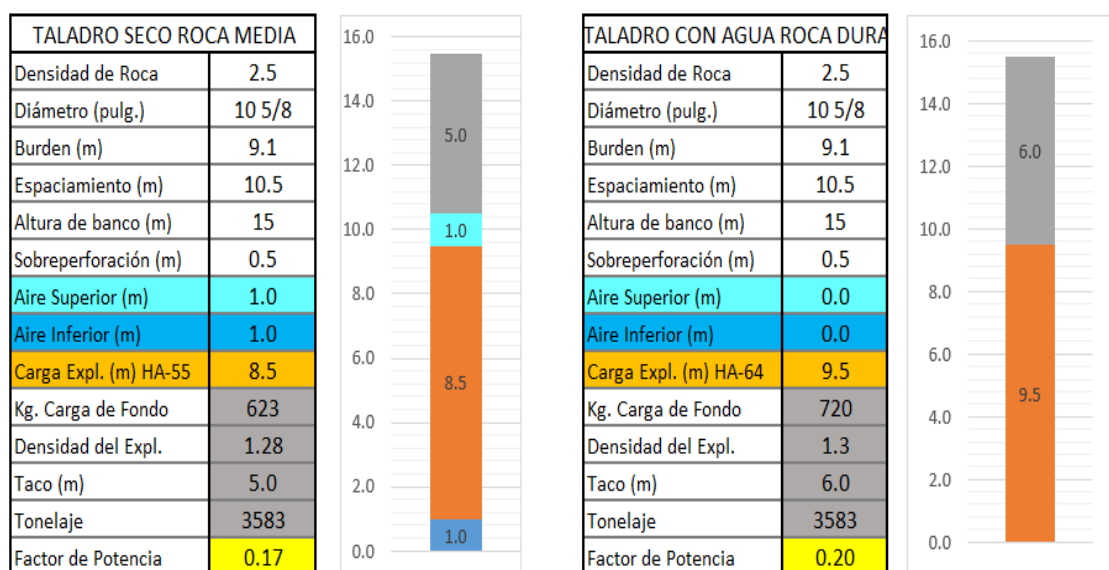
**Detonadores Electrónicos.** Para minimizar la dispersión, buscar precisión y por seguridad se utilizan detonadores electrónicos; La precisión electrónica (dispersión nula, comparado con los detonadores pirotécnicos que llegan hasta +- 3%) permite lograr una variedad de beneficios que van desde la fragmentación a un mejor rendimiento de la chancadora y molino (Anexo 1).

Con estos parámetros de perforación y voladura se obtienen los siguientes resultados:

#### 4.3.2. Última voladura con línea base realizada el 27 de octubre del 2018.

##### 4.3.2.1. Antecedentes

Se cargaron 200 taladros de producción disparados con detonadores electrónicos en zona mineral, diseño de carga para taladros secos 30% roca media con HA-55, y taladros con agua 70% roca dura con HA-64 (figura 16), la selección del tipo de explosivo fue de acuerdo a las propiedades de los explosivos, HA-55 por su VOD (velocidad de detonación) y HA-64 por su resistencia al agua, ver (Anexo 2), el factor de Potencia utilizado fue de 0.19kg/ton en promedio para todo el proyecto de voladura. (Tabla 3).



**Figura 16.** Diseño de carga para taladros línea base

Tabla 3

*Promedio de factor de Potencia*

Dureza de roca	30% Taladros secos - Factor de Potencia	70% Taladros con agua - Factor de Potencia	Promedio de FP
Media	0.17		0.19
Dura		0.20	

#### 4.3.2.2. *Diseño de salida por simulación*

Utilizando los datos teóricos mostrados en la sección anterior, empleamos el software JKSimBlast, para simular el diseño de conexión de taladro a taladro y secuencia de salida en coordinación con perforación y voladura mina.

Secuencia de salida. En V, se coordinó con el personal de perforación y voladura, tiempo entre taladros: 21 ms (detonadores electrónicos), tiempo en la troncal 120ms (figura 17) muestra los resultados del proceso de simulación basado en los datos de la voladura.

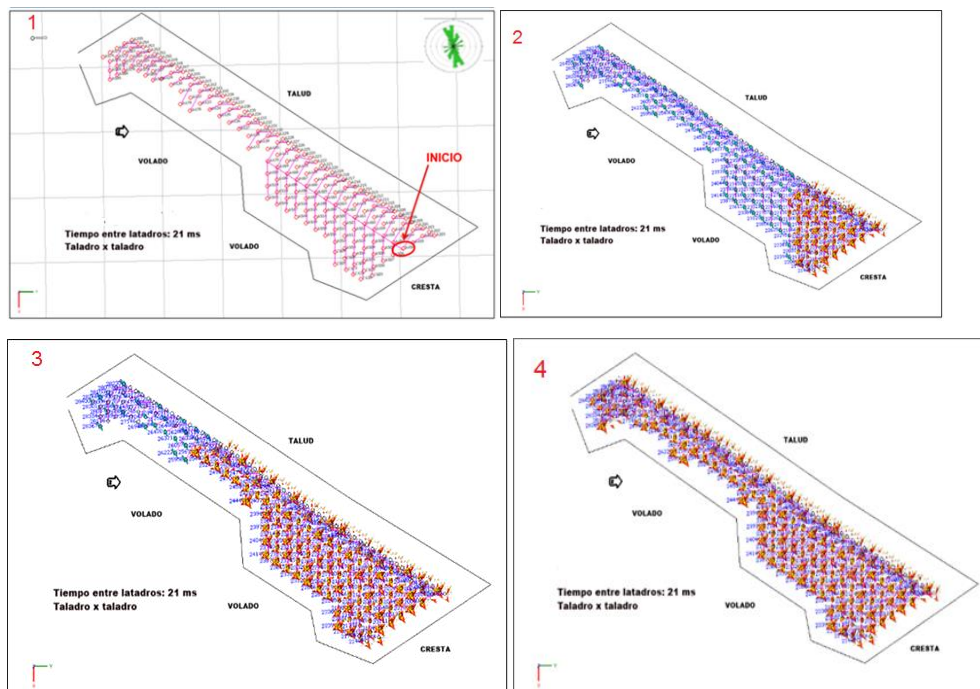


Figura 17. Simulación de secuencia de salida. Tomado de JKSimblast [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

#### 4.3.2.3. **Resultados**

Una vez terminado el procedimiento de simulación se realizó la voladura programada a las 12:30 h, ejecutada a las 12:34 h, se disparó 719020 toneladas de material, el factor de potencia 0.19 kg/ton entre roca media y dura, se observó regular esponjamiento y fragmentación en la zona superficial (figura 18).



*Figura 18.* Resultados de voladura programada.

Finalmente, se observó la ausencia de gases nitrosos, cuidando de esta manera el medio ambiente, (figura 19)



*Figura 19.* Ausencia de gases nitrosos.



Del seguimiento de los frentes de minado de la línea base se pudo observar que la distribución granulométrica no era uniforme; ya que, se evidenció en las zonas superiores de los bancos fragmentación gruesa. Esto generó que los equipos de carguío normalmente trabajen ante “frentes amarrados” (figura 20), que son zonas sin esponjamiento producto de una ineficiente energía generada por la voladura; es decir, el explosivo que formaba parte de la columna de carga del taladro no fue lo suficientemente eficaz para superar la resistencia de tracción de la roca. Entonces, ante este problema de la actividad recurrente, fue necesario contar con el apoyo de un tractor, en la cresta del frente de minado, para que sea rebajado y empujado el material para su carguío.



*Figura 20. Frentes amarrados*

#### **4.3.2.4. Análisis de fragmentación**

Para este análisis de fragmentación empleamos el *software* Split-Desktop, ya que se tomó fotografías al frente de minado de la pala o equipo de carguío de la zona, teniendo como referencia unas esferas con un tamaño específico para que el *software* pueda determinar el tamaño de los fragmentos, (figura 21).



Figura 21. Fotografías para el análisis en Split-Desktop. Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

Se procedió con el análisis en el software de predicción estadística granulometría, (figura 22).

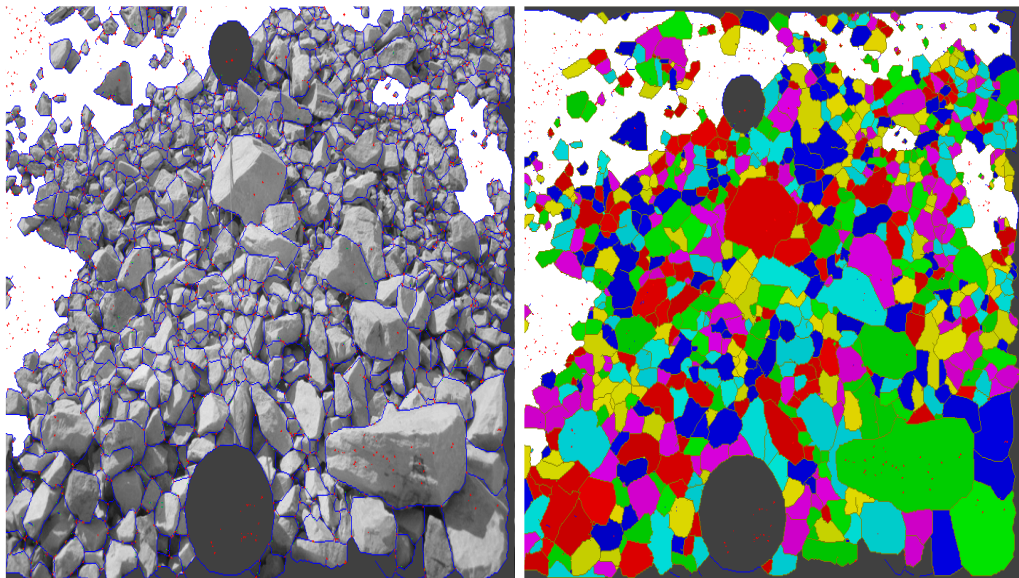


Figura 22. Análisis de las fotografías con el software Split-Desktop. Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

En la (figura 23) se observa que empleando los parámetros de perforación y voladura de la línea base el P80 alcanza un promedio de 3.70", lo cual no es suficiente para llegar a la optimización en planta la cual requiere un P80 de menor o igual a 1.5", fecha 29 de octubre del 2018.

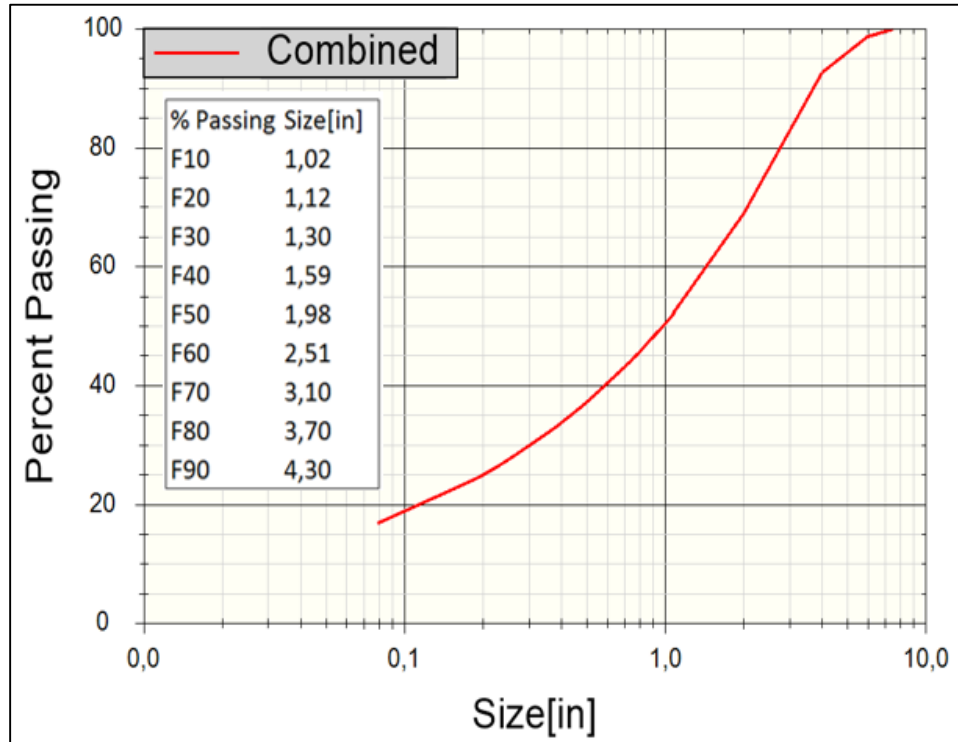


Figura 23. Resultado del análisis de fragmentación P80=3.70". Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

## **Capítulo V: Aplicación de la Línea Mejorada**

### **5.1. Línea Mejorada**

Las variables de perforación y voladura han venido siendo realizadas bajo un control geotécnico. Para la ejecución de este proyecto, las variables han sido ajustadas además bajo un enfoque geológico, el cual se ha obtenido del modelo del yacimiento. Por tanto, el fin es modelar un acercamiento que optimice el diseño de perforación y voladura a través de la identificación y medida de influencia de los resultados de estas en los diferentes procesos posteriores para lograr los resultados que maximicen el conjunto de la rentabilidad en lugar de simplemente minimizar los costos de perforación y voladura.

Además, la perforación y la voladura también son un arte y ciencia para fragmentar rocas utilizando explosivos, entonces a partir de esto realizamos los cambios en las variables, guiándonos de los resultados con los parámetros anteriores, y realizando análisis de onda P y su influencia en la generación de daño por degradación geotécnica. Podemos proponer nuevos parámetros, ya que para esto no hay un modelo matemático ideal, pues cada mina es diferente, las características y comportamiento de la roca varían de acuerdo a la profundización de la mina y muchas veces llegar a modelos ideales depende de prueba-error, es por eso que en perforación y voladura hay que estar innovando constantemente para obtener mejora continua.

#### **5.1.1. Burden y espaciamiento de la malla de perforación**

Entonces los nuevos parámetros se han reducido dentro la línea mejorada a espaciamiento de 8 m y burden de 7 m. Para los 4 proyectos ejecutados dentro la línea mejorada se utilizó mallas triangulares (Figura 24).

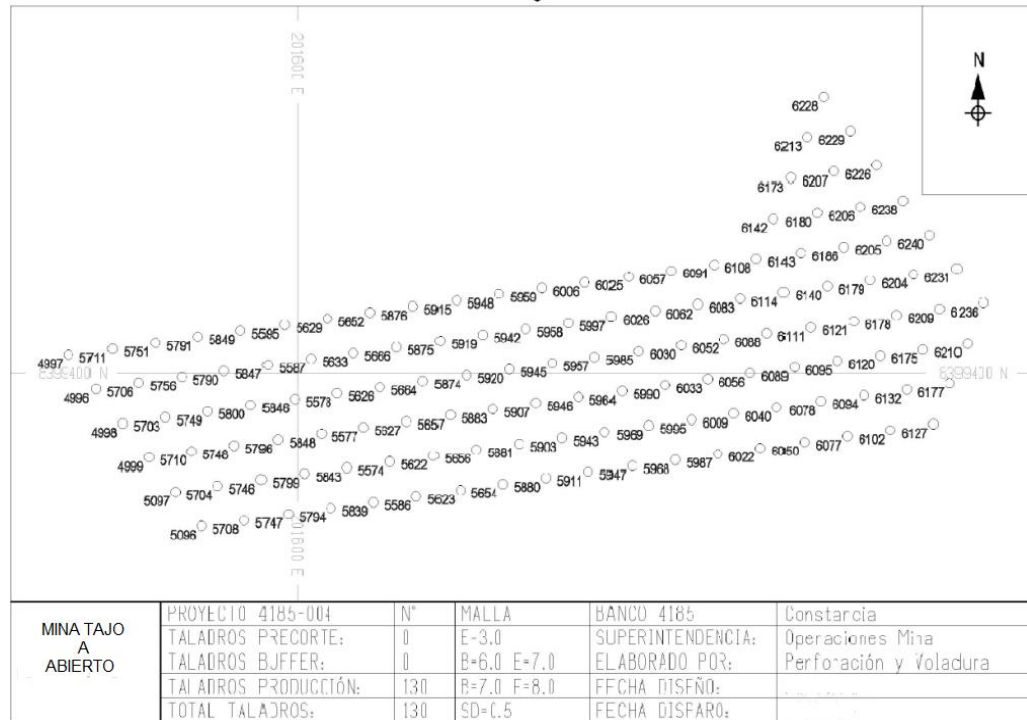


Figura 24. Mallas mejorada con espaciamiento 8.0 y burden 7.0 sin sobre perforación. Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

Al realizar cambios en el espaciamiento y burden de las mallas de perforación es necesario también que se realicen cambios en los retardos de salida. Retardos inadecuados en una voladura tendrá como resultado una pobre fragmentación de las filas posteriores, lo cual generará presencia de fragmentos gruesos, rocas grandes en la zona superior del taladro, pilas estrechas de material, inestabilidades, excavabilidad deficientes, sobre-roturas, etc. En cambio, retardos adecuados ejercerán un control sobre el número de filas, por lo tanto, sobre el número de taladros a ser disparados en un diseño.

Sin embargo, una de las tareas más complicadas en el diseño de voladura es la adecuada selección del intervalo de retardo. El intervalo óptimo lo decidirá el tipo de roca y los requerimientos de la operación. Entonces, el diseño ideal de voladura, como se dijo, debe abarcar conceptos fundamentales y modificarlo cuando sea necesario para compensar condiciones geológicas específicas dentro de la operación.

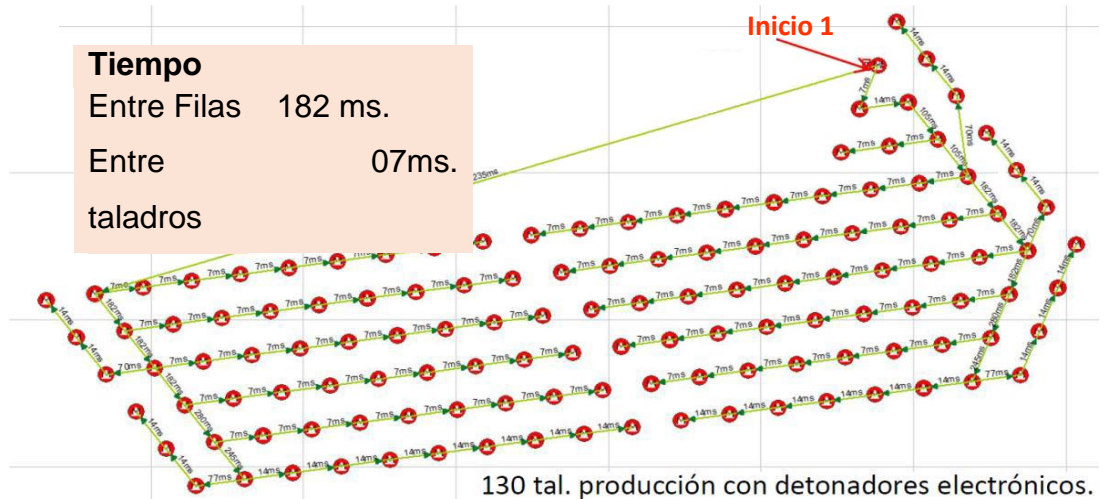


Figura 25. Tiempo de detonación en mallas mejorada. Tomado de JKSimblast [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

Para los proyectos de malla reducida, que comprende la línea mejorada (figura 25), se decidió utilizar detonadores electrónicos con tiempos promedio de 7 ms entre taladros y 180 ms entre filas, después de realizar simulaciones con el software JKSimblast.

### 5.1.2. Diámetro y longitud de los taladros

Respecto al diámetro de broca utilizado, este se mantuvo en 10 5/8" y la longitud 15, no se consideró sobre perforación (0.5 m), ya que en la línea base no había problemas con el nivel de piso y al reducir la malla de perforación la interacción entre taladros aumenta, además al utilizar detonadores electrónicos el riesgo de tener tiros quedados se minimiza, otro dato importante fue la presencia de agua, ya que con esta información se puede establecer una clasificación entre taladros secos y con agua. Esto se realizó mediante el seguimiento de la perforación y posterior medida de la longitud de agua presente en los taladros, para la elección de la mezcla explosiva.

### 5.1.3. Voladura línea mejorada

Para llegar a la nueva meta se tuvo que aumentar considerablemente el factor de potencia a 0.28kg/ton en promedio como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4

*Factor de potencia para línea mejorada*

Factor de Potencia-mineral			
Dureza de roca	Taladros secos	Taladros con agua	Promedio FP
Suave	0.25	0.26	0.28Kg/ton
Media	0.28	0.28	
Dura	0.30	0.30	

### 5.1.4. Aplicación de la línea mejorada

La línea mejorada se aplicó en coordinación con operaciones mina, el tiempo de duración de esta prueba fue de un mes aproximadamente, aplicando los nuevos parámetros (descritos anteriormente) de perforación y voladura, se procedió a realizar la primera prueba, el día 5 de noviembre del 2018:

#### 5.1.4.1. Primera voladura línea mejorada

5 de noviembre del 2018:

##### a) Antecedentes

Se cargaron 327 taladros de producción disparados con detonadores electrónicos, en zona de mineral, se empleó el diseño de carga para taladros secos 50% y agua 50%, roca media y roca dura (figura 26), el factor de potencia fue de 0.29kg/ton roca media y dura, (tabla 5).

Tabla 5

*Factor de potencia primera voladura línea mejorada*

Dureza de roca	F. de Potencia 50% Taladros secos	F. de Potencia 50% Taladros con agua	Promedio FP
Media	0.28	0.28	0.29
Dura	0.30	0.30	

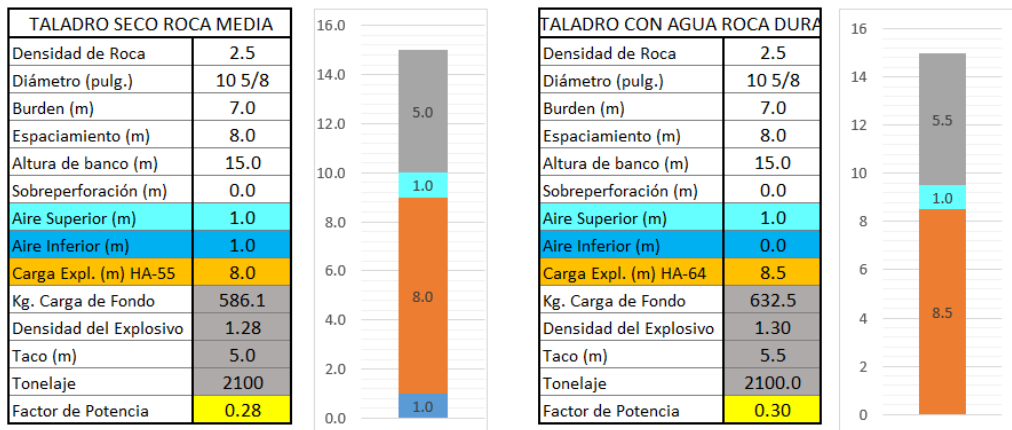


Figura 26. Diseño de carga, línea mejorada

Malla de perforación regular, sin taladros tapados como se observa en la (figura 27).



Figura 27. Prevoladura

Secuencia de salida en V, (figura 28). Tiempo entre taladros: 07 ms. siendo la salida taladro por taladro para evitar acoplamiento de ondas.



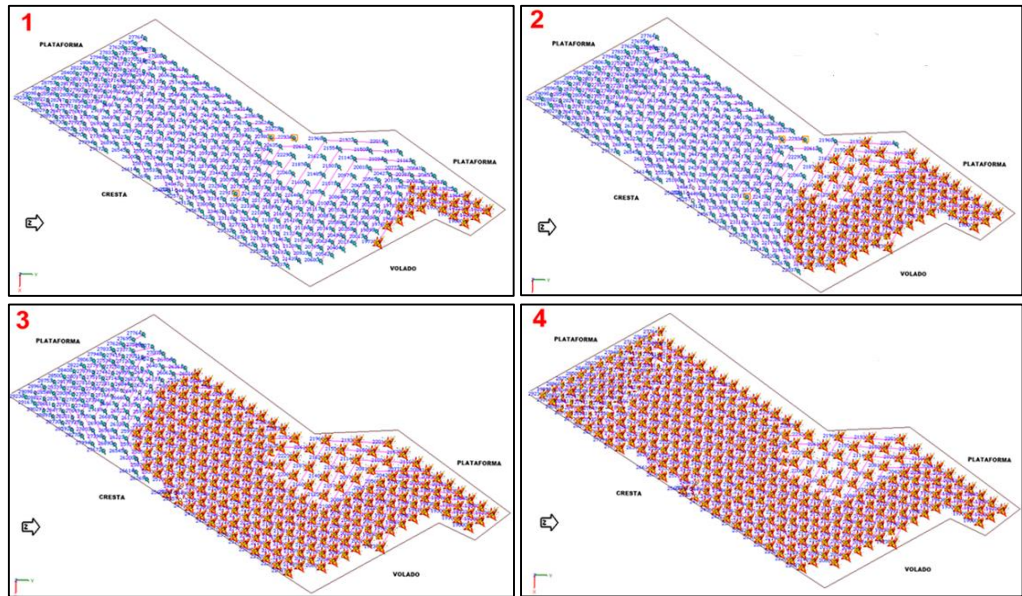


Figura 28. Simulación de secuencia de salida. Tomado de JKSimblast [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

La figura 29, muestra la secuencia de voladura real, sin proyección de roca y generación moderada de polvo.



Figura 29. Fotografías de secuencia del disparo.

## **b) Resultados**

Hora de voladura programada 12:30 h y ejecutada 12:45 h, se disparó 686700 toneladas de material, (figura 30), se aprecia una buena fragmentación a nivel superficial.



Figura 30. Fotografía postvoladura – 1.

Hubo control del desplazamiento y se logró buen apilamiento de material, como se observa en la (figura 31).

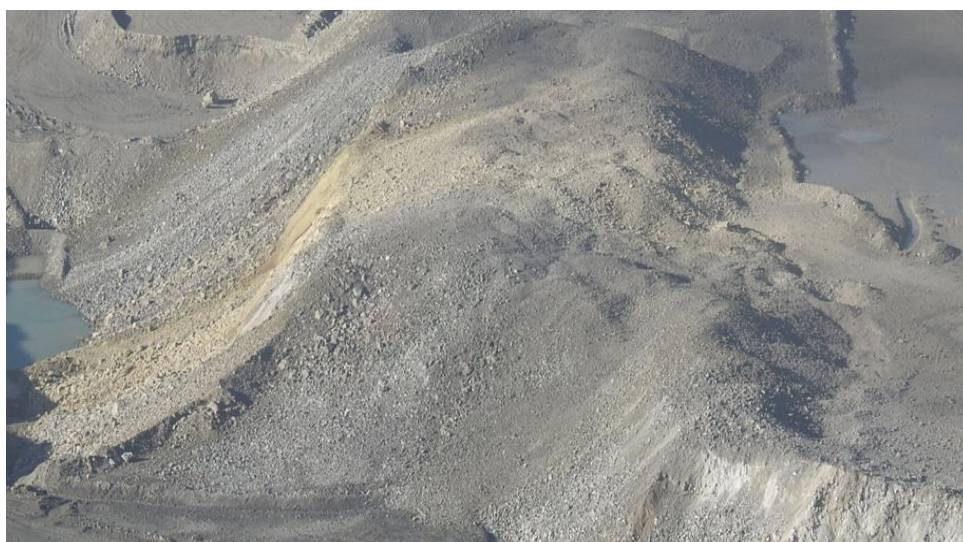


Figura 31. Fotografía postvoladura – 2.

No hubo proyección de roca, se cuidó plataforma de perforación, en zona de cresta se controló caída de material a niveles inferiores, No hubo presencia de humos naranja como se observa en la (figura 32).



Figura 32. Postvoladura sin presencia de gases nitrosos

### c) Análisis de fragmentación

Se procedió a realizar el análisis de fragmentación, asimismo se tomó fotografías para realizar el análisis granulométrico (figura 33 y 34):



Figura 33. Toma de Fotografías para análisis granulométrico

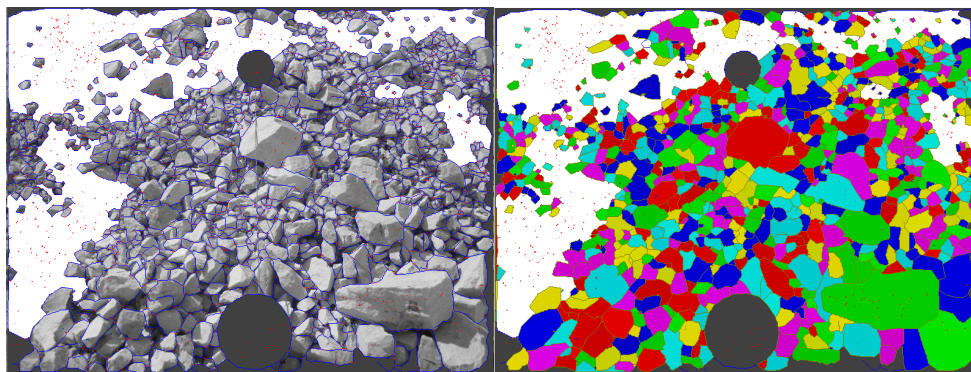


Figura 34. Análisis de distribución granulométrica por imágenes

Resultados del análisis de fragmentación P80=1.62" (figura 35), fecha: 07 de noviembre del 2018.

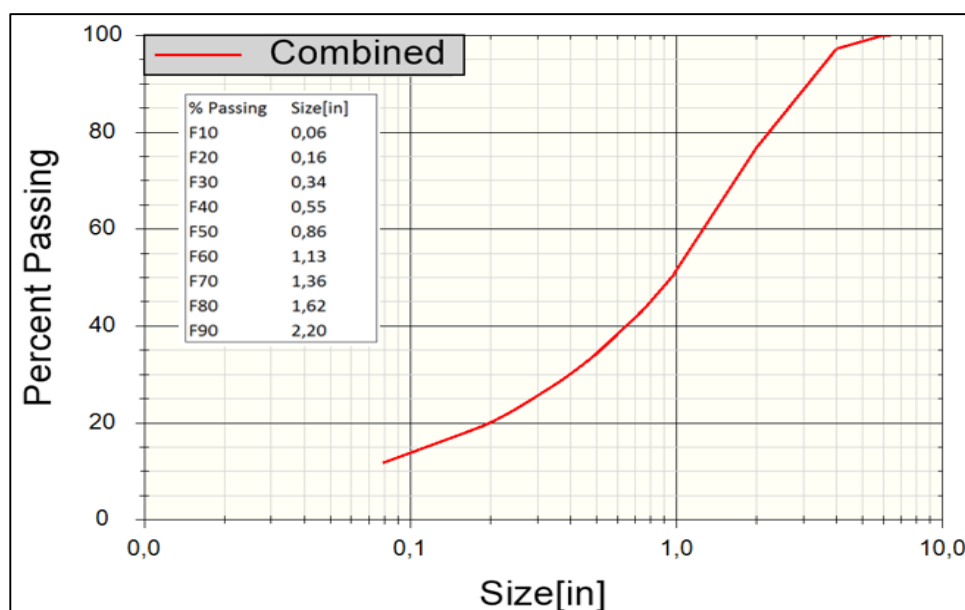


Figura 35. Resultado del análisis de fragmentación P80=1.62". Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

**d) Conclusión:**

Con los nuevos parámetros de perforación y voladura de la línea mejorada el P80 alcanzó un promedio de 1.62", lo cual es muy cercano a la proyección de un P80 de 1.5" pero aún no se llegó a lo proyectado.

Para la siguiente voladura se aumentó a 0.30 Kg/ton el factor de potencia y también se cambió el tipo de amarre a diagonal larga, para reducir el burden efectivo y poder tener mejor fragmentación.

#### 5.1.4.2. Segunda voladura línea mejorada

Se realizó el 12 de noviembre del 2018.

##### a) Antecedentes

Se cargaron 260 taladros de producción disparados con detonadores electrónicos en zona de mineral, taladros secos roca media y dura, el diseño de carga se muestra en la (figura 36).

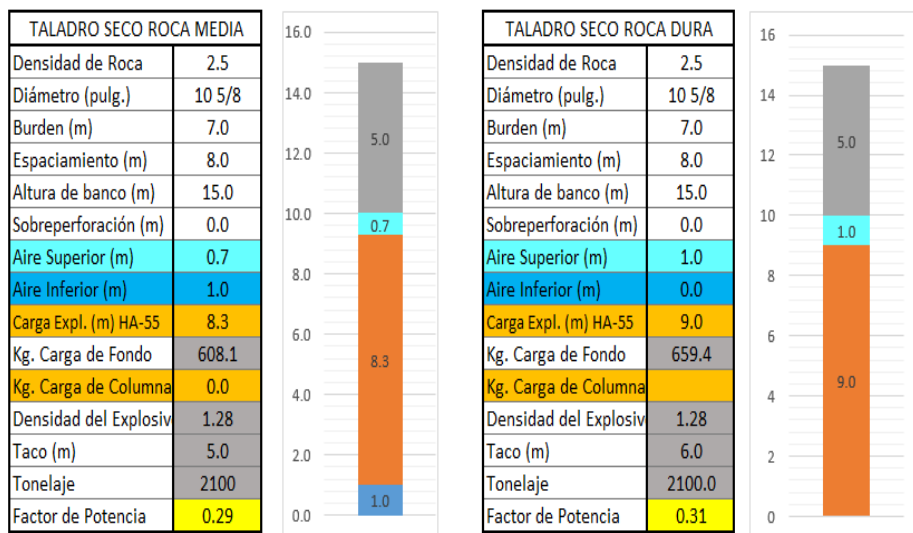


Figura 36. Diseño de carga, línea mejorada

El factor de potencia se aumentó a 0.30kg/ton según se muestra en la tabla 6.

Tabla 6

Factor de potencia segunda voladura línea mejorada

Dureza de roca	Factor de Potencia Taladros secos	Promedio FP
Media	0.29	0.30
Dura	0.31	

Malla de perforación regular, la presencia de agua solo es en superficie en el interior de los taladros no hay agua, como se muestra en la (figura 37).



Figura 37. Prevoladura

Secuencia de salida: diagonales largas, inicio ciego para cuidar equipos debajo de la cresta. Se coordinó con el personal de perforación y voladura, tiempo entre taladros: 07 ms. para mineral, salida taladro por taladro para evitar acoplamiento de ondas (figura 38).

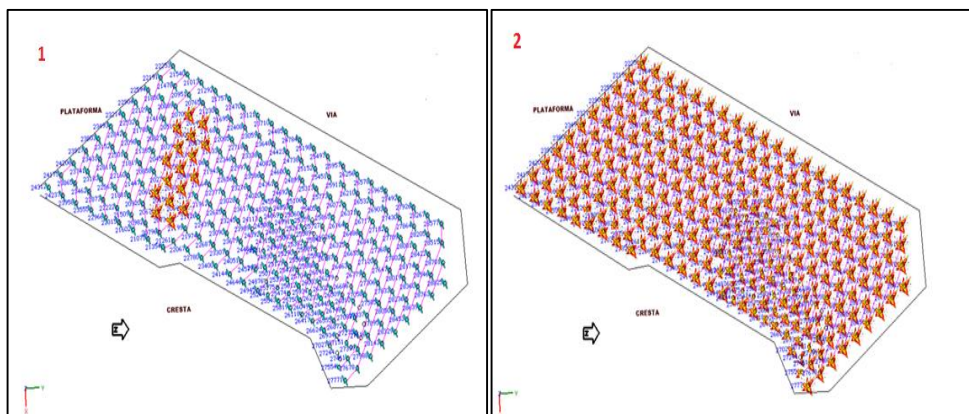


Figura 38. Simulaciones de la secuencia de salida, disparo ciego. Tomado de JKSimblast [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

Secuencia real de la voladura, sin proyección de roca (figura 39)



*Figura 39.* Secuencia de disparo

## **b) Resultados**

Hora de voladura programada: 12:00 h y ejecutada 12:03 h, 546000 toneladas de material roto, se aprecia buena fragmentación a nivel superficial, no hubo proyección de roca, se cuidó plataforma de perforación, se controló el desplazamiento y se logró buen apilamiento de material, en la zona de cresta se controló caída de material a niveles inferiores (figura 40).



*Figura 40.* Fotografía postvoladura

Se observa una pequeña coloración amarilla por el tipo de material como muestra la (figura 41).



Figura 41. Voladura con leve generación de gases

Resultados del análisis de fragmentación  $P_{80}=1.49''$  (figura 42), fecha: 15 de noviembre del 2018.

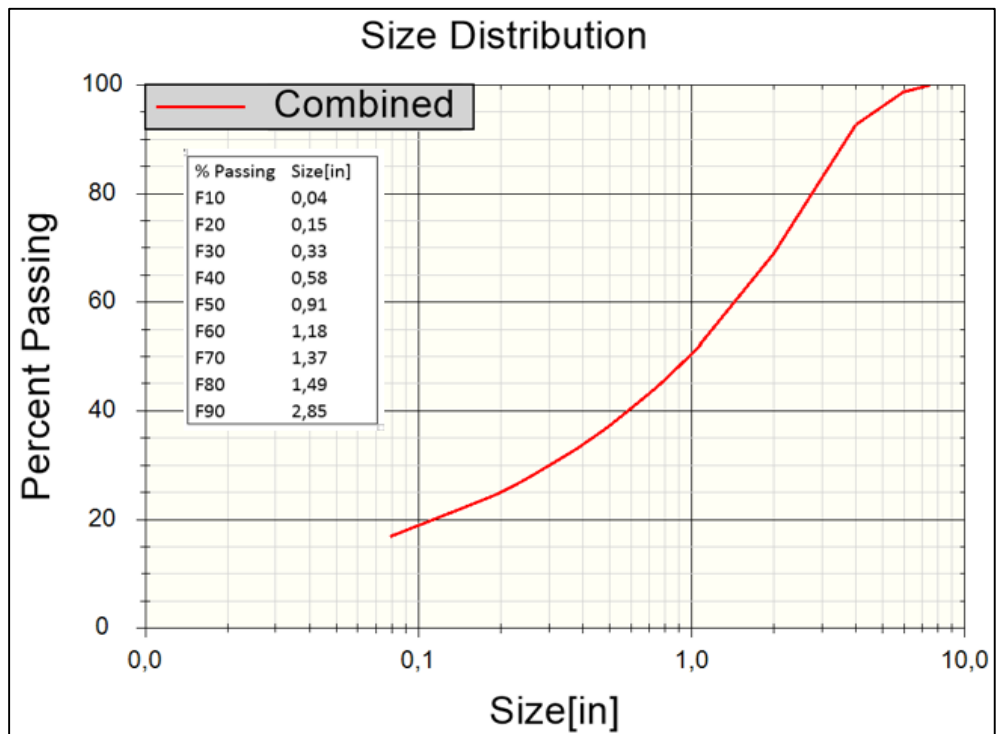


Figura 42. Resultado del análisis de fragmentación  $P_{80}=1.49''$ . Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.



**c) Conclusión:**

Aumentando el factor de potencia a 0.30kg/ton y al cambiar el diseño de salida de V a diagonal larga se logró una adecuada fragmentación, obteniendo un P80 de 1.49", que satisface la meta de 1.50".

En la siguiente voladura se mantienen los parámetros de perforación y diseño de amarre, solo se cambia el factor de potencia de 0.30 a 0.31Kg/Ton.

**5.1.4.3. Tercera Voladura Línea Mejorada**

Se realizó el 21 de noviembre del 2018.

**a) Antecedentes**

Se cargaron 175 taladros de producción disparados con detonadores electrónicos en zona de mineral, (figura 43).



*Figura 43. Fotografía de prevoladura.*

Se realizó el diseño de carga de explosivos para taladros de roca dura, todos con agua, factor de potencia 0.31kg/ton. Como se muestra en la (Figura 44 y tabla 7).

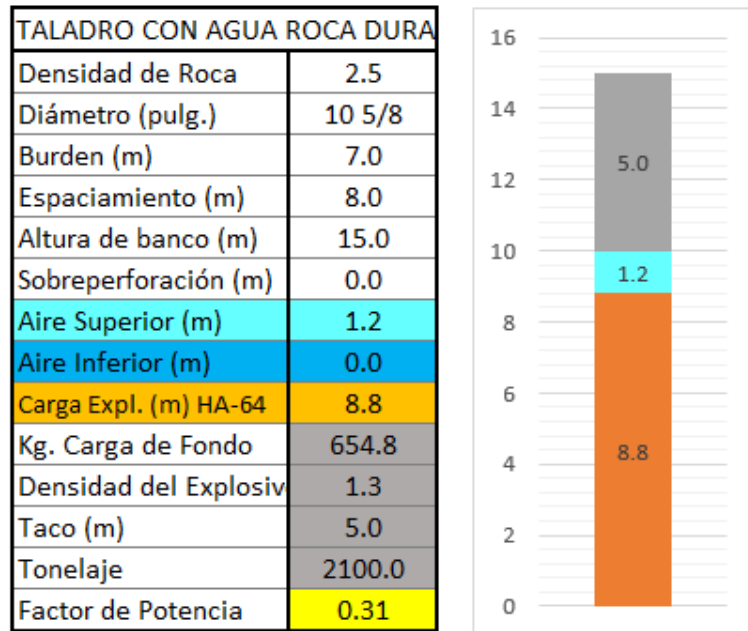


Figura 44. Diseño de carga, tercera voladura-línea mejorada

Tabla 7

Factor de potencia tercera voladura línea mejorada

Dureza de roca	Factor de Potencia Taladros con agua	Promedio FP
Dura	0.31	0.31

Secuencia de salida: diagonales largas y V. Se coordinó con el personal de perforación y voladura, tiempo entre taladros: 7 ms, tiempo de la troncal 182ms, (figura 45).

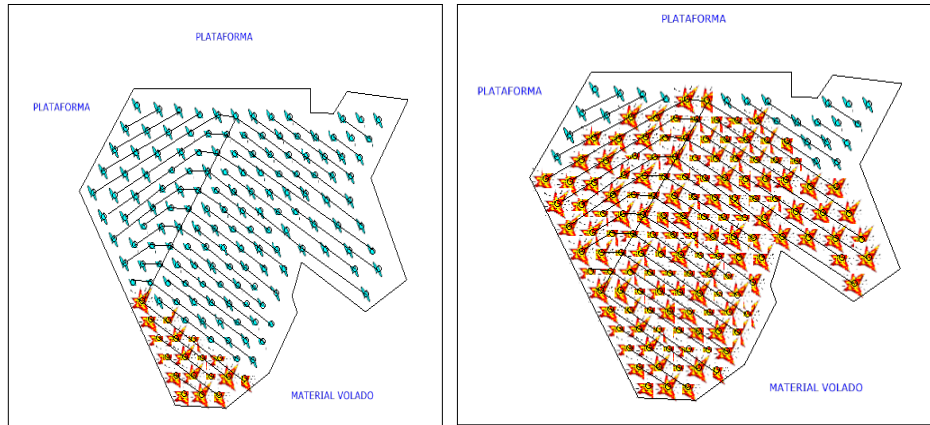


Figura 45. Simulación de secuencia de Inicio de disparo. Tomado de JKSimblast [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

Secuencia real de la voladura, sin proyección de roca (figura 46).

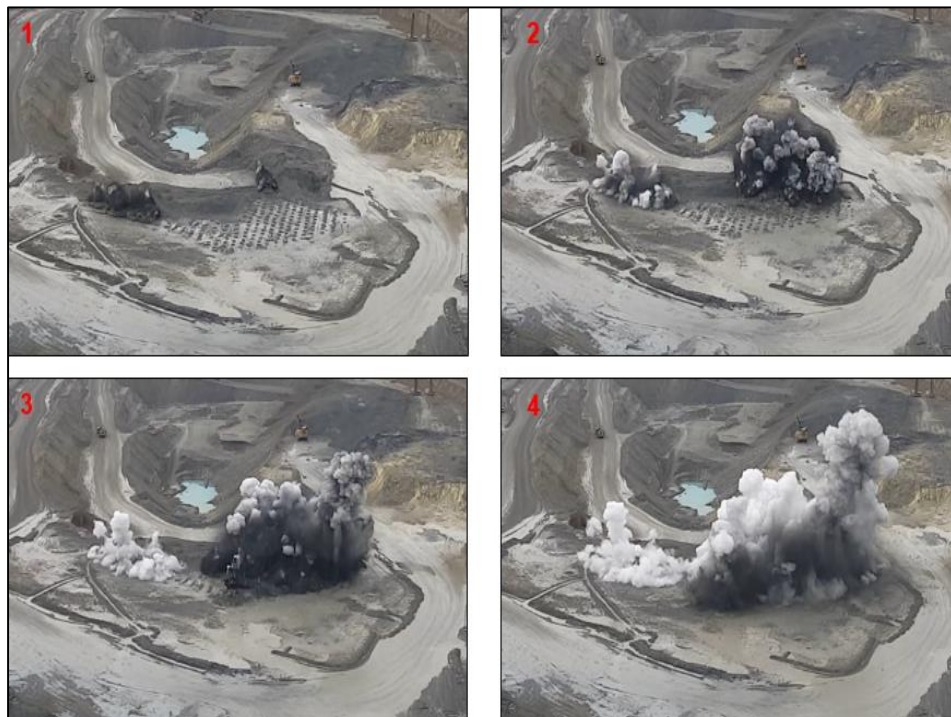


Figura 46. Secuencia de voladura

## b) Resultados

Hora de Voladura Programada a las 12:30 Horas y ejecutada a las 12:35 Horas, 367500 toneladas rotas, no se tuvo presencia de *back up*, se observa buen

esponjamiento y buena fragmentación en la zona superficial, así como buen apilamiento de material, como lo muestra la (figura 47).



*Figura 47.* Esponjamiento y fragmentación superficial.

Mínima presencia de gases nitrosos en la voladura (figura 48), esto a causa de las grietas originadas por la excesiva presencia de agua en los taladros, creando diámetro crítico originando que el explosivo deflagre, (ver anexo 2)



*Figura 48.* Voladura con mínima presencia de gases nitrosos

Resultado del análisis de fragmentación donde el P80 es igual a 1.48"  
Fecha 24 de noviembre del 2018.

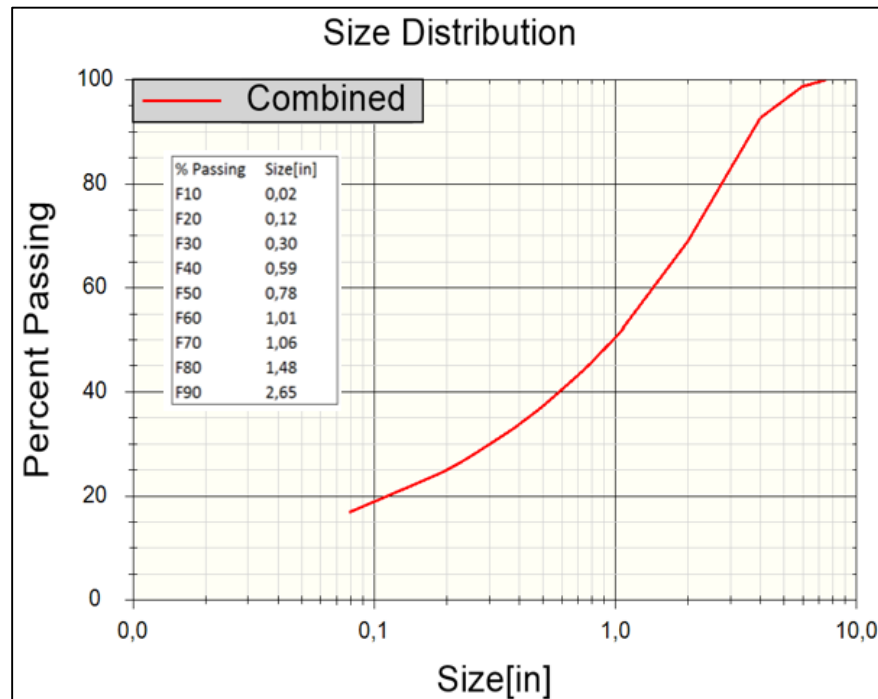


Figura 49. Resultado del análisis de fragmentación P80=1.48". Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

**c) Conclusión:**

Con el factor de potencia a 0.31kg/ton, se logró una adecuada fragmentación, obteniendo un P80 de 1.48", que satisface la meta de 1.50" como se muestra en la (figura 49), para la cuarta y última voladura se van a mantener los parámetros de la tercera voladura.

**5.1.4.4. Cuarta Voladura línea mejorada**

Se realizó el 29 de noviembre del 2019, se mantuvieron los parámetros anteriores.

**a) Antecedentes**

Se cargaron 442 taladros de producción disparados con detonadores electrónicos, 140 taladros con agua, 302 taladros secos, roca dura, el diseño de carga explosiva se ajustó a estas características (figura 50).

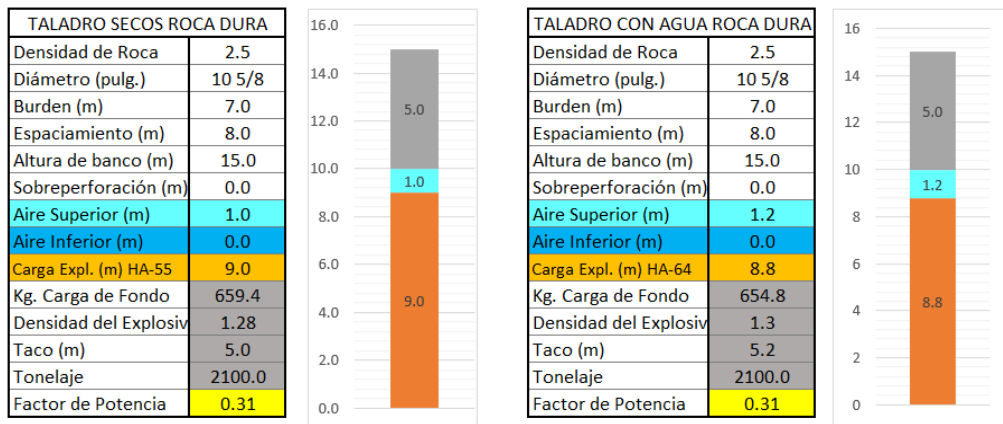


Figura 50. Diseño de carga, cuarta voladura-línea mejorada

Factor de potencia 0.31kg/ton, (tabla 8).

Tabla 8

Factor de potencia primera cuarta línea mejorada

Dureza de roca	68% Taladros secos	32% Taladros con agua	Promedio FP
Dura	0.31	0.31	0.31

En la imagen se observa la inmensa malla de voladura ya amarrada y despejada, listo para la detonación (figura 51).



Figura 51. Fotografía prevoladura

Secuencia de salida: diagonales largas. Se coordinó con el personal de perforación y voladura, tiempo entre taladros: 07 ms. Siendo la salida taladro por taladro para evitar acoplamiento de ondas como se muestra en la (figura 52).

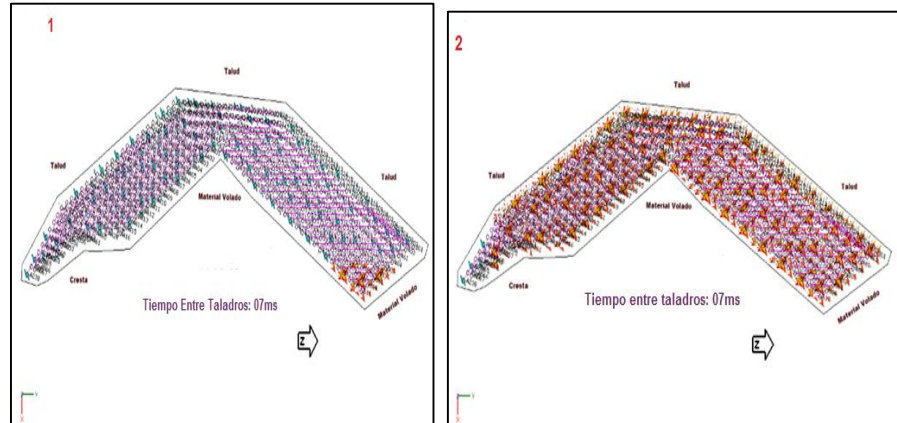


Figura 52. Inicio de detonación. Tomado de JKSimblast [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

Secuencia real de detonación, proyección de rocas y mínima generación de polvo, (figura 53)



Figura 53. Secuencia de detonación

## b) Resultados

Hora de voladura programada 12:30:00 h y ejecutada 12:38 h.

Se disparó 928200 toneladas de mineral, se aprecia buena fragmentación a nivel superficial, se controló el desplazamiento y se logró buen apilamiento de material, no hubo proyección de roca, se cuidó plataforma de perforación (figura 54).



*Figura 54. Fotografía postvoladura*

En la (figura 55), se ve claramente que no hay presencia de humos naranja.



*Figura 55. Postvoladura sin emisión de gases.*

El resultado del análisis de fragmentación de la cuarta voladura es  $P80=1.46''$ , fecha el 01 de diciembre del 2018.



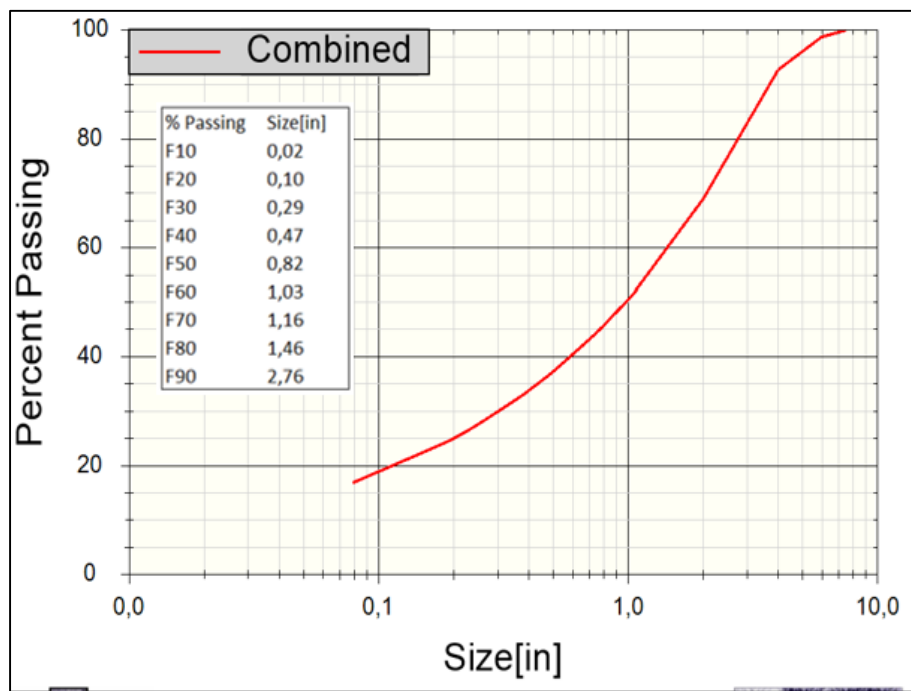


Figura 56 Resultado del análisis de fragmentación P80=1.46". Tomado de Split Desktop [software de computadora], por Split Engineering. Split Engineering LLC.

### c) Conclusión

Manteniendo el factor de potencia a 0.31kg/ton, se logró una adecuada fragmentación, obteniendo un P80 de 1.46", (figura 56).

El promedio de P80 de la línea base es 3.70", con un factor de potencia de 0.18kg/ton, al aumentar el factor de potencia en la Línea Mejorada a 0.31Kg/ton, se logró disminuir el P80 hasta 1.48" en promedio (Tabla 9 y 10).

Tabla 9

*Factor de potencia y P80 de la línea mejorada*

Voladura	FP	P=80
1	0.29	1.62
2	0.30	1.49
3	0.31	1.48
4	0.31	1.46

Por descarte tomamos solo las tres últimas voladuras que son las más parecidas y obtenemos en la (tabla 10):

Tabla 10

*Factor de potencia de la línea mejorada promedio P80 – 1.48*

Voladura	FP	P=80
2	0.30	1.49
3	0.31	1.48
4	0.31	1.46
Promedio	0.31	1.48

Entonces el óptimo factor de potencia es 0.31kg/ton para llegar al P80 de 1.48”, alcanzando de esta manera el objetivo del área de perforación y voladura para satisfacer al cliente, en este caso el área de operaciones mina y planta de procesos.

**Comparación del Perfil Granulométrico de Chancadora Primaria antes y después del cambio de variables en Perforación y Voladura**

Por otro lado, el área de procesos (chancadora primaria) con fotografías digitalizadas antes de ingresar a la chancadora analizadas con *software* y enviadas al programa Ignition, obtuvo los siguientes resultados en voladuras de la línea Base (tabla 11), donde en la tabla de tamaños críticos el tamaño grueso es mayor a 4” y el fino menor a 1 “.

Tabla 11

Análisis granulométrico ingreso chancadora primaria línea base

	Tamaño	1	2	3	4	Granulometría Mina
Size (in)	size (um)	% Passing				% Passing
15	381000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
10	254000	100.00	97.32	98.14	97.35	98.20
8	203200	98.21	94.10	93.90	93.50	94.93
6	152400	94.18	89.59	88.14	88.89	90.20
4	101600	82.38	82.38	80.21	81.92	81.72
2	50800	64.63	70.84	66.23	71.14	68.21
1	25400	51.65	51.57	51.50	51.58	51.58
0.75	19050	42.86	42.28	45.41	43.26	43.45
0.5	12700	33.86	33.32	38.88	35.33	35.35
0.38	9652	28.76	28.14	34.86	30.54	30.58
0.25	6350	22.72	22.17	29.96	24.68	24.88
0.19	4826	19.20	18.72	26.92	21.26	21.53
0.08	2032	11.69	11.39	19.73	13.93	14.19
0	0					0.00

TAMAÑOS CRITICOS	%
GRUESO > 4"	18.28
INTERMEDIO 2( 2" - 4")	13.51
INTERMEDIO 1 (1" - 2")	16.64
FINO (< 1")	51.58
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>

Nota: Adaptado de Ignition v7.7 [software de computadora], por Inductive Automation 2014.

También realizó el análisis de granulometría en voladuras de la línea mejorada, teniendo los siguientes resultados (tabla 12), en donde el tamaño critico grueso es mayor a 1.6" y el fino es menor a 0.8".

Tabla 12

*Análisis granulométrico ingreso chancadora primaria línea mejorada*

	Tamaño	1	2	3	4	Granulometría Mina
Size (in)	size (um)	% Passing				% Passing
4.3	109220	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.5	88900	100.00	97.32	98.14	97.35	98.20
3.1	78740	98.21	94.10	93.90	93.50	94.93
2.8	71120	94.18	89.59	88.14	88.89	90.20
1.6	40640	82.38	82.38	80.21	81.92	81.72
1.3	33020	64.63	70.84	66.23	71.14	68.21
0.8	20320	51.65	51.57	51.50	51.58	51.58
0.66	16764	42.86	42.28	45.41	43.26	43.45
0.5	12700	33.86	33.32	38.88	35.33	35.35
0.38	9652	28.76	28.14	34.86	30.54	30.58
0.25	6350	22.72	22.17	29.96	24.68	24.88
0.19	4826	19.20	18.72	26.92	21.26	21.53
0.08	2032	11.69	11.39	19.73	13.93	14.19
0	0					0.00

TAMAÑOS CRITICOS	%
GRUESO > 1.6"	18.28
INTERMEDIO 2( 1.3"- 1.6")	13.51
INTERMEDIO 1 (0.8" _ 1.3")	16.64
FINO (< 0.8")	51.58
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>

Nota: Adaptado de Ignition v7.7 [software de computadora], por Inductive Automation 2014.

### 5.1.5. Cantidad de explosivo utilizado y tonelaje generado por proyecto de voladura

Se analizó cuatro proyectos de cada línea para realizar el comparativo, tanto en toneladas de mineral roto, kilogramos de explosivo utilizado y factor de potencia en ambas líneas:

Se utilizaron 0.36 Mt (miles de toneladas) de explosivo para volar 4 proyectos de voladura línea base, con lo que se generó 2.04 MMt (millones de toneladas) de material, factor de potencia 0.18Kg/ton.

En cuanto a la línea mejorada, se usaron 0.77 Mt (miles de toneladas) de explosivo para volar 04 proyectos de voladura, con lo que se generó 2.52 MMt (millones de toneladas) de material, factor de potencia 0.31Kg/ton el detalle en la (anexo 3).

En la (Figura 57) se aprecia la cantidad de toneladas rotas y la cantidad de kilogramos de explosivos consumidos tanto en la línea base como en la línea mejorada.

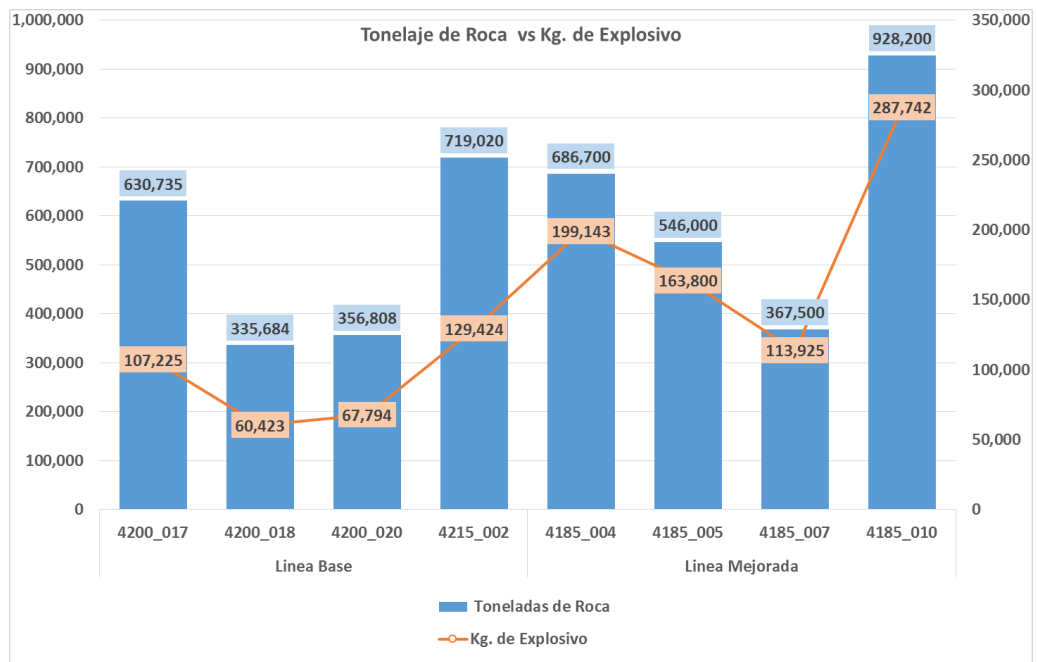


Figura 57. Explosivo utilizado y tonelaje generado por proyecto de voladura

En la (figura 58) se observa el factor de potencia utilizado en cada una de las voladuras de línea base y línea mejorada.

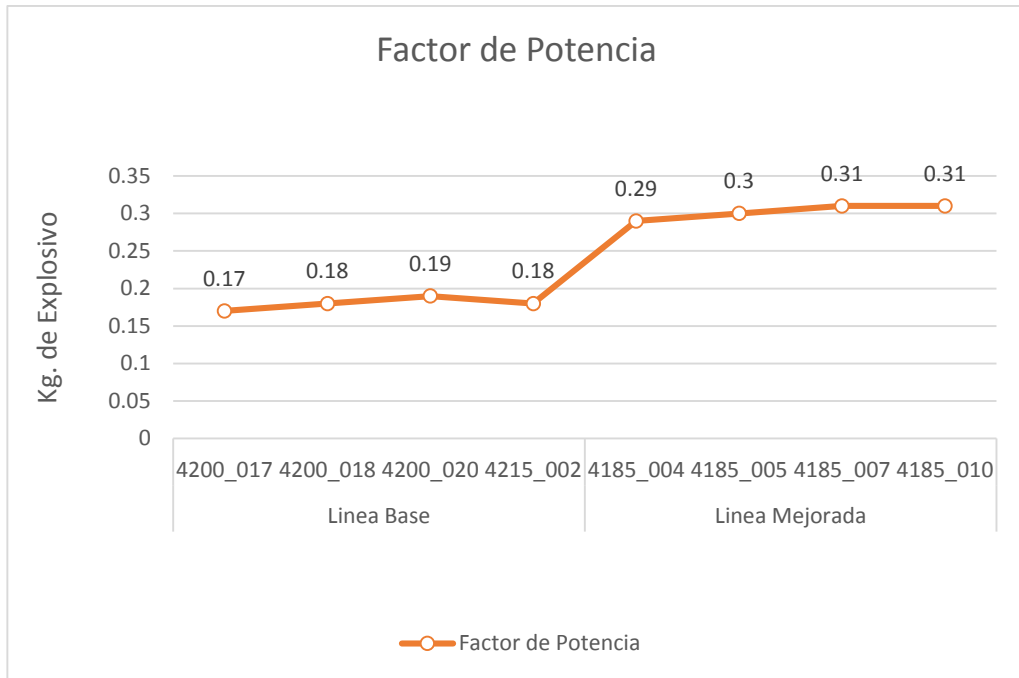


Figura 58. Factor de potencia (kg/ton)

### 5.1.6. Optimización en la generación de microfracturas del material volado

Del análisis realizado a los polígonos pertenecientes, tanto a la línea mejorada como la línea base, se obtuvo que la carga de rotura es menor en 4.4 Kn para la línea mejorada respecto a la línea base.

Del mismo modo, se obtuvo una resistencia promedio de 14 Mpa menor para el material de la línea mejorada respecto de la línea base. Esto quiere decir, el esfuerzo que presenta el material a la compresión antes de romperse es menor.

En la (figura 59) se observa que la carga de rotura en la línea base es de 12.7 Kn y en la línea mejorada es de 8.3, mientras que la resistencia a la compresión en la línea base es de 68 Mpa y 54 Mpa en la línea mejorada.

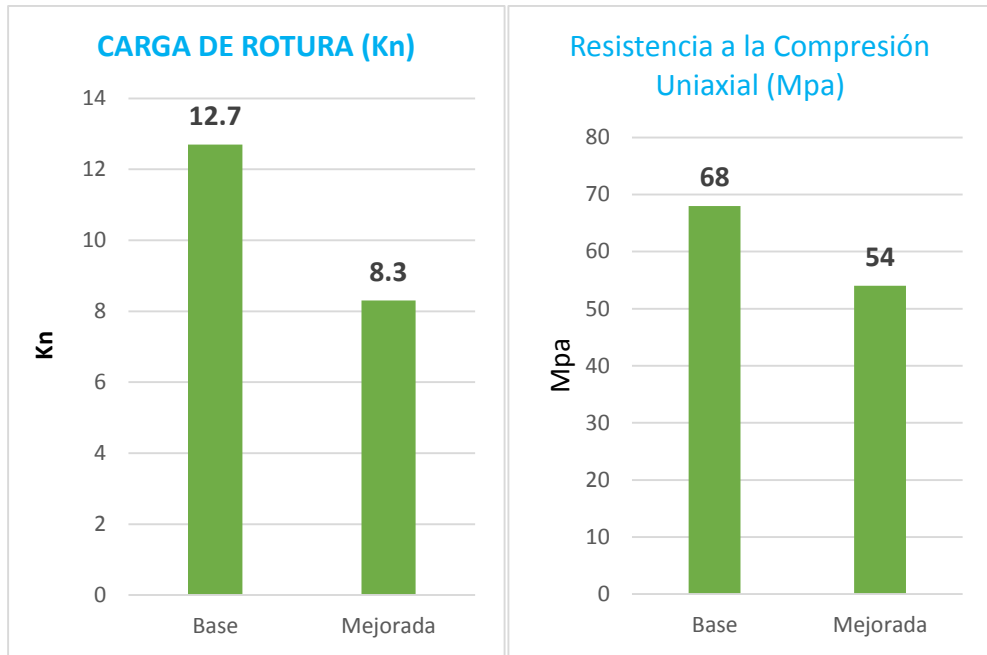


Figura 59. Carga de rotura y Resistencia a la compresión uniaxial

### 5.1.7. Optimización en el tiempo de carguío y productividad de pala

Los cambios en las variables de perforación y voladura tuvieron un impacto positivo en los indicadores operativos de mina. Respecto al tiempo de carguío; este se redujo en 0.27 min (figura 60). En cuanto a la productividad de pala se logró aumentarla en 303 t/h (toneladas por hora) (tabla13)

Tabla 13

*Tiempo de carguío y productividad de pala*

Equipo de Carguío	Promedio de Productividad (t/h)	Promedio de Time Loading (min)	Factor de Potencia
PH002	3,716	2.64	0.18
PH003	3,748	2.62	0.20
PH002	4,000	2.45	0.30
PH003	4,069	2.28	0.31

A continuación en la figura 60 se aprecia la comparación de tiempo y productividad de la Pala.

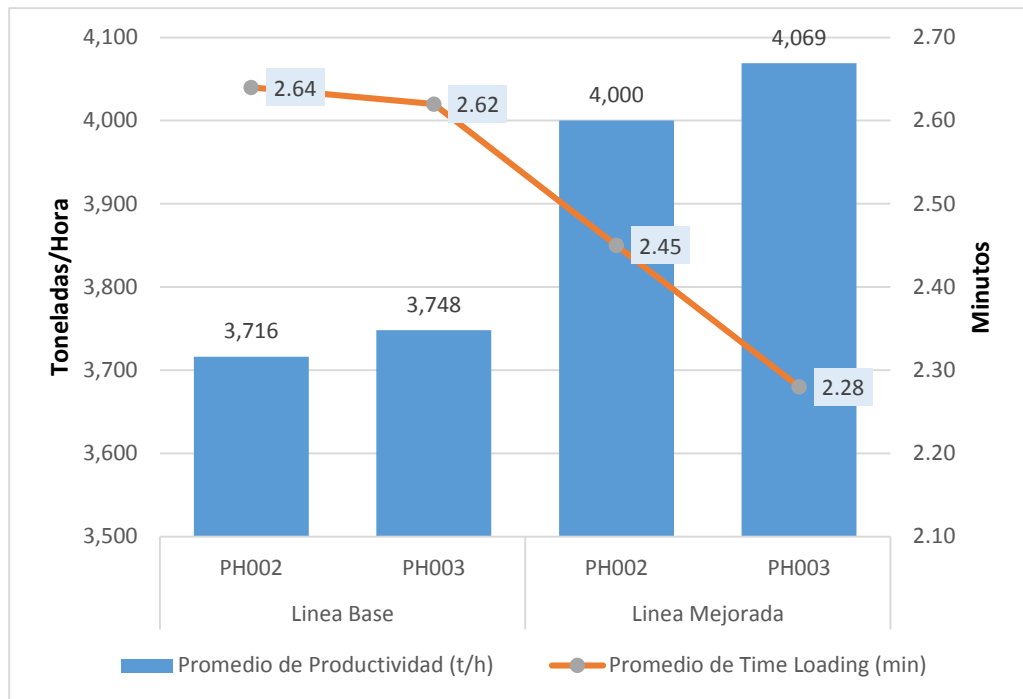


Figura 60. Optimización en el tiempo de carguío y productividad de pala-Time Loading vs. Productividad

### 5.1.8. Optimización en el *Throughput* de planta

La cuantificación del resultado final de optimización del *Throughput* fue llevado a cabo tanto por Operaciones Mina, como por Operaciones Planta.

Operaciones Planta registró un incremento en el *throughput* de aproximadamente 170TMSH (toneladas métricas secas/hora), este análisis abarcó desde diciembre del 2018 hasta el febrero del 2019.

Para lo cual se elaboró una data de la línea base y el seguimiento de la línea mejorada de acuerdo a la información de los polígonos que proporciona el área de geología (anexo 4 y 5).

Luego, se procede a estimar a qué hora pasa el polígono por las líneas de la planta de procesos de modo que pueda ser vinculado con la data que proporciona el sistema de control de Planta Ignition (anexo 6).



Finalmente, se calcula el aumento en el *Throughput*, para esto se tiene en consideración similares características geológicas de los polígonos analizados y, además, que la diferencia entre SPI sea  $\pm 1.5$  (tabla 14 y figura 61 y 62).

Tabla 14

*Cuantificación del resultado de optimización del Throughput*

	LINEA BASE VS LINEA MEJORADA			Promedio TMS/H L. Base	Promedio TMS/H L. Mejorada
	Diciembre	Enero	Febrero		
Promedio TMS/H L Base	3,593	3,590	3,554	3,579	
Promedio TMS/ L Mejorada	3,722	3,757	3,768		3,749
Optimización	129	167	214		
Promedio Optimizado	170				

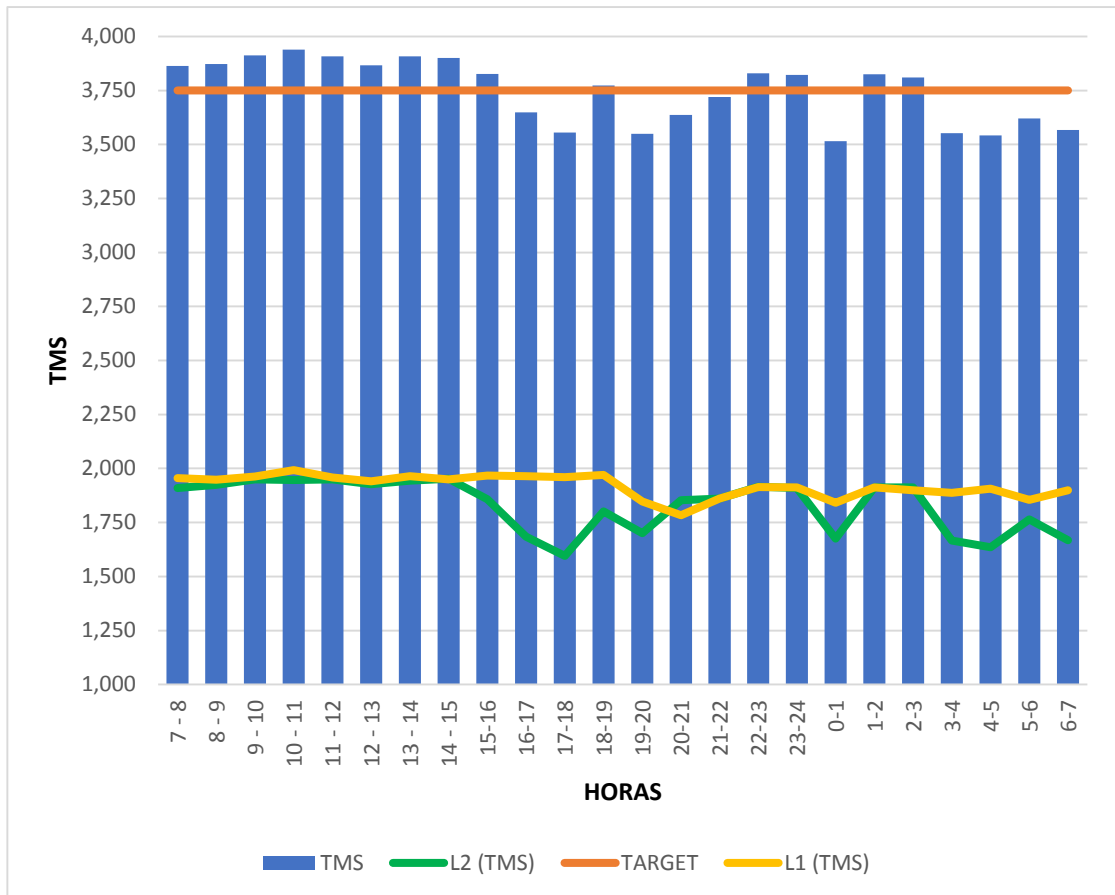


Figura 61. Diagramas de Throughput

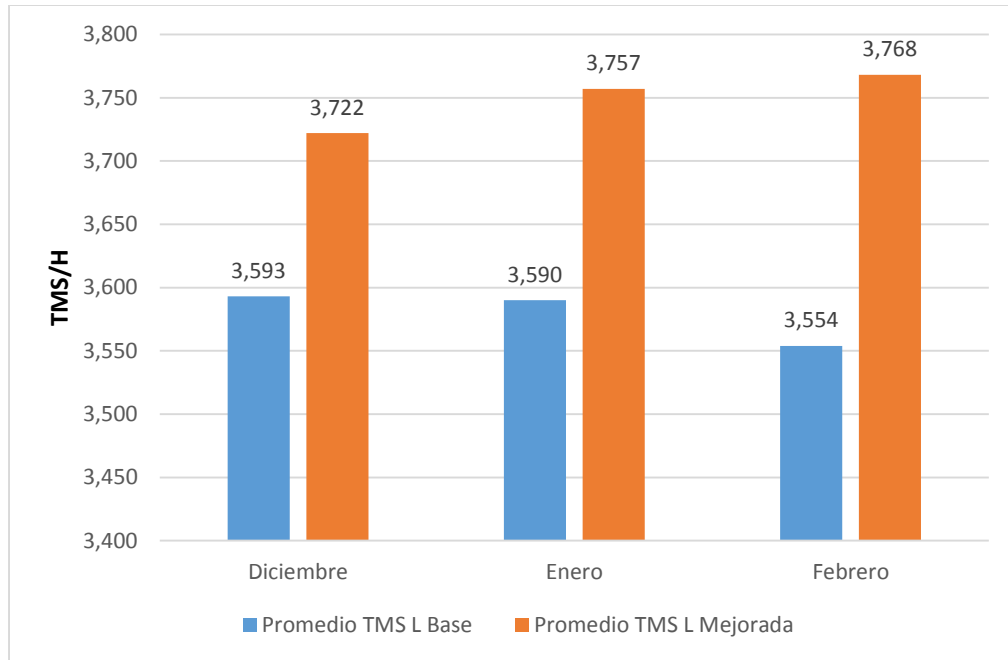


Figura 62. Optimización en el Throughput TMS L Base Vs TMS L Mejorada.

### 5.1.9. Optimización en el *throughput* de mina

El incremento en el *throughput* de planta obtenido por parte de Operaciones Mina fue de 162 TMSH, haciendo un análisis desde diciembre del 2018 hasta febrero del 2019, con un análisis parecido al que hizo planta de procesos.

En la (tabla 15) se puede ver que se optimizó en 162 toneladas métricas secas de mineral por hora en la línea mejorada comparada con la línea base, de esta manera queda comprobada que existe optimización, ya que realizó análisis por las dos partes interesadas.

Tabla 15

*Cuantificación optimizada del resultado de optimización del Througput*

	Promedio de TMS/H
Línea Base	3,560
Línea Mejorada	3,722
Optimización	162

Se observa en la siguiente figura el promedio de toneladas métricas secas por hora tanto en la línea base como en la línea mejorada.

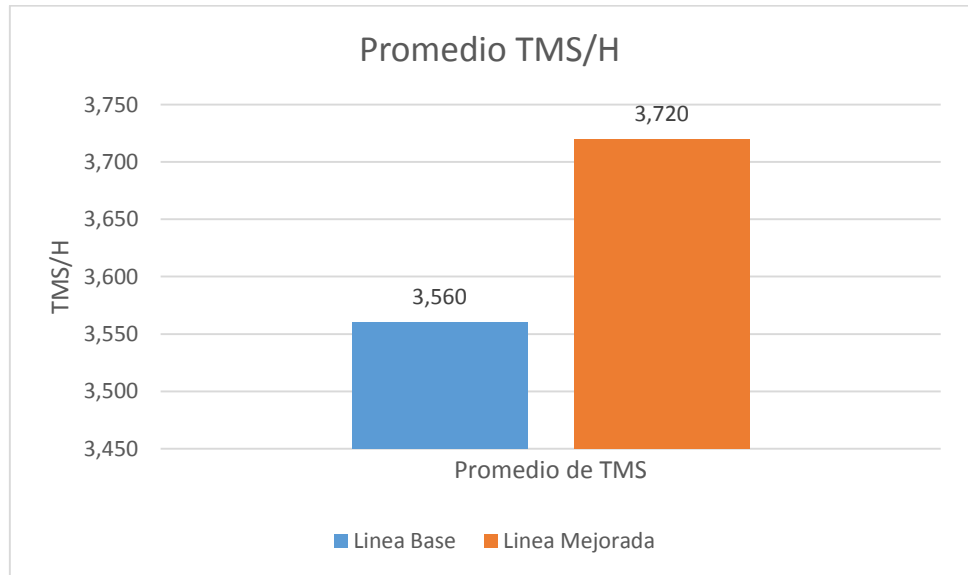


Figura 63. Optimización en el Throughput- línea base vs. línea mejorada

## 5.2. Evaluación Económica

### 5.2.1. Costos Unitarios en perforación y voladura

Para realizar evaluación económica y verificar el incremento de costos en perforación y voladura es necesario obtener datos, por eso, la siguiente tabla muestra los costos del metro perforado, el costo del kg de explosivo, el costo de iniciador y accesorios de voladura por cada taladro necesario para realizar el carguío con explosivos para la posterior detonación. (Tabla 16).

Tabla 16

*Costos unitarios en perforación y voladura*

COSTOS FIJOS			
	Producto	Unidad	US\$
1	Perforación	Mt.	4.2
2	Promedio del costo del Explosivo Heavy-Anfo	Kg.	0.5
3	Iniciador Booster de pentolita 2 lb	Pza.	8.9
4	Detonador no eléctrico 800ms/18m	Pza.	2.80
5	Detonador electrónico 20m	Pza.	23.0

En la siguiente tabla 17, se aprecia los parámetros de perforación, lo relevante es que nos muestra las toneladas rotas generadas por un taladro ya sea de Línea Base o Línea Mejorada para notar la diferencia (en el cálculo de toneladas rotas no se considera la sobre perforación, ya que el banco a minar es de 15 metros).

Tabla 17

*Parámetros de perforación*

Parámetros de Perforación		
Taladro	Línea Base	Línea Mejorada
Burden mts.	9.1	7.0
Espaciamiento mts.	10.5	8.0
Altura de Banco mts.	15.0	15.0
Sobre perforación mts.	0.5	0.0
Densidad de la Roca gr/cc	2.5	2.5
Toneladas Rotas/ Taladro	3583.1	2100.0

A continuación tabla 18, se muestra el costo de perforación por cada taladro y por tonelada también, en cada línea para poder realizar el comparativo (la diferencia del costo por taladro se debe a la sobreperforación en la línea base) entonces tenemos que el sobrecosto de perforación por tonelada es de \$ 0.12.

Tabla 18

*Costo de perforación*

Perforación	Línea Base	Línea Mejorada
Costo Taladro Perforado \$	65.100	63.000
Toneladas Rotas/ Taladro	3583.125	2100.000
Costo Perf./Ton \$	<b>0.018</b>	<b>0.030</b>
Sobrecosto de Perforación / ton	<b>0.012</b>	

En la tabla 19, podemos apreciar el incremento de costos en Voladura comparando la línea base y la línea mejorada.

Tabla 19

*Incrementos de costos en voladura*

Voladura	Línea Base	Línea Mejorada
Toneladas Rotas/ Taladro	3583.13	2100.00
F P Kg/Ton	0.18	0.31
Kg. Explosivo por taladro (promedio)	644.96	651.00
Promedio del costo del Explosivo \$/Kg.	0.500	0.500
Costo de Explos/Taladro \$	322.48	325.50
Costo de Explos/Ton \$	<b>0.090</b>	<b>0.155</b>
Sobrecosto de Voladura \$/ton	<b>0.065</b>	

Además, como se muestra en la tabla 20 debemos considerar el costo de accesorios de voladura por cada taladro, y por ende el costo de accesorios por tonelada rota.

Tabla 20

*Costos de accesorios de voladura*

Iniciador y Accesorios de Voladura	Unidad	Línea Base	Línea Mejorada
Booster de pentolita 2 lb Costo \$	Pza.	8.9	8.9
Detonador no eléctrico 800ms/18m Costo \$	Pza.	2.80	2.80
Detonador electrónico 20m Costo \$	Pza.	23.0	23.0
Costo de Accesorios \$/ taladro		34.7	34.7
Toneladas Rotas/ Taladro		3583.13	2100.00
Costo de Accesorios \$/ Ton		0.0097	0.0165
Sobrecosto \$/ton		0.0068	

Comparando los costos y sobrecostos de perforación y voladura, tenemos como resultado que el incremento es de \$ 0.081/ton de mineral fragmentado tabla 21, con estos datos podemos obtener el incremento de anual de Perforación y Voladura.

Tabla 21

*Costos y sobrecostos de perforación*

	Promedio de C. unitario Accesorios de Voladura (\$/ton)	Promedio de C. unitario Voladura (\$/ton)	Promedio de C. Unitario Perf. (\$/ton)	Promedio de C. Unitario Total (\$/ton)	Promedio de FP (Kg/ton) Resultante
Línea base	0.0097	0.090	0.018	0.118	0.18
Línea Mejorada	0.0165	0.155	0.030	0.2015	0.31
Sobrecosto	0.0068	0.065	0.012	0.084	0.13

Si se proyecta desde principios a fin de año, solo por 353 días considerando 12 días de mantenimiento y paradas programadas, se estima un aumento anual de 2.67 MMUS\$ en Perforación y Voladura (tabla 22).

Tabla 22

*Estimación anual del sobrecosto de perforación y voladura*

Toneladas Día	Toneladas año	Costo Adicional P&V \$/ton	Aumento Total (MMUS\$)
90000	31770000	0.084	2.67

### 5.2.2. Venta Anual Estimada por aumento en *Throughput*

Tomando en cuenta las consideraciones para el cálculo de la utilidad adicional anual tenemos los siguientes datos, el promedio del aumento en el rendimiento del *Throughput* realizado por operaciones planta y operaciones mina, también los diferentes porcentajes de recuperación del mineral (tabla 23).

Tabla 23

*Consideraciones para el cálculo de la utilidad adicional anual.*

Aumento en <i>Throughput</i>	Planta	Mina	Promedio
(TMSH) Toneladas Métricas Secas/hora	170	162	166

Consideraciones	
Año (días)	365
Día (horas)	24
Ley Cu (%)	0.33
Rec. Metalúrgica (%)	80
Rec. Económica (%)	90
Precio Cu (\$) diciembre del 2018	6000

Tabla 24

*Toneladas adicional al año por aumento de Throughput*

<b>Toneladas adicionales al Año por aumento de Throughput</b>	
Aumento en Throughput (TMSH)	166
Año (días considerando mantenimiento)	353
Día (horas)	24
Toneladas adicionales al Año	<b>1406352</b>
<b>Recuperación Anual en Toneladas del Mineral</b>	
Ley Cu (%)	0.33
Rec. Metalúrgica (%)	80
Rec. Económica (%)	90
Toneladas adicionales al Año	1406352
Recuperación toneladas de Cu	<b>3341</b>

La optimización alcanzada en el *throughput* debido a cambios en las variables de perforación y voladura nos da como resultado una ganancia adicional estimada de 17.43 MMU\$ (tabla 25).

Tabla 25

*Ganancia adicional estimada anual*

<b>Ganancia adicional Estimada Anual</b>	
Recuperación Anual toneladas de Cu	3341
Precio Cu (\$)/Ton	6000
Revenue Estimado (MMUS\$)	<b>20.05</b>
Sobrecosto en P&V (MMUS\$)	2.67
Revenue Real Estimado (MMUS\$)	<b>17.38</b>



## Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

Primero, este nuevo enfoque ha permitido optimizar la geometría de las mallas de perforación y los diseños de cargas de los taladros para las voladuras.

Segundo, el impacto en el P80 y el porcentaje de finos generados menor a 1.5" se logró mediante un aumento en el Factor de Potencia: 0.18 a 0.31 Kg/t.

Tercero, de acuerdo al análisis granulométrico, se incrementó el porcentaje de finos menor a 1.5", respecto la línea base que fue de 3.70". Así mismo, el P80 de la línea mejorada se redujo a 1.48" promedio.

Cuarto, un aporte adicional, que tal vez no consideraron investigaciones similares es la resistencia de la roca fragmentada, que en este caso es de 14 Mpa menor para el material de línea mejorada respecto a la línea base. Esto quiere decir que el esfuerzo que presenta el material a la compresión antes de romperse es menor.

Quinto, las modificaciones en las variables de perforación y voladura también tuvieron un impacto positivo en los tiempos de carguío y productividad de las palas. Es así que se aumentó la productividad de las palas en 310 t/h y se disminuyó el tiempo de carguío en 0.27 min, este punto tampoco se consideró en investigaciones anteriores.

Sexto, se estimó un aumento en el costo anual en perforación y voladura de US\$ 2.67 MM.

Séptimo, con los cambios en los parámetros de perforación y voladura, se incrementó el *throughput* de Planta en 166 t/h promedio, entre planta y mina según las fechas estimadas en el Gantt (diciembre-febrero). Esto significa una utilidad anual adicional de US\$ 20.05 MM menos el sobre costo de perforación y voladura de US\$ 2.67 MM la utilidad anual adicional de US\$ 17.38 MM.

## Recomendaciones

En primer lugar, debido a los resultados satisfactorios del proyecto llevado a cabo, se continuará en adelante con proyectos de voladura de malla reducida de mayor factor de potencia. De igual manera, se continuará ajustando los parámetros de perforación y voladura buscando mejores resultados a un menor costo o a un aumento justificado.

En segundo lugar, a medida que va ampliándose la mina se tiene una visión geológica más vasta, se recomienda afinar los parámetros de perforación y voladura de acuerdo a la mineralización, litología, alteración, SPI y WBI.

En tercer lugar, se recomendó que el análisis granulométrico y análisis de carga puntual, en la medida que se pueda, sea una actividad rutinaria para dar seguimiento continuo a los polígonos generados de las voladuras.

En cuarto lugar, se exhortó un mayor estudio y evaluación de las consideraciones que se deben tomar en los modelos de análisis de fragmentación en relación al efecto de las microfracturas generadas en las voladuras, ya que este repercutirá directamente sobre los costos de chancado y molienda.

En quinto lugar, se invita analizar y entender mejor la interacción entre el macizo rocoso y el explosivo, y cómo afecta al índice de fracturamiento y microfracturas en las rocas.

En sexto lugar, se recomienda una sinergia perenne entre las áreas de Operaciones Mina y Operaciones Planta, puesto que el flujo y el intercambio de información entre áreas permitirán la mejora continua dentro de la empresa.

En séptimo lugar, resulta vital medir cuáles son los efectos de la generación de finos y el aumento del *throughput* en los KPI's metalúrgicos (grado de concentrado y recuperación metalúrgica).

## Referencias Bibliográficas

- Agreda, C. (2006). *Operaciones mineras unitarias de perforación y voladura de rocas*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Avilés, E. (2004). *Métodos de explotación a cielo abierto*.
- Calderon, M. (2015). *Optimización de las prácticas de perforación y Voladura en el avance y producción de la minería de mediana escala – Unidad minera Macdesa*. Huancayo: Universidad Nacional del Centr del Perú.
- Dávila, F. (2015). *Influencia de la voladura en el Throughput del Molino*. Lima: Cia Minera Antamina S.A.
- Empresa Enaex de Chile (2006). *Guía del explosivista*. Recuperado de [www.enaex.com](http://www.enaex.com)
- Huanca, J. (2018). *Predicción de la fragmentación en la voladura de bancos de producción de la U.M. Tacaza*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano .
- ITG. (2004). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Jáuregui, O. (2009). *Reducción de los costos Operativos en mina, mediante la optimización de los estandartes de las operaciones unitarias de perforación y voladura*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- López, C., & López, E. (2013). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Arias Montano.
- Marcañaua, R. (2008). *Perforación y voladura basada en el RMR*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- MineSight Software Solutions Version 10 [software de computadora]. Mintec, INC.*
- Poma, J. (2012). *Importancia de la fragmentacion de la roca en el proceso Gold Mill - Minera Yanacocha*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Samaniego, J. (2004). *Sección Ingeniería de Minas - "Apuntes del curso de Mecánica de Rocas"*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Software ArcGis Version 10.4.1 [*software de computadora*]. ESRI.

Software JKSimblast [*software de computadora*]. Split Engineering: Split Engineering LLC.

Tam, J., Vera, G., & Oliveros, R. (2008). *Tipos, métodos y estrategias de investigación científica*. . Pensamiento y Acción.

Vidal, E. (2015). *Sección Ingeniería de Minas (2005) – "Apuntes del curso de Ingeniería de Explosivos"*. Lima: – Pontificia Universidad Católica del Perú.

## ANEXOS

### Anexo 1 Detonadores Electrónicos



## Antecedentes

- La introducción de los detonadores electrónicos a la minería y la altísima precisión de tiempos de retardos que estos poseen, permitiendo programar cualquier tiempo con precisión al milisegundo y con una dispersión prácticamente nula, han proporcionado a la industria minera una herramienta de optimización para las voladuras, que antes no estaba disponible con los sistemas pirotécnicos.
- El uso de esta tecnología y su altísima precisión ha traído beneficios como son, la Optimización de la fragmentación, control de vibraciones, estabilidad de paredes, control de contornos, control de fly rocks, control del movimiento de la pila, mayor avance en desarrollos, control de dilución, etc.
- Estos controles han permitido mejorar además la productividad y la eficiencia de los procesos mineros tales como carguío, transporte, molienda y procesamiento. Además del beneficio económico, la iniciación electrónica ha traído un mayor nivel de confianza a la voladura y el fortalecimiento de los estándares de seguridad.



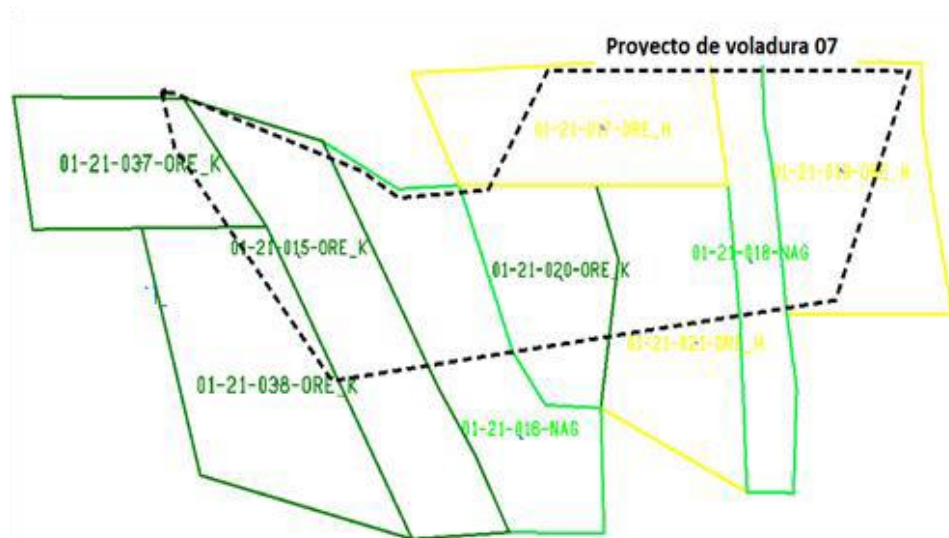
## Anexo 2 Propiedades del Anfo y Heavy Anfo

PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS EXPLOSIVOS										
PRODUCTO	DENSIDAD (gr/cc) +/- 3%	VELOCIDAD DE DETONACION (mt/seg)	POTENCIA ABSOLUTA EN PESO "ENERGIA"			POTENCIA RELATIVA EN PESO RWS (%)	POTENCIA ABSOLUTA EN VOLUMEN ABS (cal/cc)	POTENCIA RELATIVA EN VOLUMEN RBS (%)	RESISTENCIA AL AGUA	DIAMETRO CRITICO (pulg)
			cal/gr	Joule/gr	MJoule/Kgr					
ANFO	0.780	3800 - 4450	910	3810.0	3.81	100	710	100	NULA	> 1.5
HA - 28	0.910	4350 - 4700	865	3621.6	3.62	95.05	787	111	MALA	> 4
HA - 37	1.000	4800 - 5100	844	3533.2	3.53	92.74	844	119	MALA	> 4
HA - 46	1.200	4950 - 5350	825	3454.1	3.45	90.66	990	139	MALA	> 4.5
HA - 46/55	1.250	5300 - 5600	816	3416.4	3.42	89.67	1020	144	REGULAR	> 4.5
HA - 55	1.305	5200 - 5450	804	3364.5	3.36	88.31	1049	148	REGULAR	> 4.5
HA - 64	1.315	5450 - 5800	770	3221.7	3.22	84.56	1012	143	BUENA	> 5
HA - 73	1.320	5450 - 5800	735	3077.3	3.08	80.77	970	137	BUENA	> 5

**Anexo 3**  
**Comparación de 4 Voladuras de la Línea Base y 4 Voladuras de la Línea Mejorada**

	# de Proyecto	Toneladas de Roca	Kg. de Explosivo	Factor de Potencia
Línea Base	4200_017	630,735	107,225	0.17
	4200_018	335,684	60,423	0.18
	4200_020	356,808	67,794	0.19
	4215_002	719,020	129,424	0.18
Línea Mejorada	4185_004	686,700	199,143	0.29
	4185_005	546,000	163,800	0.30
	4185_007	367,500	113,925	0.31
	4185_010	928,200	287,742	0.31

**Anexo 4 Polígonos de mineral**



Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

## Anexo 5

### Proyectos de voladura y polígono de acarreo de malla habitual o reducida

POLIGONOS	MINERALIZACION	LIT. PRED	PROY. 1	PROY. 2	PROY. 3
01-21-009-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_003		
01-21-011-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_005	4185_003	
01-21-013-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_005		
01-21-017-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_007	4185_005	4185_003
01-21-019-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_007	4185_004	4185_008
01-21-021-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_004	4185_007	
01-21-022-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_004		
01-21-023-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_008	4185_004	
01-21-029-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_009		
01-21-032-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_009		
01-21-035-ORE_H	LÍNEA MEJORADA	I	4185_010		
01-21-042-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_006		
01-21-044-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_011		
01-21-045-ORE_H	LÍNEA BASE	I	4185_011		

*Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.*



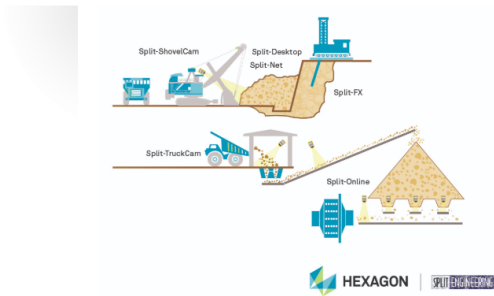
**Anexo 6**  
**Estimación de la hora en que se procesa el polígono en el molino**  
**SAG**

TURNO	TIEMPO L1 (TMS)	L2 (TMS)	TMH	TMS	TARGET	Polígono							
D	7 - 8	1,955	1,909	4,101	3,864	3,750	01-21-004-ORE_H	616	01-21-004-ORE_H	717	01-21-019-ORE_H	930	1838
	8 - 9	1,948	1,924	4,109	3,872	3,750	01-21-019-ORE_H	1,629	01-21-019-ORE_H	688	01-21-004-ORE_H	1,792	
	9 - 10	1,963	1,950	4,152	3,913	3,750			01-21-004-ORE_H	1,446	01-21-004-ORE_H	2,706	
	10 - 11	1,993	1,947	4,181	3,940	3,750	01-21-004-ORE_H	1,017	01-21-004-ORE_H	227	01-21-021-ORE_H	2,937	
	11 - 12	1,959	1,949	4,147	3,908	3,750	01-21-021-ORE_H	323	01-21-020-ORE_K	224	01-21-020-ORE_K	3,600	
	12 - 13	1,940	1,927	4,103	3,867	3,750	01-21-020-ORE_K	137	01-21-020-ORE_K	3,246	01-21-020-ORE_K	720	
	13 - 14	1,965	1,943	4,147	3,908	3,750	01-21-020-ORE_K	2,798	01-21-021-ORE_H	1,188	01-21-021-ORE_H	161	
	14 - 15	1,949	1,952	4,140	3,901	3,750					01-21-021-ORE_H	4,140	
	15-16	1,968	1,858	3,953	3,826	3,750			01-21-021-ORE_H	399	01-21-021-ORE_H	3,554	
	16-17	1,965	1,684	3,766	3,649	3,750			01-21-021-ORE_H	1,441	01-21-021-ORE_H	2,325	
	17-18	1,960	1,596	3,667	3,556	3,750			01-21-021-ORE_H	3,187	01-21-021-ORE_H	1,480	
	18-19	1,971	1,802	3,897	3,773	3,750			01-21-021-ORE_H	3,097	01-21-004-ORE_H	800	
	19-20	1,848	1,701	3,766	3,549	3,750			01-21-004-ORE_H	3,164	01-21-004-ORE_H	602	
	20-21	1,784	1,853	3,860	3,637	3,750	01-21-004-ORE_H	2,487	01-21-019-ORE_H	225	01-21-019-ORE_H	1,148	
21-22	1,860	1,860	3,948	3,720	3,750			01-21-019-ORE_H	3,051	01-21-019-ORE_H	897		
22-23	1,914	1,915	4,063	3,829	3,750			01-21-019-ORE_H	2,890	01-21-019-ORE_H	1,173		
23-24	1,912	1,910	4,056	3,822	3,750			01-21-019-ORE_H	2,827	01-21-004-ORE_H	1,229		
N	0-1	1,841	1,675	3,731	3,516	3,750			01-21-004-ORE_H	2,009	01-21-004-ORE_H	1,722	
	1-2	1,912	1,913	4,059	3,825	3,750	01-21-004-ORE_H	1,560	01-21-019-ORE_H	698	01-20-097-ORE_K	713	1088
	2-3	1,899	1,912	4,044	3,811	3,750			01-21-019-ORE_H	2,737	01-21-019-ORE_H	1,307	
	3-4	1,887	1,666	3,770	3,553	3,750			01-21-019-ORE_H	2,475	01-21-019-ORE_H	1,295	
	4-5	1,907	1,635	3,759	3,542	3,750	01-21-019-ORE_H	366	01-21-004-ORE_H	2,136	01-21-004-ORE_H	1,257	
	5-6	1,855	1,765	3,841	3,620	3,750	01-21-004-ORE_H	1,828	01-21-019-ORE_H	1,425	01-21-019-ORE_H	588	
6-7	1,899	1,668	3,786	3,567	3,750					01-21-019-ORE_H	3,786		
		46054.00	43914.00	95,046	89,968	90,000							

Tomado de MineSight Software Solutions [software de computadora], por Mintec, INC.

## Anexo 7 Versiones de Split

SPLIT-ONLINE	SPLIT-SHOVELCAM	SPLIT-TRUCKCAM	SPLIT-DESKTOP	SPLIT-NET	SPLIT-FX
Split-Online es un sistema de monitores continuo, automático y no invasivo que emplea las tecnologías de procesamiento de imágenes.	Split-ShovelCam En la corta, la medición online de la pila de voladura asocia el tamaño de partícula.	Split-TruckCam Captura y procesa automáticamente las imágenes de la alimentación primaria de la trituradora.	Obtenga análisis de tamaños de partículas en diferentes lugares como botaderos, pilas de lixiviación, descarga de camiones y más con Split-Desktop.	Permita que el experimentado personal de Split Engineering procese sus imágenes con Split-Net.	Utilice Split-FX para desarrollar automáticamente la caracterización de la fractura de un macizo rocoso en caras expuestas de roca.



### Sistemas, Software y Servicios

Desde 1997, Split Engineering ha suministrado Sistemas, Software y Servicios para la industria minera mundial facilitando la Medición y el Control de los Procesos.

Cuantifique su fragmentación: Split Engineering es líder en el suministro de sistemas y software de medición de tamaño de roca en cada etapa del proceso de comminación.