

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“APLICACIÓN DEL MODELO KUZ RAM PARA
PREDECIR LA FRAGMENTACIÓN EN BASE A
LA VELOCIDAD DE PERFORACIÓN EN UNA
MINA A CIELO ABIERTO, LA LIBERTAD 2022”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Jose Carlos Quispialaya Perez

Jose Fernando Mesias Boñon

Asesor:

Ing. Óscar Arturo Vásquez Mendoza

<https://orcid.org/0000-0003-4920-2204>

Cajamarca - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Daniel Alejandro Alva Huamán	43006890
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Rafael Napoleón Ocas Boñón	42811302
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

Dedicado a mi Padre Celestial por permitirme gozar de la bendición de ser profesional. A mis Padres Fernando e Ysabelita, porque siempre creyeron en mi esencia.

A mi esposa Luced, porque siempre estuvo en lo bueno y malo para mí. A mis hijas Fernanda y Silvana, porque son mi motor y motivo para seguir avanzando.

Jose Carlos Quispialaya

A mis padres, Marlene y Guillermo, por apoyarme y siempre confiar en mí. A mi hermanita Leslie, por siempre estar a mi lado.

A mis abuelitos, quienes donde quiera que estén, los siento más cerca que nunca.

José Fernando Mesías

AGRADECIMIENTO

Al Dios por la oportunidad de ser profesional. A mi familia por siempre impulsarme a continuar y no darme por vencido.

A mis docentes por los conocimientos otorgados durante mi tiempo como estudiante. Y a la vida por seguirme brindando oportunidades para alcanzar mis objetivos.

Jose Carlos Quispialaya

A mis padres, por el apoyo, paciencia y la confianza brindada. A mis profesores, por brindarme los conocimientos necesarios para culminar con éxito esta etapa de mi vida.

José Fernando Mesías

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
RESUMEN.....	8
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Realidad problemática.....	9
1.2. Formulación del problema.....	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos.....	16
1.4. Hipótesis.....	16
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	17
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	25
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	35
CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS.....	38
ANEXOS.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Técnicas de recolección de información	19
Tabla 2: Tipos de roca	21
Tabla 3: Velocidad de perforación / Tipo de roca	23
Tabla 4: Parámetros y Factores de Roca	25
Tabla 5: Tamaño medio de fragmentación	25
Tabla 6: Coeficiente de uniformidad	26
Tabla 7: Distribución de pasantes.....	26
Tabla 8: Factores KUZ RAM	27
Tabla 9: Resultados de la predicción de fragmentación KUZ RAM.....	28
Tabla 10: Parámetros de diseño - Roca Dura / Muy Dura	29
Tabla 11: Parámetros de diseño - Roca Débil / Mediana	30
Tabla 12: Parámetros de retención de taco.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sectores de minado	18
Figura 2: Reportes de planta.....	19
Figura 3: Formato de recolección de datos	20
Figura 4: Parámetros KUZ - RAM / Factor de Roca	22
Figura 5: Curva granulométrica de acuerdo a las velocidades	27
Figura 6: Diseño 01 - Roca Dura / Muy Dura.....	30
Figura 7: Diseño 02 - Roca Débil / Mediana	31

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se tuvo por finalidad aplicar el modelo Kuz Ram para predecir la fragmentación en base a la velocidad de perforación en una mina a cielo abierto ubicada en la Libertad, esto nos permitirá tomar decisiones anticipadas para seleccionar el mejor diseño que pueda satisfacer los requerimientos necesarios para poder cumplir con las metas asignadas. En la metodología se empleó las ecuaciones del modelo Kuz Ram para predecir la fragmentación en base a la velocidad de perforación, la cual se extrajo de los reportes de Dispatch.

Concluyendo que, la predicción del p80 según la velocidad de perforación con el modelo de KUZ RAM dando como resultado un p80 para roca su débil de 4 pulg, roca media de 4.2 pulg dura de 6.8 pulg y muy dura de 7.4 pulg. Además la cantidad de mezcla explosiva de los taladros depende de la velocidad de perforación tomando como base dos tipos de diseño de carga para roca débil y mediana de 153.45 kg/tal dura y muy dura de 183.10 kg/tal.

PALABRAS CLAVES: KUZ RAM, predecir, fragmentación, perforación, parámetros, diseños, mallas.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La ingeniería de la fragmentación va a ser una importante parte en la minería en el futuro. Pues las máquinas de carguío son más automatizadas y las fajas transportadoras son una regla, en vez de una excepción, entonces será requerida una especificación del tamaño para el material fragmentado (Huanca, 2018). Actualmente en la empresa minera en estudio se requiere mejorar las operaciones de perforación y voladura, para lo cual es necesario tomar decisiones anticipadas para seleccionar el mejor diseño que pueda satisfacer los requerimientos necesarios que permitan cumplir con las metas asignadas. El modelo de predicción empleado es Kuz Ram el cual utilizó los datos de la velocidad de perforación y tipo de litología presente en la Plataforma a volar.

La presente investigación tomo en cuenta algunos antecedentes que brindarán sustento a los resultados encontrados, a nivel internacional, Ordoñez, Ramírez & Proaño (2012), en su trabajo de investigación "Planificación y predicción de la fragmentación en las voladuras a cielo abierto", tuvo como objetivo principal establecer un procedimiento para el diseño de mallas de voladura y predicción de la fragmentación. Para la realización de la siguiente tesis fue necesario seguir la siguiente metodología: se consideró un marco de referencia confiable y seguir los procedimientos para aplicación de las ecuaciones, se investigó información geológica y físico mecánica del macizo, se estableció el índice de Volabilidad (factor de roca) por medio de los métodos propuestos por Cunningham, posteriormente se desarrolló una malla de voladura previa según KONYA, para posterior análisis de predicción. Concluyendo que se calculó la malla de perforación según la formulación de Konya y ajustada a los resultados por voladuras anteriores. Además, se

podieron realizar las correcciones en la malla de perforación para poder obtener el 50 por ciento del material retenido en una malla de 30 cm, variando el Burden de 4 m a 3,16 m y el espaciamiento de 4,5 a 4,1 m.

De igual forma, Rojas (2021), en su tesis "Estimación de la fragmentación producto de la tronadura de rocas en minería a cielo abierto utilizando modelos predictivos y algoritmos de regresión", tuvo por finalidad proponer como mejorar la estimación de fragmentación producto de la tronadura en minería a cielo abierto, para lo cual se desarrolló una investigación aplicada con la finalidad de entender cómo es que se produce la estimación de fragmentación desde un punto de vista teórico, y también, exponer cómo es que ésta se integra dentro de un proceso industrial. Para esto se realizó una exhaustiva investigación de los modelos empíricos utilizados y se indagó en el contexto industrial en el que estos son aplicados. La estimación de fragmentación utilizando los modelos Kuz-Ram y Kuznetsov-Cunningham-Ouchternoly (KCO), donde se obtuvo un R^2 nulo para ambos modelos y altos valores del error cuadrático medio. Posteriormente se entrenaron varios modelos utilizando la aplicación Regression Learner de MATLAB combinando diferentes predictores, donde se obtuvieron una serie de modelos predictivos entre los cuales, el mejor resultado de estimación fue uno basado en árboles de decisión, el que tuvo una bondad de ajuste del 0.73 y un RMSE de 16.21 utilizando una base de datos sin normalizar. Adicionalmente se estudió el impacto que tiene en la estimación la normalización de la base de datos, debido a la variedad en los órdenes de magnitud de las variables involucradas. Así mismo se pudo concluir que existe un gran potencial en la incorporación de algoritmos de regresión para la estimación de la fragmentación, ya que estos presentan una serie de ventajas relacionadas a

la cantidad mínima de información requerida para su aplicación y a un mejor desempeño en comparación con los modelos semi-empíricos.

A nivel nacional Arispe y Sosa (2022), en su trabajo de investigación "Propuesta de ajuste al modelo predictivo Kuz-Ram empleando análisis granulométrico de imágenes para mejorar la estimación de la fragmentación de roca volada en un yacimiento hidrotermal de alta sulfuración del Perú", tuvo como objetivo principal mejorar la estimación de la fragmentación de roca volada en minería a cielo abierto, específicamente en la empresa Minera Aruntani S.A.C. Unidad Arasi. La investigación se lleva a cabo mediante una reestructuración a la ecuación de predicción del tamaño de rocas, Kuz-Ram, modelo tradicional, cambiando el coeficiente de tierra, permitiendo disminuir los márgenes de error tomando en consideración aspectos relevantes del diseño como los parámetros geológicos, así como parámetros de perforación y voladura. Concluyendo que el modelo de Kuz-Ram modificado se desempeñó mejor en las regiones de finos ya que los errores de predicción fueron generalmente inferiores al 10%. 3. Entre los modelos probados, el modelo Kuz-Ram modificado funcionó mejor en comparación con las voladuras estudiadas en el tajo Jessica de la Unidad Minera Arasi. La bondad de ajuste que se alcanza con la predicción es de 95%, siendo superior a cualquier modelamiento o aplicación de software existente en el mercado debido a que los datos son propios de una mina y las ecuaciones se desarrollan siguiendo las tendencias e intervalos de confianza obtenidos de los datos experimentales.

Por otro lado, Gutiérrez (2014), en su trabajo de investigación "Diseño de voladura y predicción de la fragmentación en zonas de mineral para optimizar las operaciones unitarias en mina Toquepala", tuvo por finalidad predecir la fragmentación del macizo

rocoso, con tendencia a optimizar la productividad y costos de las operaciones unitarias posteriores a las de perforación y voladura que son carguío, acarreo y chancado, así como el de describir la metodología que implica el proceso de fragmentación. Concluyendo que el buscar integrar el tiempo de retardo en los modelos calibrados, ajustando las curvas de fragmentación modeladas con Kuz-Ram a curvas de fragmentación medidas con un sistema de delineamiento digital de imágenes de la pila de fragmentación. Estas curvas, calibradas (definidas como una matriz de sensibilidad de parámetros de las voladuras) para sectores característicos y representativos de la mina, permitirían predecir la fragmentación a partir del cambio de parámetros de las voladuras, sin perder la tendencia de las curvas medidas. Además, para la obtención de buenos resultados en la operación de voladura, es muy importante que el diseño de perforación sea el adecuado, en términos de tener y conservar los espaciamientos diseñados, profundidades requeridas, geometría adecuada de diseño, y finalmente el número de taladros, a mayor número de taladros mejores resultados en cuanto fragmentación.

También Cotrina (2015), en su tesis "Predicción de fragmentación del macizo rocoso utilizando el modelo predictivo de Kuz - Ram y Chung and Katsabanis en la mina Huanzalácia Minera Santa Luisa S.A.", su objetivo principal fue predecir los tamaños de fragmentación como resultado de la voladura, mediante la aplicación de los modelos predictivos de KUZ - RAM (1983-1986) y CHUNG and KATSABANIS (2000); entregando lineamientos técnicos para lograr construir un modelo simplístico de predicción. Todo esto con finalidad de obtener la fragmentación óptima, con el menor daño posible al macizo rocoso del entorno. Concluyendo que para el modelo Kuz-Ram que tiene un índice de uniformidad de 1.5 aproximadamente da como resultado curvas granulométricas uniformes,

se prefieren los valores altos para los índices de uniformidad. Las distribuciones granulométricas para frentes y tajos, tiene como resultado el tamaño medio X_{50} igual a 8.5 cm, y X_{50} igual a 16.3 cm aproximadamente, y haciendo comparación de la distribución granulométricos de ambos modelos se determina que tienen semejanza, por lo tanto, los parámetros de perforación y voladura se encuentran dentro de lo establecido.

Igualmente, Huanca (2021), en su tesis "Optimización de costos de perforación y voladura mediante el modelo KUZ RAM en el crucero 862 nw, empresa minera Estrella de Cháparra S.A.", su objetivo fue ptimizar los costos unitarios de perforación y voladura mediante el modelo Kuz Ram en el frente de trabajo crucero 862 NW de la empresa minera aurífera Estrella de Cháparra S.A. La metodología del trabajo de investigación consistió primeramente en la adquisición de los parámetros de diseño de voladura existentes, Determinación del ajuste de parámetros de perforación y voladura por intermedio del modelo Kuz Ram, calculo indirecto del tamaño medio de los fragmentos como consecuencia al ajuste de las propiedades de la masa rocosa y la optimización respectiva de los parámetros de diseño de voladura dados para una fragmentación deseada consignado para el costo mínimode perforación y voladura. Concluyendo que, ajustándose los parámetros de diseño de voladura, como el factor de carga por taladro de 0.6787 kg/m³ a 0.6789 kg/m³, correspondientes al anterior y propuesto respectivamente. Consecuentemente el factor de carga por disparo se redujo de 3.4 Kg/m³ a 2.9 Kg/m³, en consumo de explosivos (emulsiones).

En el marco teórico se consideraron algunas definiciones básicas a tener en cuenta a lo largo de la elaboración de la tesis Huanca (2018), señala que el modelo Kuz-Ram, el

nombre es una abreviación de los dos principales contribuyentes a las ecuaciones que forman la base del modelo: Kuznetsov y Rosin-Rammler, Cunningham (1983) y se ha usado extensivamente alrededor del mundo. Este modelo se usa en el Sabrex de ICI entre otros módulos. Se basó en publicaciones rusas antiguas que desarrollaron una relación simple entre los parámetros de tronadura y el tamaño medio de fragmentación.

La ecuación de Kuznetsov proporciona una estimación del tamaño medio, o sea, el tamaño del tamiz por el cual pasa el 50% de la roca. Puesto que la ecuación de Rosin Rammler se puede definir completamente por un punto de la curva y la pendiente de la línea Rosin Rammler, todo lo que se necesita después de la determinación del tamaño medio, es una estimación de n en la ecuación de Rosin Rammler y se puede calcular una distribución completa de tamaño de la pila. Para obtener una expresión para el cálculo de n , Cunningham (1983) usó la teoría moderna de fracturas para obtener una relación entre n y los siguientes factores: exactitud de la perforación, relación del burden al diámetro de hoyo, relación espaciamiento/burden, relación del largo de la carga a la altura de banco. La aplicación del modelo ha sido extensa, aplicado tanto a datos publicados como a experimentales, y en general, se ha concluido que predice muy bien los tamaños gruesos, pero es menos exacto para las fracciones más finas. Cunningham subraya que la exactitud es más importante para la fracción gruesa (sobre tamaño) que para la fracción fina (Huanca, 2018).

Por otro lado, la velocidad de detonación corresponde a la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo. Esta puede utilizarse como una herramienta para determinar la eficiencia de una reacción explosiva y la potencia rompedora corresponde a la capacidad del explosivo de romper la roca. Se mide en función de la rapidez

con la que un explosivo incrementa la presión en el pozo en estado confinado. Si dos explosivos tienen la misma energía relativa, la que tenga mayor potencia rompedora fragmentará la roca en fragmentos de menor tamaño (Rojas, 2021).

También, una malla de perforación corresponde a un patrón geométrico donde se establece el número de tiros, el número de filas, distancia a la cara libre (burden) y espaciamiento entre estos. Dentro de una malla de perforación existe una serie de parámetros que se definen con la intención de minimizar el daño generado a la roca y optimizar la fragmentación. A continuación, se mencionan las variables de diseño más relevantes para la estimación y control de la fragmentación (Rojas, 2021).

La justificación del trabajo de investigación está relacionada con el valor que tendrá este estudio que será de suma utilidad como herramienta predictiva de fragmentación con el cual se podrá tomar la mejor decisión al seleccionar un diseño de voladura de acuerdo con la velocidad de perforación y tipo de litología presente en la Plataforma a volar.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo se aplicará el modelo Kuz Ram para predecir la fragmentación en base a la velocidad de perforación en una mina a cielo abierto ubicada en la Libertad, 2022?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

Aplicar el modelo Kuz Ram para predecir la fragmentación en base a la velocidad de perforación en una mina a cielo abierto ubicada en la Libertad en el año 2022.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar los diferentes rangos de fragmentación de acuerdo con la velocidad de perforación mediante el cálculo de predicción de fragmentación de KUZ RAM.
- Diseñar la carga de acuerdo a la velocidad de perforación y calcular la retención de tacos para corroborar el diseño de carga actual.

1.4. Hipótesis

Con la aplicación del modelo Kuz Ram se logrará predecir la fragmentación del P80 en base a la velocidad de perforación en una mina a cielo abierto.

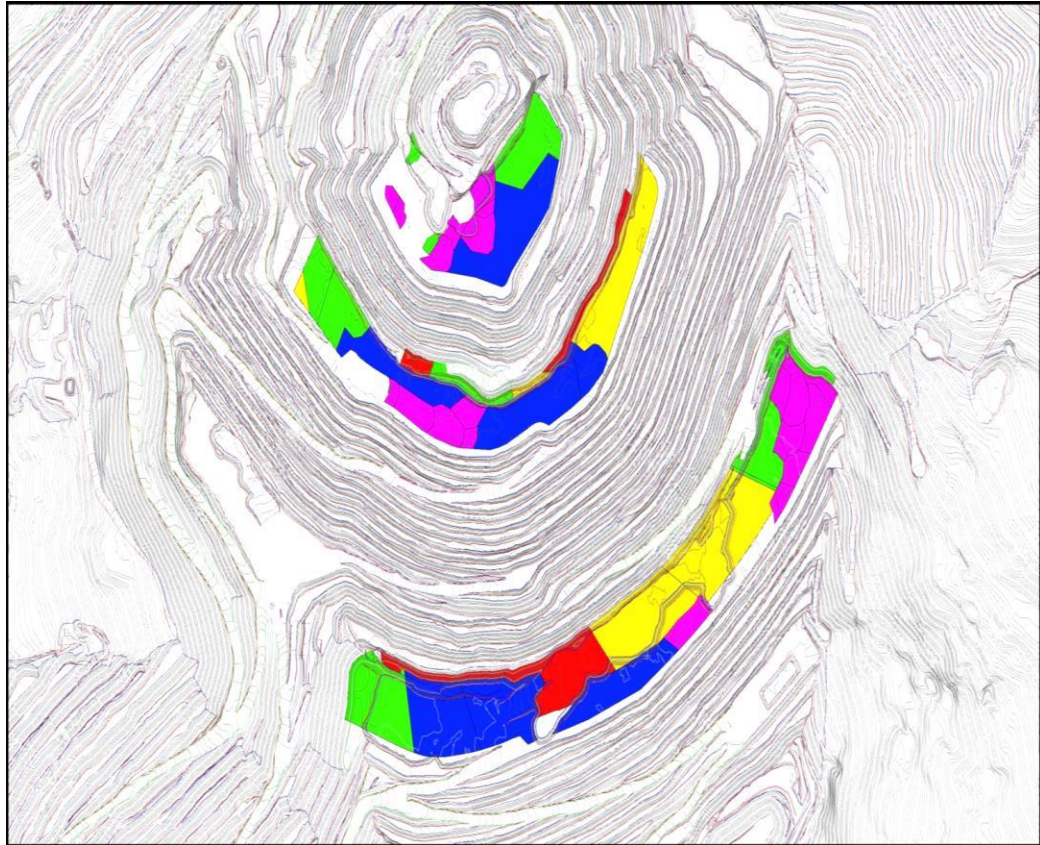
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

El trabajo de investigación realizado es de tipo Aplicada, la cual busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto (Lozada, 2014). Con enfoque No Experimental, según Hernández, Fernández y Baptista, (2010, p. 149) la investigación no experimental, consiste en estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos. Con diseño descriptivo, esta comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre grupo de personas, grupo o cosas, se conduce o funciona en presente" (Pág. 35) (Tamayo y Tamayo, 2004).

La población o universo de estudio está representado por los 6 sectores de minado (B_3164, B_3156, B_3244, B_3236, B_3412 y B_3404) de la mina a tajo abierto en estudio. La muestra o unidad de estudio está constituida por los bancos: B_3244 y B_3236.

Figura 1

Sectores de minado



Fuente: Área de Geología.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se utilizará las técnicas de observación documental y la instrumentación esta resumida en un formato que se muestra en la tabla 01, estos serán de gran ayuda para obtención de información y recolección de datos, orientadas de manera esencial a alcanzar los fines propuestos para este estudio.

Tabla 1

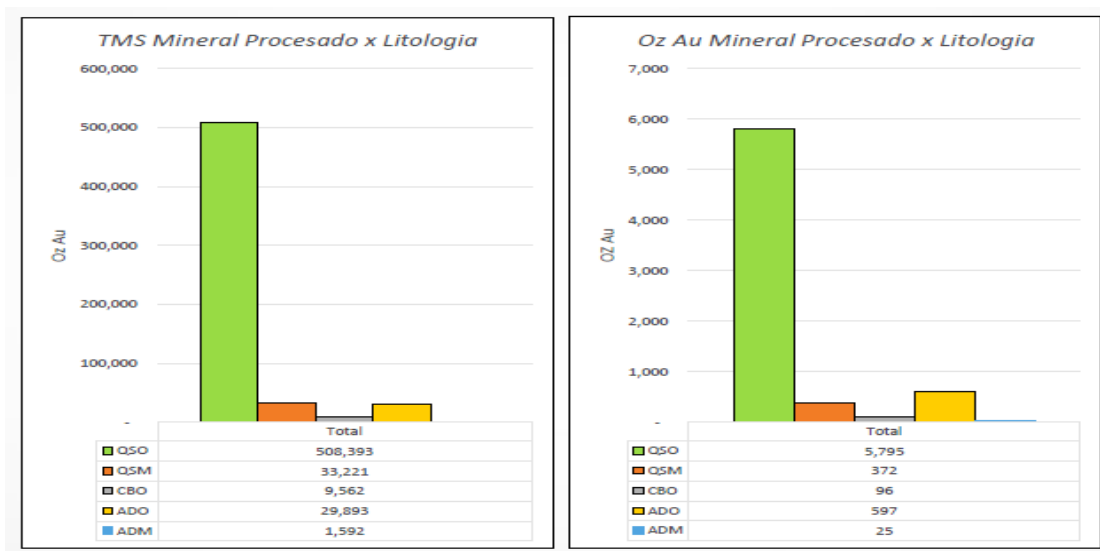
Técnicas de recolección de información

Técnicas	Descripción	Instrumentos
Observación documentaria	Técnica muy utilizada, que permitió identificar directamente la fragmentación obtenida durante el periodo de explotación de la mina en estudio.	Reportes de planta (figura 2)
Recolección de datos	Recopiló la información correspondiente a las velocidades de perforación mediante el sistema Dispatch.	Reportes de Dispatch
Análisis documental	Se filtro la información valiosa y organizó los resultados en base a los objetivos planteados.	Formatos digitales en Excel (figura 3)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2

Reportes de planta



Fuente: Área de Planeamiento.

Figura 3

Formato de recolección de datos

Tamiz	R. Débil	R. Mediana	R. Dura	R. Muy Dura
mm	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %

Fuente: Elaboración propia.

Los equipos y materiales empleados en la investigación: computadora, Internet, paquetes computarizados: programas bajo el ambiente de Windows (Rocsince), cámara digital, GPS, Equipos de Protección Personal, lapiceros, hojas.

El procedimiento para realizar el trabajo de investigación consideró de 02 etapas: Etapa de Campo y Etapa de Gabinete. En la Etapa de Campo se recopiló toda la información referente a los tipos de roca presente en los bancos asumidos como muestra de la investigación.

El grado de fracturamiento fue evaluado a través de los mapeos geomecánicos, logueo geotécnico de taladros orientados y de la revisión de información. La variabilidad en el grado de fracturamiento puede tener un impacto muy importante en el diseño de bancos y taludes inter-rampa, los tramos que presentan más de 30 fracturas por metro se considera que el RQD = 0. En macizos rocosos muy fracturados (RQD<50), las estructuras generalmente tienen un impacto menor en la cara inclinada del banco. Sin embargo, la resistencia y calidad general del macizo se verá reducida, lo cual tiene un impacto significativo en el diseño del ángulo inter-rampa. Cabe resaltar que para la obtención del RQD se validaron solamente fragmentos iguales o superiores a 0,10 m de longitud.

Tabla 2

Tipos de roca

Tipo de Roca	Resistencia a la compresión simple
COA, ADO, OBV	0 - 31 Mpa
ADS, ADO, DAS, QSD	31 -70 Mpa
QSD, QSO, HBX	70 - 100 Mpa
HBX, QSD,QSD	100 - 130 Mpa

Fuente: Área de Geotecnia.

Figura 4

Parámetros KUZ - RAM / Factor de Roca

RMD = Descripción de la roca	
Desmenuzable, pulvurulenta, Frágil	10
Diaclasado o fracturado Vertical	JPS + JPA
Masivo	50
JPS = Separación entre fracturas planas	
< 0.1m.	10
(0.1 a 1.0) m.	20
> 1.0 m.	50
JPA = Ángulo fracturas planas	
Horizontal	10
Orientación hacia el banco	20
Perpendicular	30
Orientación hacia la cara libre	40
RDI = Influencia de la densidad	
(25*Dr) - 50	
HF = Factor de Roca	
Si E es < 50 GPa	HF = E/3
Si E es > 50 GPa	HF = UCS/5
E = Modulo de Young (GPa)	
UCS = Fuerza Compresiva no Confinada (MPa)	

Fuente: Manual de Voladura ENAEX.

Ecuación 1: Factor de Roca - KUZ RAM

$$A = 0.06 \times (RMD + JPS + JPA + RDI + HF)$$

Dónde:

RMD: Descripción de la roca.

JPS: Separación entre fracturas planas.

JPA: Ángulo de fracturas planas.

RDI: Influencia de la densidad.

HF: Factor de dureza.

En la Etapa de Gabinete se empleó las ecuaciones del modelo Kuz Ram para predecir la fragmentación en base a la velocidad de perforación, la cual se extrajo de los reportes de Dispatch. A continuación, se muestra los pasos y las fórmulas utilizadas para llegar a la predicción solicitada.

Tabla 3

Velocidad de perforación / Tipo de roca

Tipo de Roca	Velocidad
Débil	1-8 min
Mediano	9-11 min
Duro	12-18 min
Muy Duro	>18 min

Fuente: Reporte de Dispatch.

Ecuación 2: *Tamaño medio de Fragmentación KUZ RAM*

$$X_{50} = A \times \left(\frac{V_0}{Q_e} \right)^{0.8} \times Q_e^{0.633} \times \left(\frac{115}{E} \right)$$

Dónde:

A = Factor de roca.

V_0 = Volumen de roca fragmentada por pozo (m³).

Q = Cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por pozo.

Q_e = Kilos de explosivo por pozo.

E = Potencia relativa en peso referida al Anfo.

Ecuación 3: Coeficiente de conformidad

$$n = (2.2 - 14 \frac{d}{B}) \times \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right)^{0.5} \times \left(1 - \frac{W}{B} \right) \times \left(\frac{\text{abs}(BCL - CCL)}{L} + 0.1 \right)^{0.1} \times \frac{L_0}{H}$$

Dónde:

d = Diámetro de perforación (mm).

B = Burden (m).

S = Espaciamiento (m).

W = Desviación de perforación (m).

BCL = Longitud de carga de fondo (m).

CCL = Longitud de carga de columna (m).

L_t = Longitud total de carga (m).

L₀ = Longitud de carga sobre el nivel de piso (m).

H = Altura del banco.

Los aspectos éticos que se han considerado reafirman que toda la información proporcionada por la empresa será estrictamente utilizada en el desarrollo de la investigación y no con otros fines que afecten los intereses de la organización. Al desarrollar esta tesis se respetó los derechos de propiedad los autores según las normas establecidas por la Universidad Privada del Norte.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Rangos de fragmentación de acuerdo con la velocidad de perforación mediante el modelo de perdicción de la frgmentación KUZ RAM

A continuación se presenta los resultados del cálculo de los factores de roca y tamaño mediod e fragmentación empleando la ecuación 01, 02 y 03.

Tabla 4

Parámetros y Factores de Roca

PARÁMETROS	Valor	Valor	Valor	Valor
Factor de roca	1.5	1.58	1.41	1.63
Densidad del explosivo (gr/cm ³)	1.32	1.32	1.32	1.32
Energía total del explosivo (MJ/Kg)	4.15	4.15	4.15	4.15
Energía total del HA73G (MJ/Kg)	3.96	3.96	3.96	3.96
Diámetro del taladro (mm)	171	171	171	171
Altura del banco (m)	8	8	8	8
Sobre perforación (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura del taco (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
Burden (m)	5.3	5.3	5.3	5.3
Espaciamiento (m)	6.15	6.15	6.15	6.15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5

Tamaño medio de fragmentación

Tamaño medio de Fragmento X50	Valor	Valor	Valor	Valor
Altura de carga (m)	5	5.1	6	6
Concentración de carga lineal (kg/m)	30.5	30.5	30.5	30.5
Consumo específico (kg/m ³)	0.6	0.6	0.7	0.7
Carga media (kg)	152.3	153.8	182.8	182.8
Potencia relativa en peso RWS	104.8	104.8	104.8	104.8
Tamaño medio X50 Kuznetsov (mm)	56.9	59.4	47.6	55.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Coefficiente de uniformidad

Exponente n	Valor	Valor	Valor	Valor
Burden (m)	5.35	5.35	5.35	5.35
Espaciamiento (m)	6.15	6.15	6.15	6.15
Longitud de la carga sin sobre perforación (m)	5.5	5.5	5.5	5.5
Altura de banco (m)	8	8	8	8
Error de perforación (m)	0.2	0.2	0.2	0.2
Diámetro del taladro (mm)	171.45	171.45	171.45	171.45
Índice de uniformidad (n)	1.21	1.21	1.21	1.21

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7

Distribución de pasantes

Tamiz mm	R. Débil Pasante %	R. Mediana Pasante %	R. Dura Pasante %	R. Muy Dura Pasante %
6.35	5.5	5.1	5.9	4.9
12.7	12.2	11.5	13.1	11.1
19.05	19.1	18.1	20.5	17.4
25.4	25.9	24.6	27.7	23.8
38.1	38.8	37	41.1	35.8
50.8	50.1	48	52.8	46.6
76.2	67.8	65.6	70.6	64.1
101.6	79.9	78	82.4	76.6
127	87.8	86.2	89.7	85.1
152.4	92.7	91.6	94.1	90.7
177.8	95.8	94.9	96.7	94.3
203.2	97.6	97	98.2	96.5
228.6	98.6	98.2	99	97.9
254	99.23	98.98	99.5	98.8
304.8	99.77	99.67	99.9	99.6
381	100	99.9	100	99.9
508	100	100	100	100
609.6	100	100	100	100
635	100	100	100	100
762	100	100	100	100
914.4	100	100	100	100
1016	100	100	100	100
1066.8	100	100	100	100
1143	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Se Interpola de acuerdo con el pasante requerido, en nuestro caso nos interesa el P80.

Tabla 8

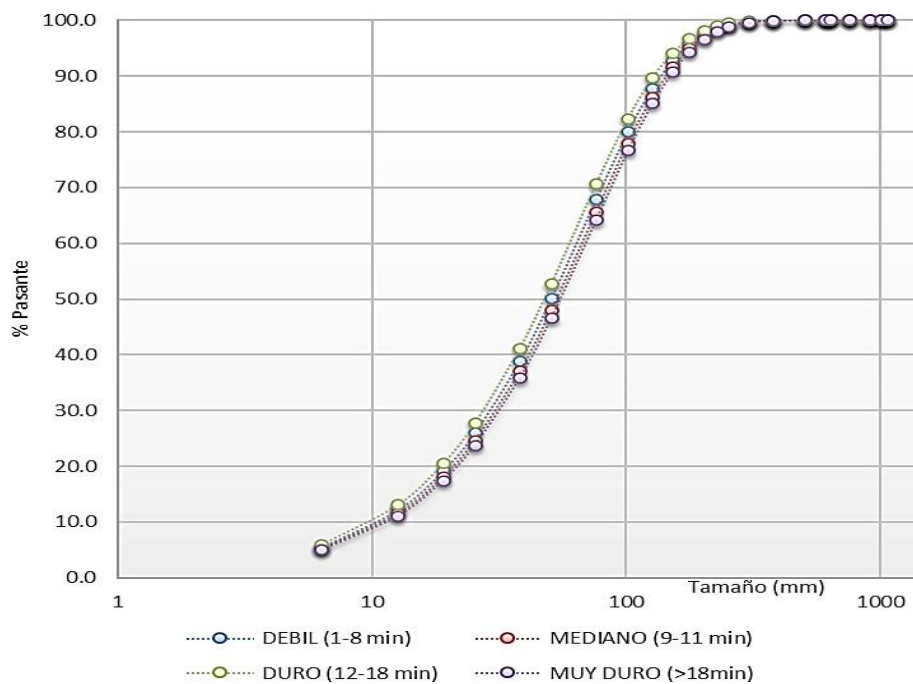
Factores KUZ RAM

Factores	Valor	Valor	Valor	Valor
Índice de uniformidad (n)	1.21	1.21	1.21	1.21
Tamaño medio X50 Kuznetsov (mm)	50.73	53.29	47.6	55.12
Tamaño medio X80 Kuznetsov (mm)	101.79	107.54	172.71	187.88

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5

Curva granulométrica de acuerdo a las velocidades



Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de acuerdo con la predicción calculada son:

Tabla 9

Resultados de la predicción de fragmentación KUZ RAM

Tipo de roca	Fragmentación (pulg)
Débil	4
Mediano	4.2
Duro	6.8
Muy Duro	7.4

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Diseños de carga y cálculos de retención de tacos

Los diseños de carga se establecieron en base a la velocidad de perforación para cada tipo de roca. Las características del explosivo HA73G son: alto poder rompedor, VOD mayor a los 5500 mm/s, resistencia al agua, más barato en comparación con otras mezclas explosivas y el 12% de esponjamiento al taladro.

Tabla 10

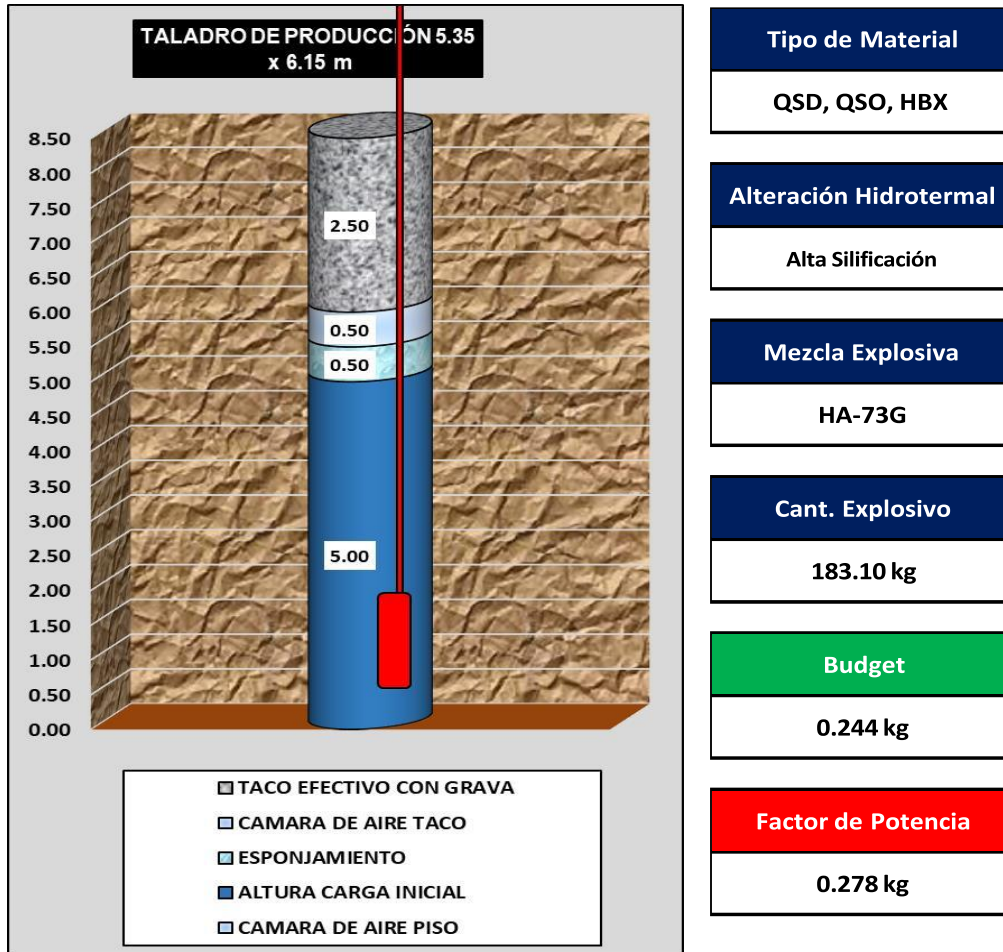
Parámetros de diseño - Roca Dura / Muy Dura

Parámetros de perforación		
Altura de banco	8	m
Diámetro de broca	6 3/4	pulg
Malla	triangular	m
Espaciamiento	6.15	m
Burden	5.35	m
Sub Drilling	0.5	m
Cámara de aire piso	0	m
Altura de carga inicial	5	m
Taco inicial	3.5	m
Esponjamiento	0.5	m
Taco final	3	m
Cámara de aire taco	0.5	m
Taco efectivo con grava	2.5	m
Altura de taladro	8.5	m
Densidad inicial de MEC	1.38	gr/cm ³
Densidad final de MEC	1.15	gr/cm ³
Densidad lineal (sin deformación)	31.88	kg/m
Densidad lineal (con deformación)	36.66	kg/m

Fuente: Área de voladura.

Figura 6

Diseño 01 - Roca Dura / Muy Dura



Fuente: Área de voladura.

Tabla 11

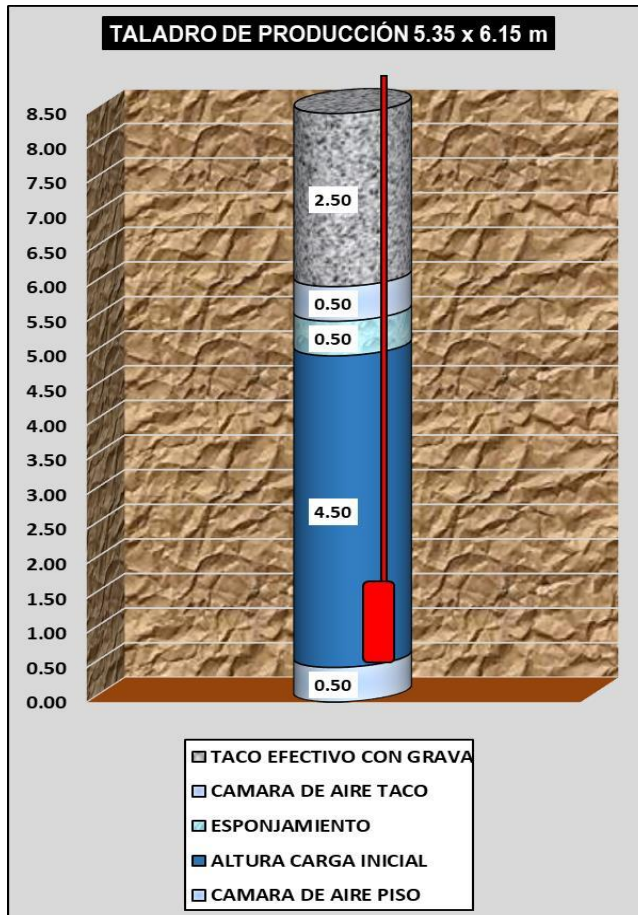
Parámetros de diseño - Roca Débil / Mediana

Parámetros de perforación		
Altura de banco	8	m
Diámetro de broca	6 3/4	pulg
Malla	triangular	m
Espaciamiento	6.15	m
Burden	5.35	m
Sub Drilling	0.5	m
Cámara de aire piso	0.5	m
Altura de carga inicial	4.5	m
Taco inicial	3.5	m
Esponjamiento	0.5	m
Taco final	3	m
Cámara de aire taco	0.5	m
Taco efectivo con grava	2.5	m
Altura de taladro	8.5	m
Densidad inicial de MEC	1.285	gr/cm ³
Densidad final de MEC	1.075	gr/cm ³
Densidad lineal (sin deformación)	29.68	kg/m
Densidad lineal (con deformación)	34.14	kg/m

Fuente: Área de voladura.

Figura 7

Diseño 02 - Roca Débil / Mediana



Tipo de Material
QSO, DAS
Alteración Hidrotermal
Moderada Silicificación Alta Silicificación
Mezcla Explosiva
HA-82G
Cant. Explosivo
153.45 kg
Budget
0.184 kg
Factor de Potencia
0.233 kg

Fuente: Área de voladura.

Tabla 12*Parámetros de retención de taco*

Producción	
H (m)	8
J (m)	0.5
Taco (m)	2.5
Aire / Deck	2.5
Lc (m)	3.5
Diámetro (pulg)	6 3/4
P.Explosivo (g/cc)	1.15
SD	0.94

Fuente: Área de voladura.

El cálculo de retención de tacos permitió corroborar los diseños actuales de perforación.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Según los resultados mostrados anteriormente, se obtuvo una predicción del p80 según la velocidad de perforación con el modelo de KUZ RAM dando como resultado un p80 para roca su débil de 4 pulg, roca media de 4.2 pulg dura de 6.8pulg y muy dura de 7.4 pulg.

Estos datos se sustentan y comparan con los resultados obtenidos por Cotrina (2015), en su tesis "Predicción de fragmentación del macizo rocoso utilizando el modelo predictivo de Kuz - Ram y Chung and Katsabanis en la mina Huanzalácia Minera Santa LuisaS.A.", su objetivo principal fue predecir los tamaños de fragmentación como resultado de la voladura, mediante la aplicación de los modelos predictivos de KUZ - RAM (1983-1986) y CHUNG and KATSABANIS (2000); entregando lineamientos técnicos para lograr construir un modelo sinplístico de predicción. Todo esto con finalidad de obtener la fragmentación optima, con el menor daño posible al macizo rocoso del entorno. Concluyendo que para el modelo Kuz-Ram que tiene un índice de uniformidad de 1.5 aproximadamente da como resultado curvas granulométricas uniformes, se prefieren los valores altos para los índices de uniformidad. Las distribuciones granulométricas para frentes y tajos, tiene como resultadoel tamaño medio X_{50} igual a 8.5 cm, y X_{50} igual a 16.3 cm aproximadamente, y haciendo comparación de la distribución granulométricos de ambos modelos se determina que tienen semejanza, por lo tanto, los parámetros de perforación y voladura se encuentran dentro de lo establecido.

Así mismo, la cantidad de mezcla explosiva de los taladros depende de la velocidad de perforación tomando como base dos tipos de diseño de carga para roca débil y mediana de 153.45 kg/tal dura y muy dura de 183.10 kg/tal.

Estos resultados nos permiten comparar los datos con los encontrados por Huanca (2021), en su tesis "Optimización de costos de perforación y voladura mediante el modelo KUZ RAM en el crucero 862 nw, empresa minera Estrella de Cháparra S.A.", su objetivo fue ptimizar los costos unitarios de perforación y voladura mediante el modelo Kuz Ram en el frente de trabajo crucero 862 NW de la empresa minera aurífera Estrella de Cháparra S.A. La metodología del trabajo de investigación consistió primeramente en la adquisición de los parámetros de diseño de voladura existentes, Determinación del ajuste de parámetros de perforación y voladura por intermedio del modelo Kuz Ram, calculo indirecto del tamaño medio de los fragmentos como consecuencia al ajuste de las propiedades de la masa rocosa y la optimización respectiva de los parámetros de diseño de voladura dados para una fragmentación deseada consignado para el costo mínimo de perforación y voladura. Concluyendo que, ajustándose los parámetros de diseño de voladura, como el factor de carga por taladro de 0.6787 kg/m³ a 0.6789 kg/m³, correspondientes al anterior y propuesto respectivamente. Consecuentemente el factor de carga por disparo se redujo de 3.4 Kg/m³ a 2.9 Kg/m³, en consumo de explosivos (emulsiones).

Las limitaciones de la tesis están relacionadas con que los estudios del modelo predictivo de fragmentación de Kuz - Ram, se realizaron en mallas de perforación y voladura para bancos de roca débil, mediana, dura y muy dura; diseñadas por el área de operación minera de la mina en estudio, por lo tanto la investigación solo será desde un punto de vista estadístico. El análisis de la eficiencia del modelo será en base a referencias bibliográficas y a partir de ello brindar las recomendaciones necesarias para su mejoramiento.

CONCLUSIONES

- Se determinó los diferentes rangos de fragmentación de acuerdo con la velocidad de perforación mediante el cálculo de predicción de fragmentación de KUZ RAM, obtenido una predicción del p80 según la velocidad de perforación con el modelo de KUZ RAM dando como resultado un p80 para roca su débil de 4 pulg, roca media de 4.2 pulg dura de 6.8pulg y muy dura de 7.4 pulg.
- Se diseño la carga de acuerdo a la velocidad de perforación y calcular la retención de tacos para corroborar el diseño de carga actual, en la que la cantidad de mezcla explosiva de los taladros depende de la velocidad de perforación tomando como base dos tipos de diseño de carga para roca débil y mediana de 153.45 kg/tal dura y muy dura de 183.10 kg/tal.
- Estos resultados permitirán tomar decisiones anticipadas para seleccionar el mejor diseño que pueda satisfacer los requerimientos necesarios para poder cumplir con las metas asignadas, además será de suma utilidad como herramienta predictiva de fragmentación con el cual se podrá tomar la mejor decisión al seleccionar un diseño de voladura de acuerdo con la velocidad de perforación y tipo de litología presente en la Plataforma a volar.

REFERENCIAS

- Arispe, R. y Sosa, M. (2022). *"Propuesta de ajuste al modelo predictivo Kuz-Ram empleando análisis granulométrico de imágenes para mejorar la estimación de la fragmentación de roca volada en un yacimiento hidrotermal de alta sulfuración del Perú"*. (TESIS PRE GRADO). Universidad Privada de Ciencias Aplicadas. Lima, Perú.
- Cotrina, L. (2015). *"Predicción de fragmentación del macizo rocoso utilizando el modelo predictivo de Kuz - Ram y Chung and Katsabanis en la mina Huanzalácia Minera Santa Luisa S.A."*. (TESIS PREGRADO). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú.
- Cunningham, C. (1987). *Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model- four years on*. Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, (pp. 475- 487). Keystone.
- Cunningham, C. (1983). *The Kuz-Ram model for predicction of fragmentation from Blasting*. Proc. 1st Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting (pp. 439- 453). Luleå, Sweden: Recuperado (<https://es.scribd.com/document/42465299/KUZ-RAM>).
- Gutiérrez, E. (2014). *"Diseño de voladura y predicción de la fragmentación en zonas de mineral para optimizar las operaciones unitarias en mina Toquepala"*. (TESIS PREGRADO). Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa, Perú.

Huanca, R. (2021). “*Optimización de costos de perforación y voladura mediante el modelo*

KUZ RAM en el crucero 862 nw, empresa minera Estrella de Cháparra S.A.”.

(TESIS PRE GRADO). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Huanca, J. (2018). “*Predicción de la fragmentación en la voladura de bancos de producción*

de la U.M. Tacaza”. (TESIS PREGRADO). Universidad Nacional del Altiplano.

Puno, Perú.

Hernández, Fernández y Baptista, (2010). “*Metodología de la investigación*”. Recuperado

de: <http://virtual.urbe.edu/tesispub/0105003/cap03.pdf>

Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria.

CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica

Indoamérica, 3(1),

47–50.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>

Kuznetsov, V. (1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet

Mining Sci, 9: 144–148.

Katsabanis, & Liu. (1996). Delay requirements for fragmentation optimization,

FRAGBLAST 5. Montreal, Canada.

Katsabanis, P. D., Tawadrous, A., Braun, C., & Kennedy, C. (2006). Timing Effects on Fragmentation. Proceedings of the 32nd Conference on Explosives and Blasting Technique. ISEE, Dallas.

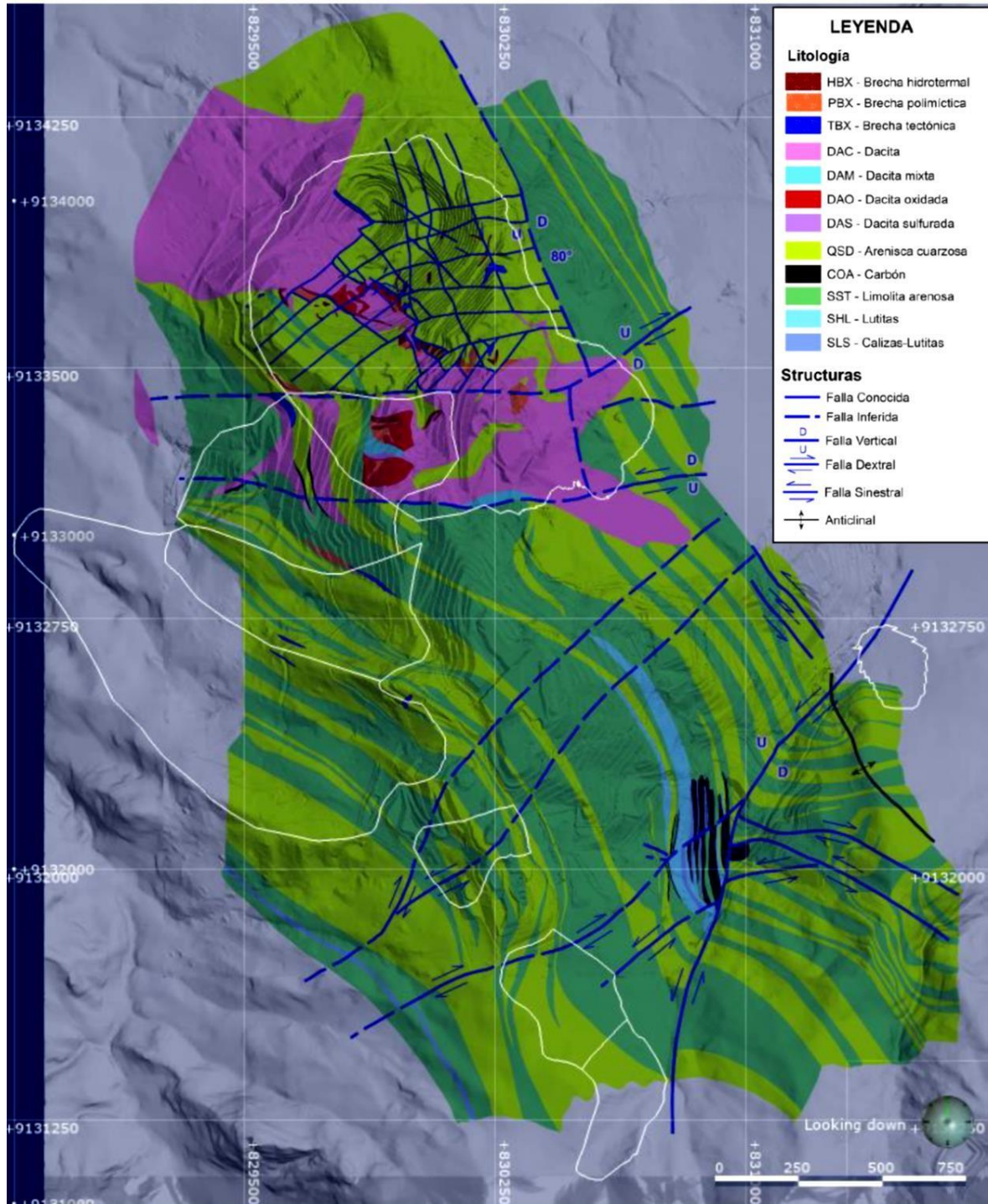
Ordoñez, M., Ramírez, C. & Proaño G. (2012). “*Planificación y predicción de la fragmentación en las voladuras a cielo abierto*”. (TESINA). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.

Rojas (2021). “*Estimación de la fragmentación producto de la tronadura de rocas en minería a cielo abierto utilizando modelos predictivos y algoritmos de regresión*”. (TESIS PREGRADO). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

Tamayo, J. y Tamayo, M. (2004). “*Proceso de investigación*”. Recuperado de:
<http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/eureka/pudgvirtual/Tamayo.pdf>

ANEXOS

ANEXO N° 01: Mapa Geológico



ANEXO N° 02: Formato GSI

PROYECTO: Tipo de Roca: Ubicación: E: N: Valor GSI: Fecha:				
<p align="center">HOEK & MARINOS, 2000.</p> <p>Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 3 a 37 es más real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales débiles están presentes en una dirección desfavorable respecto a la excavación, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteración como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua está presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presión de agua es tratada por análisis de esfuerzos efectivos.</p>	MUY BUENA	BUENA	REGULAR	POBRE
	Superficie muy rugosa, no meteorizadas, frescas.	Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas.	superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos
	N/A	N/A	N/A	MUY POBRE
INTACTA O MASIVA: Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas.	90			N/A
FRACTURADA: Macizo rocosos con bloque entrelazados, bloques cúbicos formados tres intersecciones de sistema de discontinuidades	80	70		
MUY FRACTURADA: Macizo rocosos con bloques entrelazados y angulares formados por la intersección de 4 o más sistemas.		60	50	
FRACTURADA/ PERTURBADA/ SORDIDA: Macizo plegado formado por bloques angulares producto de la intersección de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación.			40	30
DISGREGADO: Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados.				20
LAMINADA/ FOLIADA : Se carece de bloques debido al débil material en los planos de esquistosidad y cizalla.	N/A	N/A		10

ANEXO N° 03: Fotografías de campo.

