

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINA**



**OPTIMIZACIÓN DE FRAGMENTACIÓN DE ROCAS MODIFICANDO LOS  
PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN LA UNIDAD MINERA TACAZA – CIEMSA**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**PRESENTADO POR:**

**RONY SAMUEL TIPO CHAMBI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**OPTIMIZACIÓN DE FRAGMENTACIÓN DE ROCAS MODIFICANDO LOS  
PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN LA UNIDAD MINERA TACAZA – CIEMSA**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

PRESENTADO POR:

**RONY SAMUEL TIPO CHAMBI**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO DE MINAS**

**APROBADO POR:**

PRESIDENTE:

  
DR. JORGE GABRIEL DURANT BRODEN

PRIMER MIEMBRO:

  
M.SC. AMÉRICO ARIZACA AVALOS

SEGUNDO MIEMBRO:

  
ING. GABRIELA MISTRAL RIVEROS MENDOZA

**ÁREA** : Costos y comercialización de concentrados minerales metálicos y no metálicos

**TEMA** : Optimización de fragmentación de rocas modificando los parámetros de perforación en la Unidad Minera Tacaza – Ciemsa

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 20 de Noviembre de 2019

### **DEDICATORIA.**

*Dedico el trabajo a Dios y a mis padres Felipe y Rosa, quien, con su paciencia, comprensión, sabios consejos y su apoyo incondicional hicieron posible el logro de mi noble profesión.*

*A todas las personas que contribuyeron en mi formación profesional.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por bendecirme la vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, por ser el apoyo y fortaleza de aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres Felipe y Rosa por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

Agradezco a mis docentes de la Facultad de Ingeniería de Mina – Universidad Nacional del Altiplano, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión. También a todos mis amigos de la Unidad Minera Tacaza –Ciensa y en especial a ECM – COEMPSA.

## Índice

Resumen.....	8
I. Introducción.....	8
1.1. Antecedentes.....	9
1.2. Hipótesis.....	10
1.3. Objetivo general.....	10
1.3.1. Objetivos específicos.....	10
1.4. Justificación.....	10
II. Materiales y método.....	11
2.1. Ubicación y Accesibilidad.....	11
2.2. Geología local.....	12
2.3. Estimación de recursos.....	12
2.4. Costos unitarios.....	12
2.5. Determinación del burden.....	12
III. Resultados.....	13
3.1. Parámetros predeterminados.....	13
3.2. Primera modificación.....	15
3.3. Segunda modificación.....	17
3.4. Tercera modificación.....	18
IV. Discusión.....	20
V. Conclusiones.....	22
Referencias.....	22

## Índice de tablas

Tabla 1. Accesibilidad a U.M. Tacaza .....	11
Tabla 2. Estimación de Recursos U.M. Tacaza.....	12
Tabla 3. Costos unitarios.....	12
Tabla 4. Determinación de burden mediante de modelo de Kuz Ram.....	13
Tabla 5. Parámetros de perforación de voladura P-000 .....	13
Tabla 6. Parámetros de voladura de voladura P-000.....	14
Tabla 7. Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-000.....	14
Tabla 8. Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-000.....	14
Tabla 9. Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-000 .....	14
Tabla 10. Costo de producción de mineral de voladura P-000.....	14
Tabla 11. Parámetros de perforación de voladura P-001 .....	15
Tabla 12. Parámetros de voladura de voladura P-001 .....	15
Tabla 13. Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-001 .....	15
Tabla 14. Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-001.....	16
Tabla 15. Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-001 .....	16
Tabla 16. Costo de producción de mineral de voladura P-001.....	16
Tabla 17. Parámetros de perforación de voladura P-002 .....	17
Tabla 18. Parámetros de voladura de voladura P-002.....	17
Tabla 19. Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-002.....	17
Tabla 20. Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-002.....	17
Tabla 21. Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-002 .....	17
Tabla 22. Costo de producción de mineral de voladura P-002.....	18
Tabla 23. Parámetros de perforación de voladura P-003 .....	18
Tabla 24. Parámetros de voladura de voladura P-003.....	19
Tabla 25. Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-003 .....	19
Tabla 26. Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-003.....	19
Tabla 27. Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-003 .....	19
Tabla 28. Costo de producción de mineral de voladura P-003.....	19
Tabla 29. Resumen de resultados.....	21

## Índice de figuras

Figura 1. Galería de imágenes de muestra de bolonería por voladura primaria.....	11
Figura 2. Dimensionamiento de partículas de voladura P-000. ....	14
Figura 3. Curva granulométrica de voladura P-000.....	15
Figura 4. Fotografía de voladura P-000 .....	15
Figura 5. Dimensionamiento de partículas de proyecto P-001. ....	16
Figura 6. Curva granulométrica de proyecto P-001.....	16
Figura 7. Fotografía de proyecto P-001. ....	16
Figura 8. Dimensionamiento de partículas de voladura P-002. ....	18
Figura 9. Curva granulométrica de voladura P-002.....	18
Figura 10. Fotografía de voladura P-002 .....	18
Figura 11. Dimensionamiento de partículas de voladura P-003. ....	20
Figura 12. Curva granulométrica de voladura P-003.....	20
Figura 13. Fotografía de voladura P-003 .....	20
Figura 14. Diagrama de costos unitarios según P80.....	21

# Optimización de fragmentación de rocas modificando los parámetros de perforación en la Unidad Minera Tacaza – Ciemsa

## Optimization of rock fragmentation by modifying drilling parameters in Tacaza Mining Unit – Ciemsa

Rony Samuel Tipo Chambi

[samueltipo6294@gmail.com](mailto:samueltipo6294@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6648-6689>

Facultad de Ingeniería de Minas - Universidad Nacional del Altiplano - Puno

### Resumen

Con objetivo de optimizar la fragmentación de rocas en mineral modificando los parámetros de perforación, para maximizar el rendimiento de equipos en los procesos de carguío y transporte, y minimizar de costo producción de mineral. Desarrollado en tipo de roca brecha masiva. Se utilizó el modelo teórico de Kuz Ram para determinar una fragmentación media de X50 de 12 cm, teniendo en cuenta que el ancho de la parrilla de la chancadora primaria es de 10 pulg. Se realizó un análisis de fragmentación con parámetros predeterminados analizándose el rendimiento de equipos y su costo de producción de mineral, posterior a ello se realizó 03 pruebas adicionales con parámetros modificados de perforación, donde se logró optimizar la fragmentación de rocas de un P80 de 10.17 pulg a 4.87 pulg, modificándose el parámetro de perforación de una malla cuadrado a triangular con burden y espaciamiento de 2.3 m x 2.3 m a 1.90 m x 2.10 , y se logró minimizar el costo de producción de mineral de 1.86US\$/ton a 1.58 US\$/ton.

*Palabras clave:* fragmentación de rocas, modificación de parámetros, rendimiento de equipos, costo de producción, perforación.

### Abstract

With objective of optimizing the fragmentation of rocks in ore by modifying the drilling parameters, to maximize performance of equipment in processes of loading and haulage, and minimizing ore production cost's. Developed in rock type massive breccia. Kuz Ram's theoretical model was used to determine an average fragmentation of X50 of 12cm, taking into account that the width of the primary crusher grill is 10 in. A fragmentation analysis was carried out with predetermined parameters analyzing the performance of equipment and its cost of ore production, after which 03 additional tests were carried out with modified drilling parameters, where it was possible to optimize the fragmentation of rocks of a P80 of 10.17 in. to 4.87 in., modifying the drill pattern of square to triangular with burden and spacing of 2.3 mx 2.3 m to 1.90 m x 2.10 m and it was possible to minimize cost of ore production from US\$ 1.86/ton to US\$ 1.58 / ton.

*Keywords:* rock fragmentation, parameter modification, equipment performance, production cost, drilling.

### I. Introducción

El proceso de perforación y voladura se considera como una las operaciones unitarias

esenciales de la actividad minera y actualmente en la Unidad Minera Tacaza se tiene un gran problema en la fragmentación de



rocas como resultado de las voladuras primarias ejecutadas en material de tipo mineral en especial con el tipo de roca brecha masiva o brecha roja. Ante ello surge otros inconvenientes tales como: menor rendimiento horario de equipos producción principalmente excavadoras, volquetes generándose mayor consumo de horas de equipo en operación. Esta mala fragmentación de rocas obliga que se haga el uso de rompebancos para fragmentos de 10 pulg a 16pulg, y para bancos de mayor de 16pulg se emplea una voladura secundaria re perforándose nuevamente los bolones, cargándose con explosivo y en este último proceso no es fácil controlar la carga explosiva generándose pérdida de mineral por dispersión de rocas.

El presente estudio se centra en optimizar la fragmentación de rocas realizando modificación de algunos parámetros de perforación, tales como: inicialmente el diseño geométrico de la malla de perforación era cuadrado y se modificara por malla triangular, también se modificara las dimensiones del burden y espaciamento, mediante esto se busca maximizar el rendimiento de los equipos de producción y al final reducir el costo de producción de mineral.

Los rendimientos de equipos indicados en el artículo, es en las mejores condiciones operativas tales como: buen estado y doble vía de tránsito, amplios plataformas de descarga de mineral en cancha de gruesos, plataforma amplia para el giro de volquete con doble carril en la zona de carguío, adecuada

distribución de flota o cantidad de volquetes según rendimiento de equipo de carguío, exclusivo vía de transito de equipos pesado (haul road) con máximas velocidad permisibles, alta disponibilidad mecánica de los equipos de producción, operadores con altos rendimientos y con criterios de sentido común de operatividad con el equipo, capacitados permanentemente el área operativa, el área de seguridad y salud en el trabajo.

### **1.1. Antecedentes**

Varios estudios han demostrado que cuando se tiene una mala fragmentación de rocas, el primer paso más viable es reducir el burden de la malla de perforación como el caso de Oviedo Nina (2017) menciona que “*la aplicación de estas teorías permitió la mejora del P80 a 6.5 cm, con lo que se demuestra una optimización en la fragmentación del material volado, lo cual nos va a reducir los costos de carguío y acarreo y conminación (procesamiento metalúrgico), con un ligero incremento de los costos de perforación y voladura*” (p.5)

En el trabajo de investigación un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la voladura de rocas, desarrollado en base al modelo Kuz-Ram, su objetivo se sustenta en que dicha investigación nos proporcionaría una optimización en las operaciones minero-metalúrgicas, porque teniendo una óptima fragmentación de rocas, se podría minimizar

sus tiempos operativos y maximizar su productividad (Linares, 2018).

Según Mamani Challco (2019) menciona que *“que si existe una buena fragmentación mejora el rendimiento de los equipos de carguío y transporte, mejora el porcentaje de recuperación del mineral y disminuye los costos operativos”* (p.66).

De acuerdo con Hustrulid (1999) afirma que *“la ingeniería de la fragmentación va a ser una parte importante de la minería en el futuro. A medida que las máquinas de carga y transporte se vuelven más automatizados, como las fajas transportadoras, será necesaria una especificación mucho mejor del tamaño y/o granulometría del material fragmentado”* (p.1).

Según Gómez Canchiahumán (2012) mencionó que *“a través optimización de los estándares de las operaciones unitarias de Perforación y voladura, se logró la reducción del costo unitario total de Mina en 1.51 US\$/t es decir una reducción del 7%”* (p.4).

## **1.2. Hipótesis**

Se puede optimizar la fragmentación de rocas modificando los parámetros de perforación.

- Al tener una buena fragmentación de rocas es posible maximizar el

rendimiento de horario de los equipos y con ello se puede reducir el costo equipos en producción de mineral.

## **1.3. Objetivo general**

Optimizar la fragmentación de rocas modificando los parámetros de perforación en la Unidad Minera Tacaza – Ciemsa

### *1.3.1. Objetivos específicos*

- Optimizar la fragmentación de rocas en mineral.
- Modificar los parámetros de perforación.
- Maximizar los rendimientos de los equipos de producción de mineral.
- Reducir el costo de producción de mineral.

## **1.4. Justificación**

En la Unidad Minera Tacaza se tiene deficiencias en la voladura en cuanto a la inadecuada fragmentación de rocas ejecutadas. A tal razón, se tiene la necesidad de mejorar el resultado de la voladura (fragmentación), por ende, el presente trabajo de investigación buscará de otorgar una alternativa de solución.

Con las imágenes que se muestra en la Figura 01, considerando que son inconvenientes que deben ser solucionados de suma importancia.



Figura 1. Galería de imágenes de muestra de bolonería por voladura primaria

Fuente: el autor.

En la Figura 01 observamos una excavadora seleccionando los bancos mayores a un promedio de 16 pulg, ya que estos bancos no son enviados a stock de mineral de la chancadora por falta de espacios para su acumulación y por ello son fragmentados mediante una voladura secundaria. También se observa un equipo de perforación realizando taladros sobre bancos para una voladura secundaria.

También se muestra la ejecución de voladuras secundaria y al final se muestra un apilamiento de bancos seleccionados en planta concentradora para realizar trituración de

bolones con el empleo de un equipo de rompe bancos.

## II. Materiales y método

### 2.1. Ubicación y Accesibilidad

U.M. Tacaza se encuentra ubicado en el centro poblado de Choroma del Distrito de Santa Lucía, Provincia de Lampa y Departamento de Puno. Las coordenadas centrales son: 8 271 500 N – 314 750 E y altitud entre 4200 a 4450 msnm, según Datum WGS84, zona 19 S. Su accesibilidad se muestra en la Tabla 01

Tabla 1. Accesibilidad a U.M. Tacaza

Ruta	Distancia (km)	Tiempo (hrs)	Estado de vía
Lima a Juliaca	1200.00	2.0	Área
Juliaca a Santa Lucía	58.00	1.0	Carretera Asfaltada
Santa Lucía a Desvío Tacaza	16.00	0.5	Carretera Asfaltada
Desvío Tacaza - Mina Tacaza	2.00	0.2	Carreta afirmada

Fuente: Elaborado por el autor.

## 2.2. Geología local

La geometría de la mineralización es del tipo manto con buzamiento sub horizontal, con una potencia promedio de 24 metros y está emplazada en una interdigitación de toba-

brecha monolítico y lavas andesíticas, de forma brechosa-masiva,

## 2.3. Estimación de recursos.

Según estimación de reservas medidas más indicadas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. *Estimación de Recursos U.M. Tacaza*

Detalle	Tms	% Cu
Recurso total sulfuro al 31 de diciembre del 2017	1,999,599.00	1.05
Total recursos sulfuro al 31 de diciembre del 2018	1,528,194.84	0.89
Total recursos sulfuro al 30 de junio del 2019	1,384,742.93	0.87

Fuente; *Elaborado por el autor*

## 2.4. Costos unitarios

En la Tabla 3 se muestra el costo unitario de los equipos de producción de mineral y los

costos de explosivos y accesorios de voladura considerados en el desarrollo del artículo de investigación.

Tabla 3. *Costos unitarios.*

Costo unitarios de equipos y explosivos	Unidad de medida	Cantidad
Tipo de cambio a US\$		3.35
Equipo de carguio (excavadora)	US\$/hr	113.44
Equipo de transporte (volquete)	US\$/hr	37.91
Rompebanco	US\$/hr	66.27
Perforadoras	US\$/m	4.61
Anfo superfam Dos	US\$/kg	13.40
Booster HDPI	US\$/und	3.20
Fanel dual 8m 800/17ms	US\$/und	1.93
Cordon detonante 3P	US\$/m	0.15

Fuente: *(Serrato Reyna & Huanca Paricahua, 2017)*

## 2.5. Determinación del burden

De acuerdo modelo de Kuz Ram es posible definir el burden de la malla de perforación,

teniendo en cuenta que se quiere tener una fragmentación media determinada y se desarrolla mediante la siguiente ecuación.

$$B = \frac{1}{SBR * H}^{0.5} \frac{X50}{A}^{0.625} \frac{PRP}{115} * 0.5067 * de * \emptyset^2 * H - T^{0.396}$$

Tabla 4. *Determinación de burden mediante de modelo de Kuz Ram.*

Donde:		Parámetros	
B = burden en m		Descripción de la masa rocosa(RMD)	
SBR = relación espacio/burden deseado		Pulvulento/Quebradizo	10
H = altura de banco X50 = tamaño medio (cm)		Diaclaso verticalmente	JPS+JPA
PRP=potencia relativa del explosivo		Totalmente masivo	50
de =densidad de la roca (gr/cc)		Espaciamiento de las fracturas(JPS)	
Ø= diámetro del taladro en pulgadas		0.1m	10
T = taco		0.1 a sobre tamaño	20
		Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
		Ángulo del plano de fracturas(JPA)	
		Buza fuera de la cara	20
		Rumbo perpendicular a la cara	30
		Buza hacia la cara	50
		Influencia de la Densidad(RDI)	
		SGI=25*SG-50	-12.5
		Factor de Dureza(HF)	
		E/3 para E<50 Gpa	
		UCS/5 ppara E>50 Gpa	1.67
		Factor de Seguridad (Z)	
		Donde no hay prob. de flyrock	1
		Cercano a edif. o estructuras	1.2
		Cercano a edif. Públicos	1.5
Altura de banco(m):	5		
X50 (cm):	12		
SBR:	1.1547		
Potencia en peso (%):	100		
Densidad exp. (gr/cc):	0.8		
Diametro hoyo (pulg):	3.5		
Factor de seguridad:	1		
UCS (Mpa):	50		
Módulo de Young (Gpa)	5		
Descripción de la masa rocosa (RM)	Totalmente masivo	50	
Espaciamiento de las fracturas (JP)	0.1 a sobre tamaño	20	
Ángulo del plano de fracturas (JP)	Buza fuera de la cara	30	
Burden (m)		<b>2.1</b>	

Fuente: *el autor.*

En la Tabla 4, de acuerdo de modelo de Kuz Ram según la fragmentación requerida del X50 (50% de fragmentos) a 12 cm (4.7pulg). Considerándose que la altura de banco es 5 metros, la relación del espaciamento/burden para una malla triangular, según los datos del explosivo de anfo superfam dos, el factor de seguridad se considera 1 porque no hay la necesidad de controlar el fly rock, mediante ello se obtiene el burden teórico de 2.10 m.

Los materiales a usarse son el software Wip Frag que se realiza mediante la toma de imágenes de cada voladura ejecutada según determinados parámetros de perforación, y los diseños de voladura se realiza con el uso de software JK Simblast – 2D Bench.

### III. Resultados

A partir de esta sección se realiza las pruebas.

### 3.1. Parámetros predeterminados

En esta sección se realiza un analices de voladura con parámetros iniciales, que anteriormente se venía trabajando en la Unidad Minera Tacaza, los rendimientos de los equipos también son evaluados y se muestran a continuación para ello llamaremos proyecto de voladura P-000.

Tabla 5. *Parámetros de perforación de voladura P-000*

Parámetro	Valor
Tipo de malla	cuadrado
Altura de banco (m)	5.00
Altura de taladro (m)	5.30
Burden (m)	2.30
Espaciamento (m)	2.30
Diametro de taladro (pulg)	3.50

Fuente: *el autor.*

Según Tabla 5, con diseño geométrico de malla cuadrado, con burden y espaciamento de 2.3 m x 2.3m.

Tabla 6. *Parámetros de voladura de voladura P-000*

Parámetro	Valor
Carga de fondo (m)	4.10
Altura de taco (m)	1.20
Densidad del explosivo (g/cm <sup>3</sup> )	0.80
Densidad de roca (kg/m <sup>3</sup> )	2.43
Factor de potencia (kg/ton)	0.32
Factor de carga (kg/m <sup>3</sup> )	0.77

Fuente: *el autor*.

La Tabla 6, muestra que la voladura se realiza con una altura de carga de 4.10 m de explosivo y en ello resulta el factor de potencia a 0.32 kg/ton y 0.77 kg/m<sup>3</sup> como factor de carga y sí, es bastante reducido.

Tabla 7. *Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-000*

Descripción	Valor
P80 real (pulg)	10.17
Fragmento < a 10" (%)	79%
Ira recuperación - Tonelaje	12,119.60
Fragmentos de 10" a 16" (%)	10.9%
Rompe banco - Tonelaje	1,687.89
Fragmentos > a 16" (%)	10%
Voladura secundaria - Tonelaje	1,618.15

Fuente: *el autor*.

De acuerdo al análisis de fragmentación de la Tabla 7, se tiene un P80 de 10.17 pulg que significa que el 79% del total de fragmentos de rocas de mineral pasantes a 10 pulg y esto representa un 21% de fragmentos que no pasan por la parrilla de la chancadora primaria.

Tabla 8. *Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-000*

Descripción	Valor
Ac. de carga y otras maniobras (min/v)	3.00
Tiempo de carguío (min/volq)	4.00
Tiempo total de carguío (min/volq)	7.00
Capacidad de Volquete (m <sup>3</sup> )	20.00
Factor de llenado (%)	95.00
Rendimiento horario (ton/hr)	277.02

Fuente: *el autor*.

En mención a la Tabla 8, se tiene un rendimiento de equipos de carguío en 277.02 ton/hr, ya que el tiempo de acumulación y

selección de material es muy alto 7 min de carguío de mineral a un volquete de 20 m<sup>3</sup>, el factor de llenado es solo 95%,

Tabla 9. *Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-000*

Descripción	Valor
Distancia de ciclo (km)	3.00
Tiempo de carguío (min)	4.00
Tiempo de espera (min)	3.00
Tiempo en trayecto (min)	22.00
Tiempo de ciclo total (hr)	0.48
Rendimiento horario (ton/hr)	66.87

Fuente: *el autor*.

Según Tabla 9, el tiempo de espera (cola) del volquete es 3 min y es muy alto y por ello el rendimiento horario es 66.87 ton/hr.

Tabla 10. *Costo de producción de mineral de voladura P-000*

Costos	Valor
Perforación (US\$/ton)	0.38
Voladura (US\$/ton)	0.25
Carguío (US\$/ton)	0.41
Transporte (US\$/ton)	0.57
Costo neto (US\$/ton)	1.61
Rompebanco (US\$/ton)	0.15
Voladura secundaria (US\$/ton)	0.11
Costo total (US\$/ton)	<b>1.86</b>

Fuente: *el autor*.

En resumen, de acuerdo a la Tabla 10, indica que según la fragmentación obtenida de 79% de fragmentos menores a 10 pulg con los parámetros de 2.3 m x 2.3 m se tiene un costo total de producción de mineral de 1.86 UU\$/ton

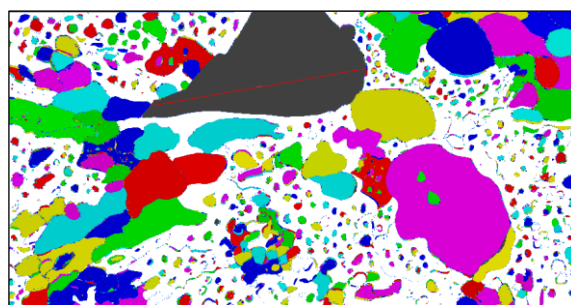


Figura 2. *Dimensionamiento de partículas de voladura P-000.*

Fuente: *el autor*



En la Figura 2, se realizó con el apoyo de software Wip Frag, donde las áreas de color blanco son partículas finas y el área de color negro es la escala referencial.

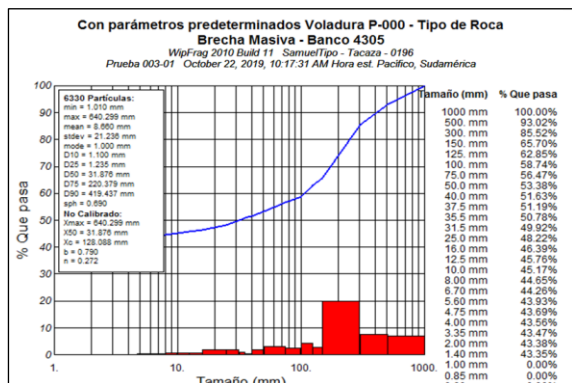


Figura 3. Curva granulométrica de voladura P-000  
Fuente: el autor



Figura 4. Fotografía de voladura P-000  
Fuente: el autor

En la Figura 4, muestra los bancos generados a causa de una mala fragmentación de rocas, y en este tipo de resultados el proceso más perjudicial es en carguío y transporte, ya que sus rendimientos horarios son muy bajos. Aunque el tiempo y costo de perforación de voladura son mínimos.

### 3.2. Primera modificación

Modificación de parámetros de perforación y denominaremos proyecto de voladura P-001.

Tabla 11. Parámetros de perforación de voladura P-001

Parámetro	Valor
Tipo de malla	triangular
Altura de banco (m)	5.00
Altura de taladro (m)	5.30
Burden (m)	1.80
Espaciamiento (m)	2.10
Diametro de taladro (pulg)	3.50

Fuente: el autor

De acuerdo a la Tabla 11, se tiene parámetros de perforación modificados, con un diseño geométrico de malla triangular, con burden y espaciamiento de 1.80 m x 2.10 m

Tabla 12. Parámetros de voladura de voladura P-001

Parámetro	Valor
Carga de fondo (m)	4.30
Altura de taco (m)	1.00
Densidad del explosivo (g/cm3)	0.80
Densidad de roca (kg/m3)	2.43
Factor de potencia (kg/ton)	0.47
Factor de carga (kg/m3)	1.13

Fuente: el autor

De acuerdo a la Tabla 12, se realiza la voladura con una altura de carga de 4.30 m con explosivo y en ello resulta el factor de potencia a 0.47 kg/ton y 1.13 kg/m3 como factor de carga y son muy elevados.

Tabla 13. Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-001

Descripción	Valor
P80 real (pulg)	4.02
Fragmento < a 10" (%)	97%
1ra recuperación - Tonelaje	14,307.24
Fragmentos de 10" a 16" (%)	2.6%
Rompe banco - Tonelaje	389.40
Fragmentos > a 16" (%)	0%
Voladura secundaria - Tonelaje	-

Fuente: el autor

Según la Tabla 13, el análisis de fragmentación con el apoyo de software Wip Frag se tiene un P80 de 4.02 pulg que significa que el 97 % del total de fragmentos de rocas de mineral es menor a 10 pulg y esto representa

un 3% de fragmentos que no pasan por la parrilla de la chancadora primaria.

Tabla 14. Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-001

Descripción	Valor
Acumulacion de carga y otras maniobra	1.50
Tiempo de carguío a un volquete (min/v)	2.25
Tiempo total de carguío (min/volq)	3.75
Capacidad de Volquete (m3)	20.00
Factor de llenado (%)	100.00
% de Esponjamiento de Material (%)	30.00
Rendimiento horario (ton/hr)	544.32

Fuente: el autor.

Con esta fragmentación obtenida en la Tabla 14, se tiene un rendimiento de equipos de carguío en 544.32 ton/hr y el tiempo muerto de equipo es bastante reducido 3.75 min.

Tabla 15. Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-001

Descripción	Valor
Distancia de ciclo (km)	3.00
Tiempo de carguío (min)	2.25
Tiempo de espera (min)	1.00
Tiempo en trayecto (min)	22.00
Tiempo de ciclo total (hr)	0.42
Rendimiento horario (ton/hr)	80.84

Fuente: el autor

Según Tabla 15, el tiempo de espera (cola) del volquete es 1 min y es un tiempo muy favorable, por ello el rendimiento horario es 80.84 ton/hr.

Tabla 16. Costo de producción de mineral de voladura P-001

Costos	Valor
Perforación (US\$/ton)	0.53
Voladura (US\$/ton)	0.36
Carguío (US\$/ton)	0.21
Transporte (US\$/ton)	0.47
Costo neto (US\$/ton)	1.57
Rompebancos (US\$/ton)	0.04
Voladura secundaria (US\$/ton)	-
Costo total (US\$/ton)	<b>1.61</b>

Fuente: el autor

El costo operativo en perforación es de 0.53 UUS\$/ton que representa el 33% del costo total.

En el proceso de voladura resulta un costo de 0.36 UUS\$/ton que representa el 22%. Los costos del proceso de carguío con los rendimientos horarios indicados son 0.17 UUS\$/ton y 0.50 UUS\$/ton que representa el 13% y 29% respectivamente. Con estos parámetros modificado se adiciona el costo de rotura de bancos de 0.04 UUS\$/ton que representa el 2% y no hay necesidad de realizar voladura secundaria. Según la fragmentación obtenida se tiene un costo total de producción de mineral de 1.61 UUS\$/ton.



Figura 5. Dimensionamiento de partículas de proyecto P-001.

Fuente: el autor

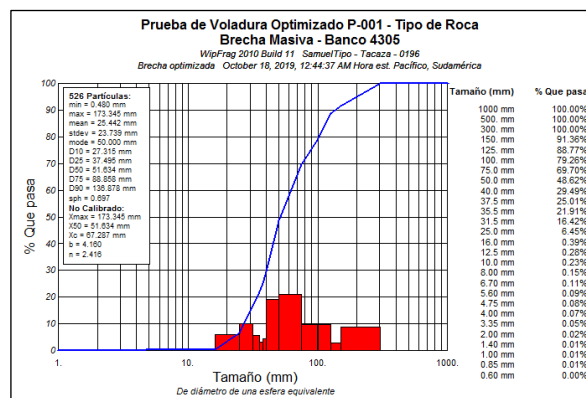


Figura 6. Curva granulométrica de proyecto P-001

Fuente: el autor



Figura 7. Fotografía de proyecto P-001.

Fuente: el autor



En la Figura 7, se visualiza que no hay presencia de bancos es debido a que se tiene una muy buena fragmentación de rocas, y en este tipo de resultados el proceso más beneficiado es en carguío y transporte, ya que sus rendimientos horarios son muy altos. Pero el costo de perforación de voladura es muy elevado.

### 3.3. Segunda modificación

Para la segunda modificación de parámetros de perforación solo se cambió las dimensiones de la malla de perforación y el diseño geométrico, para ello denominaremos proyecto de voladura P-002.

Tabla 17. *Parámetros de perforación de voladura P-002*

Parámetro	Valor
Tipo de malla	triangular
Altura de banco (m)	5.00
Altura de taladro (m)	5.30
Burden (m)	2.10
Espaciamiento (m)	2.40
Diametro de taladro (pulg)	3.50

Fuente: *el autor*.

Lo que indica la Tabla 17, los parámetros modificados en perforación es el diseño geométrico a malla triangular, con burden y espaciamiento de 2.10 m x 2.40 m

Tabla 18. *Parámetros de voladura de voladura P-002*

Parámetro	Valor
Carga de fondo (m)	4.30
Altura de taco (m)	1.00
Densidad del explosivo (g/cm <sup>3</sup> )	0.80
Densidad de roca (kg/m <sup>3</sup> )	2.43
Factor de potencia (kg/ton)	0.35
Factor de carga (kg/m <sup>3</sup> )	0.85

Fuente: *el autor*.

De acuerdo a la Tabla 18, se tiene un resultante de factor de potencia a 0.35kg/ton y factor de carga a 0.85kg/ton, valores aceptables.

Tabla 19. *Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-002*

Descripción	Valor
P80 real (pulg)	7.20
Fragmento < a 10" (%)	87%
Ira recuperación - Tonelaje	11,693.95
Fragmentos de 10" a 16" (%)	13.2%
Rompe banco - Tonelaje	1,777.97
Fragmentos > a 16" (%)	0%
Voladura secundaria - Tonelaje	-

Fuente: *el autor*.

Según Tabla 19, el análisis de fragmentación se tiene un P80 de 7.20 pulg con el 87 % del total de fragmentos de rocas de mineral son menores a 10pulg lo cual indica que el 13% de material volado tiene ser triturado por medio de equipo de rompe banco.

Tabla 20. *Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-002*

Descripción	Valor
Acumulacion de carga y otras maniobras	2.50
Tiempo de carguío a un volquete (min/vol)	2.75
Tiempo total de carguío (min/volq)	5.25
Capacidad de Volquete (m <sup>3</sup> )	20.00
Factor de llenado (%)	98.00
% de Esponjamiento de Material (%)	30.00
Rendimiento horario (ton/hr)	381.02

Fuente: *el autor*

Con esta fragmentación obtenida se tiene un rendimiento de equipos de carguío en 381.02 ton/hr, ya que el 13% de bancos existentes debe ser seleccionado por la excavadora generando un tiempo promedio de 2.50 min por cada volquete.

Tabla 21. *Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-002*

Descripción	Valor
Distancia de ciclo (km)	3.00
Tiempo de carguío (min)	2.75
Tiempo de espera (min)	2.00
Tiempo en trayecto (min)	22.00
Tiempo de ciclo total (hr)	0.45
Rendimiento horario (ton/hr)	74.78

Fuente: *el autor*

En caso del equipo de transporte de mineral de acuerdo a la Tabla 21, resulta un rendimiento de

74.78 ton/hr, siendo 2 min el tiempo de cola o espera generado por la excavadora.

Tabla 22. Costo de producción de mineral de voladura P-002

Costo	Valor
Perforación (US\$/ton)	0.40
Voladura (US\$/ton)	0.27
Carguío (US\$/ton)	0.30
Transporte (US\$/ton)	0.51
Costo neto (US\$/ton)	1.47
Rompebancos (US\$/ton)	0.17
Voladura secundaria (US\$/ton)	-
Costo total (US\$/ton)	<b>1.65</b>

Fuente: el autor

Según la Tabla 22, El costo en perforación es de 0.40 UU\$/ton que representa el 24% del costo total. En el proceso de voladura resulta un costo de 0.27 UU\$/ton que representa el 16%. Los costos del proceso de carguío con los rendimientos horarios indicados son 0.30 UU\$/ton y 0.51 UU\$/ton que representa el 18% y 31% respectivamente. Con estos parámetros modificado se adiciona el costo de rotura de bancos de 0.17 UU\$/ton que representa el 11%. Con un costo total de producción de mineral de 1.65 UU\$/ton.

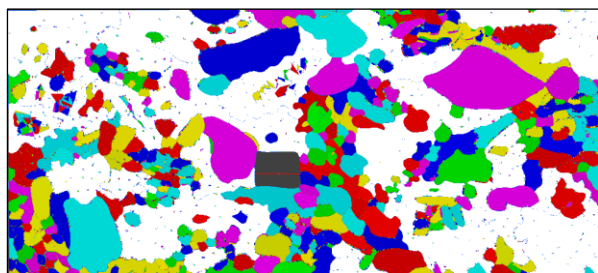


Figura 8. Dimensionamiento de partículas de voladura P-002.

Fuente: el autor

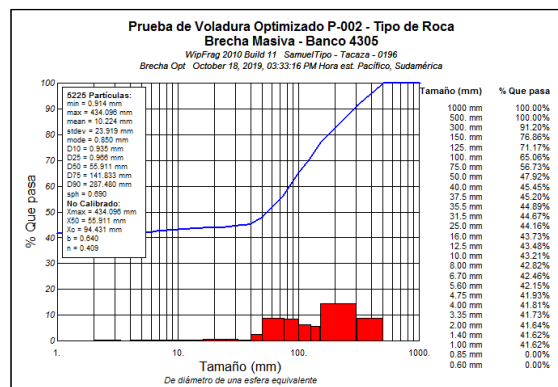


Figura 9. Curva granulométrica de voladura P-002

Fuente: el autor



Figura 10. Fotografía de voladura P-002

Fuente: el autor

Según la fig. 10, Se logró una fragmentación aceptable, aunque su porcentaje de pasantes de malla de 10 pulg es 87%, aun así, esta modificación es aceptable porque el rendimiento horario de los equipos es mayor que en comparativo a la fragmentación de rocas con parámetros predeterminados

### 3.4. Tercera modificación

La tercera modificación de parámetros de perforación se denomina proyecto de voladura P-003

Tabla 23. Parámetros de perforación de voladura P-003

Parámetro	Valor
Tipo de malla	triangular
Altura de banco (m)	5.00
Altura de taladro (m)	5.30
Burden (m)	1.90
Espaciamiento (m)	2.20
Diametro de taladro (pulg)	3.50

Fuente: el autor.

Según Tabla 23, con parámetros modificados de perforación, continuando con un diseño geométrico de malla triangular, con burden y espaciamiento de 1.90 m x 2.20 m.

Tabla 24. *Parámetros de voladura de voladura P-003*

Parámetro	Valor
Carga de fondo (m)	4.30
Altura de taco (m)	1.00
Densidad del explosivo (g/cm <sup>3</sup> )	0.80
Densidad de roca (kg/m <sup>3</sup> )	2.43
Factor de potencia (kg/ton)	0.42
Factor de carga (kg/m <sup>3</sup> )	1.02

Fuente: *el autor*.

Según la Tabla 24, el factor de potencia y de carga resultante es de 0.42 kg/ton y 1.02 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, valores aceptables.

Tabla 25. *Resultados de fragmentación de rocas de voladura P-003*

Descripción	Valor
P80 real (pulg)	4.87
Fragmento < a 10" (%)	94%
Ira recuperación - Tonelaje	13,083.47
Fragmentos de 10" a 16" (%)	6.3%
Rompe banco - Tonelaje	882.96
Fragmentos > a 16" (%)	0%
Voladura secundaria - Tonelaje	-

Fuente: *el autor*.

De la tabla anterior el P80 resultante es 4.87 pulg con el 94 % del total de fragmentos de rocas de mineral son menores a 10 pulg, pasante a la parrilla de la chancadora primaria lo cual indica que el 06% de material volado tiene ser triturado con uso de equipo de rompebanco.

Tabla 26. *Rendimiento de equipo de carguío (excavadora) de voladura P-003*

Descripción	Valor
Acumulación de carga y otras manio	1.50
Tiempo de carguío a un volquete (mi)	2.25
Tiempo total de carguío (min/volq)	3.75
Capacidad de Volquete (m <sup>3</sup> )	20.00
Factor de llenado (%)	99.00
% de Esponjamiento de Material (%)	30.00
Rendimiento horario (ton/hr)	538.88

Fuente: *el autor*

El rendimiento horario de la excavadora es de 538.88 70n/hr, tiempo muy favorable, y el factor de llenado de la carga es aceptable

Tabla 27. *Rendimiento de equipo de transporte (volquete) de voladura P-003*

Descripción	Valor
Distancia de ciclo (km)	3.00
Tiempo de carguío (min)	2.25
Tiempo de espera (min)	1.00
Tiempo en trayecto (min)	22.00
Tiempo de ciclo total (hr)	0.42
Rendimiento horario (ton/hr)	80.03

Fuente: *el autor*

Según la Tabla 27, de manera consecuente el rendimiento de equipo de transporte 80.03 ton/hr.

Tabla 28. *Costo de producción de mineral de voladura P-003*

Costo	Valor
Perforación (US\$/ton)	0.48
Voladura (US\$/ton)	0.33
Carguío (US\$/ton)	0.21
Transporte (US\$/ton)	0.47
Costo neto (US\$/ton)	1.49
Rompebanco (US\$/ton)	0.08
Voladura secundaria (US\$/ton)	-
Costo total (US\$/ton)	<b>1.58</b>

Fuente: *el autor*

Según tabla anterior, el costo en perforación es de 0.48 UU\$/ton que representa el 31% del costo total. En el proceso de voladura resulta un costo de 0.33 UU\$/ton que representa el 21%. Los costos del proceso de carguío con los rendimientos horarios indicados son 0.21 UU\$/ton y 0.47 UU\$/ton que representa el 13% y 30% respectivamente. Con estos parámetros modificado se adiciona el costo de rotura de bancos de 0.09 UU\$/ton que representa el 05% y no hay necesidad de realizar voladura secundaria. Según la fragmentación obtenida de 94% de fragmentos menores a 10 pulg con los parámetros de 1.90

m x 2.20 m se tiene un costo total de producción de mineral de 1.58 UUS\$/ton



Figura 11. Dimensionamiento de partículas de voladura P-003.

Fuente: el autor

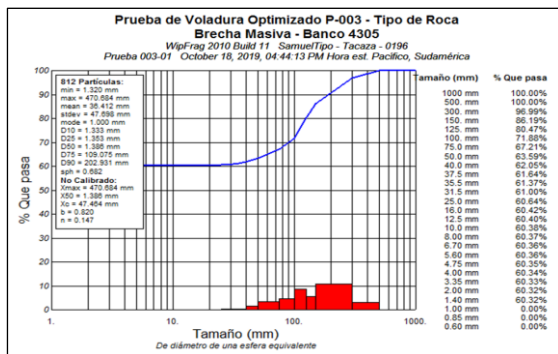


Figura 12. Curva granulométrica de voladura P-003

Fuente: el autor



Figura 13. Fotografía de voladura P-003

Fuente: el autor

Según la Figura 13, nos muestra una fotografía de una muy buena fragmentación de rocas, y en ello los tiempos operativos también son optimizados

#### IV. Discusión

De la Tabla 29, se deduce que la fragmentación de rocas según su modificación de los parámetros de perforación tanto como en diseño geométrico y dimensiones de malla, implica en gran manera en costo de producción de mineral, por ello se cometía un

grave error al minimizar el costo de perforación y voladura, ya que se incrementa el costo en proceso de carguío y transporte.

De las 03 voladuras ejecutadas con parámetros modificados, con el criterio más importante como resultado final que es tener un menor costo de producción de mineral y de ello expresa el proyecto P-003, con una modificación a malla triangular de burden y espaciamiento 1.90 m x 2.20 m, con un P80 de 4.87 pulg optimizando en 52%, donde se tiene una primera recuperación de 94% de material, y 6% de material dispuesto para rotura de bancos y 0.0% de mineral para voladura secundaria. El costo de perforación y voladura son incrementados en 27 y 31% respectivamente en comparación a voladura con parámetro predeterminado; pero, se reduce sustancialmente el costo de proceso de carguío y transporte de mineral a 49% y 16%, esto es razón que el rendimiento horario de los equipos de carguío y transporte se incrementa de 277.02 ton/hr a 538.88 ton/hr y 66.87 ton/hr a 80.03 ton/hr respectivamente, también el costo por tonelada volada en rotura de bancos es de 0.15 US\$ a 0.08 US\$ que representa 42% menos y reduciendo al 100% el costo de voladura secundaria.

Los proyectos de voladura P-001 y P-002 con mallas triangulares de 1.90 x 2.10 m y 2.10 x 2.40 m, también tienen un menor costo de producción de mineral, pero es mayor al proyecto de P-003, por ello se descarta las dos modificaciones

Tabla 29. Resumen de resultados

Descripción	Vol P-000	Vol P-001	Vol P-002	Vol P-003	Variación (%)
	Predeterminad	Modificado	Modificado	Optimizado	
Tipo de malla	Cuadrado	Triangular	Triangular	Triangular	
Burden (m)	2.30	1.80	2.10	1.90	-17%
Espaciamiento (m)	2.30	2.10	2.40	2.20	-4%
Carga de fondo (m)	4.10	4.30	4.30	4.30	5%
Altura de taco (m)	1.20	1.00	1.00	1.00	-17%
F.P. (kg/ton)	0.32	0.47	0.35	0.42	33%
F.C. (kg/m3)	0.77	1.13	0.85	1.02	33%
P80 (pulg)	10.17	4.02	7.20	4.87	-52%
% pasante 10"	79%	97%	87%	94%	19%
toneladas para chancadora primaria	12119.60	14307.24	11693.95	13083.47	8%
% retenido 10 - 14 "	11%	3%	13%	6%	-42%
toneladas para rompe banco	1687.89	389.40	1777.97	882.96	-48%
% > a 14"	10%	0%	0%	0%	-100%
toneladas para voladura secundaria	1618.15	0.00	0.00	0.00	-100%
Costo de perforacion (US\$/ton)	0.38	0.53	0.40	0.48	27%
Costo de voladura (US\$/ton)	0.25	0.36	0.27	0.33	31%
Costo de carguio (US\$/ton)	0.41	0.21	0.30	0.21	-49%
Costo de transporte (US\$/ton)	0.57	0.47	0.51	0.47	-16%
Costo rompe banco (US\$/ton)	0.15	0.04	0.17	0.08	-42%
Costo voladura secundaria (US\$/ton)	0.11	0.00	0.00	0.00	-100%
Costo de produccion de mineral	<b>1.86</b>	<b>1.61</b>	<b>1.65</b>	<b>1.58</b>	-15%

Fuente: el autor

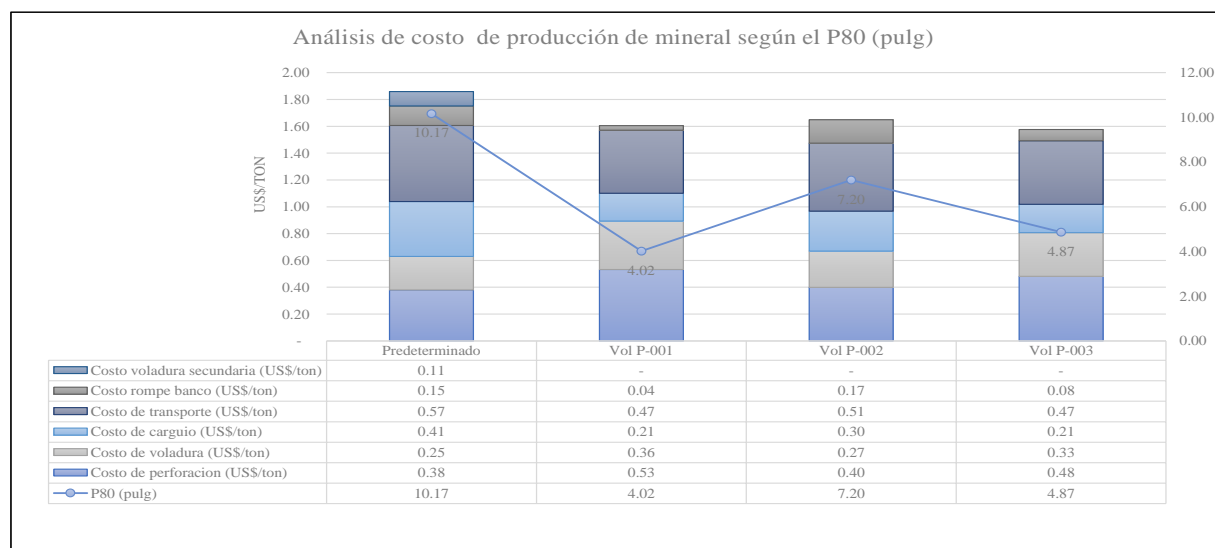


Figura 14. Diagrama de costos unitarios según P80

Fuente: el autor

De acuerdo a la Figura 14, se observa que, cuando mayor sea el P80, mayor será el costo total de producción de mineral; a la vez, cuando más mínimo sea el P80 también se tiene un incremento muy alto en el costo de perforación y voladura y es por ello, que es muy necesario determinar la óptima fragmentación de rocas para que el costo de producción total sea minimizado.

Para Linares rojas (2018) “El objetivo del nuevo enfoque predictivo de la fragmentación se sustenta en que dicha investigación nos proporcionaría una optimización en las operaciones minero-metalúrgicas, porque entregando una óptima fragmentación requerida para los procesos de Molienda, se podría minimizar sus tiempos y maximizar su productividad”(p.17). Entonces de acuerdo al



resultado se acepta que tener una óptima fragmentación de rocas para la Unidad Minera Tacaza, maximiza su productividad de mineral, minimizando los tiempos de producción.

Según Mamani Chalco (2019) menciona que “*el diseño de malla por alteración es una técnica que aporta la mejora de la fragmentación obteniendo grandes beneficios en rendimiento de equipos, transporte, % de recuperación en planta y bajos costos operativos*” (p.1). Este resultado del autor mencionado es válido porque, en nuestra investigación se incrementó el rendimiento de equipos de carguío y transporte en 277.02 ton/hr a 538.88 ton/hr y 66.87 ton/hr a 80.03 ton/hr respectivamente.

De acuerdo a Gómez Canchiahumán (2012) menciona que “*a través optimización de los estándares de las operaciones unitarias de Perforación y voladura, se logró la reducción del costo unitario total de Mina en 1.51 US\$/t es decir una reducción del 7%*” (p.4). A la mención con el autor mencionado, en nuestra investigación, se logra reducir el costo de producción de mineral en 15% de 1.86 US\$/ton a 1.58 UU\$/ton.

## V. Conclusiones

Se ha optimizado la fragmentación de rocas de un P80 de 10.17 pulg a 4.87 pulg con un pasante a parilla de 10 pulg de la chancadora primaria de 74% a 94%.

Se ha modificado el parámetro de perforación de una malla cuadrado a triangular con dimensiones de burden y espaciamento de 2.3 m x 2.3 m a 1.90 m x 2.10 m.

Se minimizo el costo de producción de mineral de 1.86 US\$/ton a 1.58 UU\$/ton.

## Referencias

- Hustrulid, W. A. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining* (Theoretica, Vol. 2). Retrieved from <https://www.crcpress.com/Blasting-Principles-for-Open-Pit-Mining-Set-of-2-Volumes/Hustrulid/p/book/9789054104582>
- Linares rojas, E. L. (2018). *Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la voladura de rocas. Industrial Data*, 21(1), 17. <https://doi.org/10.15381/idata.v21i1.14907>
- Mamani Chalco, P. (2019). *Optimización de la fragmentación y diseño de malla por alteración en perforación y voladura de U.E.A. Valeria - Anabi SAC* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11737>
- Serrato Reyna, R., & Huanca Paricahua, J. E. (2017). *Precios unitarios operaciones mina* (Consorcio; CIEMSA, Ed.). Lima: UM Tacaza.

- Adebola, J. M., Ajayi, O. D., & O, P. E. (2016). Rock fragmentation prediction using Kuz-Ram model. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(5), 110–115. Retrieved from <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JEES/article/download/30610/31442+&cd=1&M=en&ct=clnk&gl=za>
- Arabi Shad, H. I., Sereshki, F., Ataei, M., & Karamoozian, M. (2018). *Investigation of rock blast fragmentation based on specific explosive energy and in-situ block size. International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 52(1), 1–6. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2018.65613>
- Exsa. (2010). *Manual practico de voladura (Especial)*. Retrieved from <https://civilgeeks.com/2013/10/31/manual-practico-de-voladuras-exsa/>
- Huanca Paricahua, J. E. (2018). *Predicción de la fragmentación en la voladura de bancos de producción de la U.M. Tacaza (Universidad Nacional del Altiplano)*. Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9065>
- Cunningham, C.V.B. (2005). *The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on, Proceedings of the Bright. Brighton Conference*, 201-210. Retrieved from <https://miningandblasting.files.wordpress.com/2009/09/the-kuz-ram-fragmentation-model-e28093-20-years-on.pdf>.
- Cunningham, C.V.B. (1983). *The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting*. Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 439–453. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-016-1131-9>.
- Sanchidrián J A. (2013). *¿Qué función representa mejor la distribución granulométrica de la roca fragmentada? Sipervor XII, Lima, Perú, 21-23 noviembre de 2013*. Universidad Nacional de Ingeniería. Retrieved from [http://oa.upm.es/29732/1/INVE\\_MEM\\_2013\\_169284.pdf](http://oa.upm.es/29732/1/INVE_MEM_2013_169284.pdf).
- Gómez Canchiahumán. R. J. (2012). *Optimización de la perforación y voladura para la minimización de los costos operativos en la Unidad El Porvenir de la Compañía Minera Milpo S.A. (Universidad Nacional del Centro del Perú)*. Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3170>.