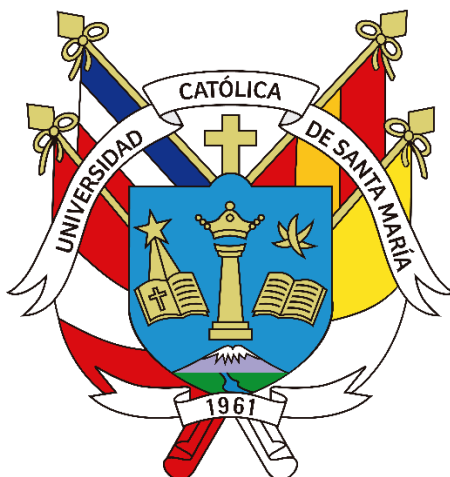


**Universidad Católica de Santa María**

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas Y Formales**

**Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**



**“MODELO PREDICTIVO DE RENDIMIENTO DE TRICONOS APLICADO A LA PERFORACIÓN ROTATIVA EN UN YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO COBRE Y MOLIBDENO”**

Tesis Presentada por el bachiller:

**Villalta Villena Jorge Luis**

Para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

Asesor:

**Ing. Reategui Ordoñez Carlos**

**Arequipa – Perú**

**2022**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA DE MINAS**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 08 de Septiembre del 2022

**Dictamen: 006673-C-EPIM-2022**

Visto el borrador del expediente 006673, presentado por:

**2015224291 - VILLALTA VILLENA JORGE LUIS**

Titulado:

**MODELO PREDICTIVO DE RENDIMIENTO DE TRICONOS APLICADO A LA PERFORACIÓN  
ROTATIVA EN UN YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO COBRE Y MOLIBDENO**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**2872 - LOPEZ CASAPERALTA PATRICIA YANETH  
DICTAMINADOR**



**3324 - DELGADO PONCE MARIA AZUCENA  
DICTAMINADOR**



**9571 - BERNEDO TITO EDWIN JOSE  
DICTAMINADOR**



## AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Católica de Santa María, por brindarme la capacitación, valores y competencias necesarias para desarrollarme como profesional.

A mis padres, esposa e hijos, por la confianza depositada en mí, y el gran cariño que me muestran siempre.

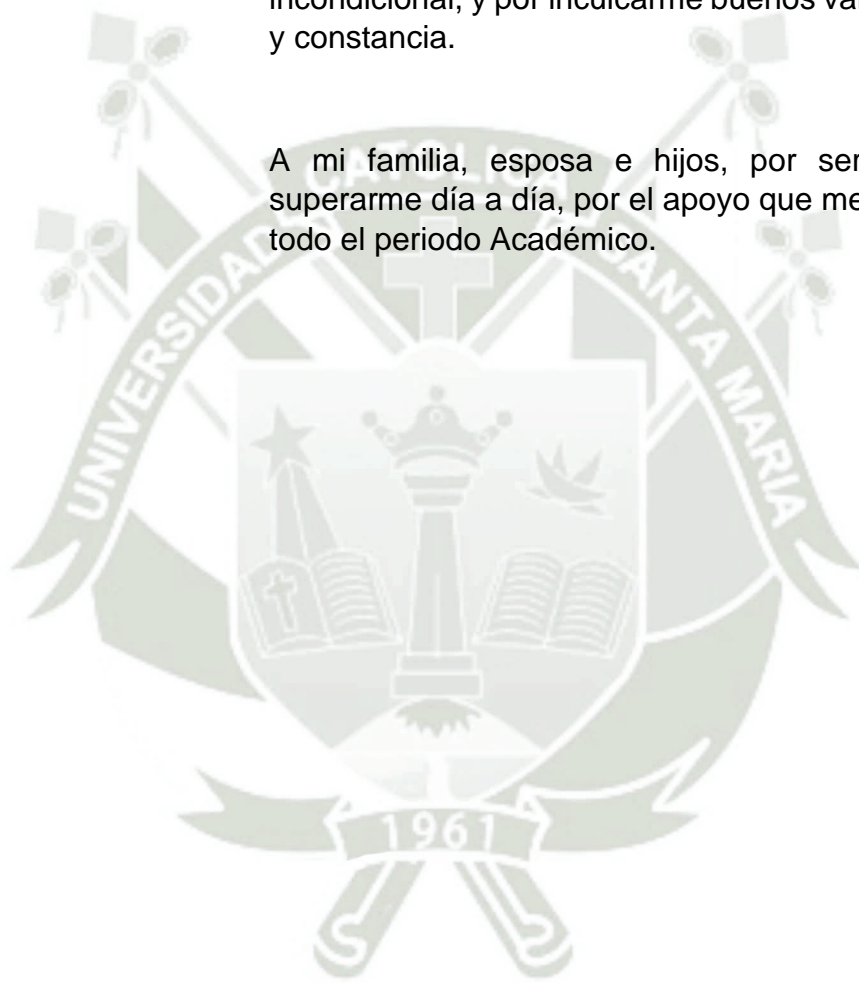


## DEDICATORIA

A mi padre Luis Villalta Rojas por su apoyo durante mi etapa universitaria, y por ser un modelo para seguir como profesional.

A mi madre Maritza Villena Figueroa, por su infinito apoyo incondicional, y por inculcarme buenos valores, tenacidad y constancia.

A mi familia, esposa e hijos, por ser el motivo de superarme día a día, por el apoyo que me dieron durante todo el periodo Académico.



## RESUMEN

La perforación en minas de bancos altos se hace con brocas triconicas, éstas representan el 8.33% de costo total de perforación además de que ser la herramienta de mayor desgaste durante la penetración. El desgaste se debe a las condiciones geomecánicas de los macizos de roca, si no se aplican las variables de operación calculadas correctamente; como empuje promedio y velocidad de giro aplicada en la sarta de perforación, se puede ver afectada la velocidad de penetración y la penetración de los insertos en la roca conocida como "indentación". Estos dos factores afectaran directamente en el rendimiento de la broca y en su costo de penetración por metro. En la presente investigación se establece la relación de las variables de operación mencionadas con las unidades básicas geotécnicas del macizo rocoso para los sectores de mineral y desmonte en el tajo, para establecer la relación de desgaste o falla de los triconos. Se determino que los factores de mayor influencia en el rendimiento de una broca son las características geomecánicas del macizo rocoso y la presión ejercida por la perforadora sobre el tricono, denominada también Pulldown, y establecer un modelo de predicción relacionando metros perforados por una broca triconica con los factores operacionales calculados para cada unidad básica geotécnica.

El costo de penetración está asociado a la cantidad de metros alcanzados por cada broca, disminuye cuando aumenta el rendimiento de metros de la broca, este es un indicador importante en el análisis de los costos operativos de perforación. Finalmente se establece que, para lograr una supervisión efectiva del rendimiento de los triconos, se debe controlar el Pulldown. aplicado en cada unidad básica geotécnica.

**Palabras Clave:** Brocas, Triconos, Perforación Rotativa, Modelo Predicción.

## ABSTRACT

Drilling in high bench is done with tri-conical bits, these represent 8.33% of total drilling cost in addition to being the tool of greater wear during penetration. The wear is due to the geo-mechanical conditions, however if the correctly calculated operating variables are not applied; as average thrust and rotational speed applied in the drilling string, the penetration rate and penetration of the inserts into the rock known as "indentation" can be affected. These two factors will directly affect the performance of the drill bit and its penetration cost. This research establishes the relationship of the operating variables mentioned with the basic geotechnical units of the for the ore and waste sectors in the pit, to establish the relationship of wear or failure of the tricones bit. It was determined that the factors of greatest influence on the performance of a drill bit are the geo mechanical characteristics of the rock mass and the pressure exerted by the drill on the tricone, also called Pulldown, and establish a prediction model of the meters drilled by a tricone bit with the operational factors calculated for each basic geotechnical unit.

The cost of penetration is associated with the number of meters reached by each drill bit, decreases when the performance of meters of the drill bit increases, this is an important indicator in the analysis of drilling operating costs. Finally, it is established that to achieve effective monitoring of the performance of the tricones bit, the Pulldown must be controlled. applied in each basic geotechnical unit.

**Keywords:** Drill bits, Tricones Bit, Rotary Drilling, Prediction Model.

## INTRODUCCIÓN

En la perforación el uso de brocas triconicas afecta directamente al presupuesto operativo. Al fallar prematuramente las brocas triconicas, el rendimiento real disminuye en campo, esto afecta el costo final de operación. Si se desarrolla un modelo predictivo que explique el rendimiento real aplicado a un tipo de yacimiento específico se puede estimar el rendimiento de las brocas presupuestadas para el futuro de la operación.

Existen tres factores principales que determinan el rendimiento de una broca triconica: Las características geotécnicas del macizo rocoso en un área, que definen el dominio o unidad geotécnicas básica (UGB), estas características son: la densidad de la roca ( $\gamma$ ), la resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ), la resistencia a la tracción ( $\tau$ ), el módulo de Young ( $E$ ), el radio de Poisson ( $\nu$ ), el parámetro de envolvente de falla de roca intacta ( $m_i$ ), el índice de resistencia geológica (GSI) y los parámetros del macizo rocoso ( $S$ ) y ( $a$ ) propuestos por Hoek & Brown (2013). Las variables operacionales como la presión de empuje sobre la broca o “pulldown” (PD), la velocidad de giro de la broca en revoluciones por minuto (N) y el diámetro del taladro (D) y Los factores relacionados a la habilidad del perforista, que se puede cuantificar indirectamente evaluando el metraje alcanzado por cada uno en un periodo.

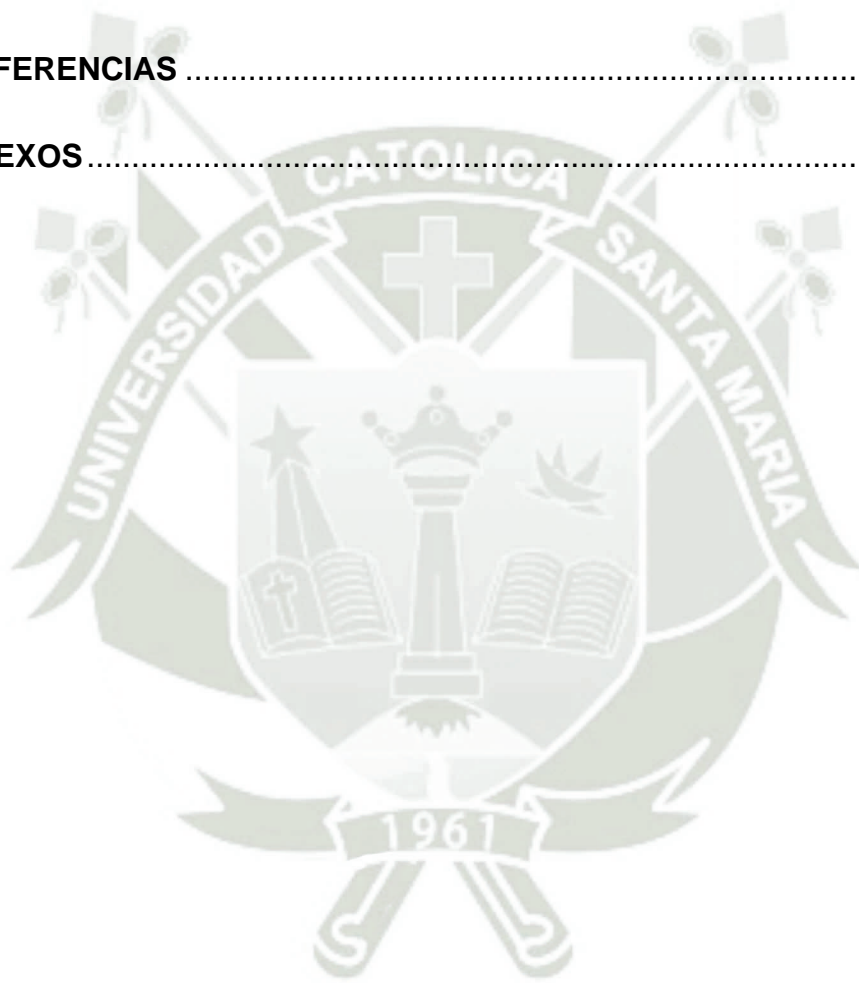
## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	vii
CAPITULO I.....	xv
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	xvi
1.1. Planteamiento del problema .....	xvi
1.2. OBJETIVOS .....	xvi
1.2.1. Objetivo general.....	xvii
1.2.2. Objetivos Específicos .....	xvii
1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	xviii
1.3.1. Pregunta Global .....	xviii
1.3.2. Preguntas Especificas .....	xviii
1.4. LINEA DE INVESTIGACIÓN.....	xviii
CAPITULO II.....	xix
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	xix
2.1. Estado del Arte .....	xix
2.2. Unidades geotécnicas básicas.....	xxi
2.3. Índices operacionales de perforación .....	xxii
2.3.1. Empuje.....	xxiii
2.3.2. Pulldown.....	xxiii

2.3.3. Velocidad de Giro (N), Velocidad de penetración (VP) y Velocidad media (VM) .....	xxiii
2.4. Triconos .....	xxiv
2.4.1. Proceso de corte perforación con triconos.....	xxv
2.4.2. Criterios de selección de triconos .....	xxvi
2.4.3. Aleaciones para brocas tricónicas.....	xxvii
2.4.4. Tipos de insertos .....	xxviii
2.4.5. Identificación de triconos .....	xxix
2.5. Desgaste de brocas triconicas .....	xxxii
2.5.1. Desgaste de insertos.....	xxxii
2.5.2. Falla en los cojinetes.....	xxxiii
2.5.3. Indentación.....	xxxiv
2.5.4. Modelo de interacción macizo rocoso-broca tricónica	xxxv
2.6. Antecedentes .....	xxxviii
2.7. Hipótesis .....	xli
2.8. Variables.....	xli
2.8.1. Variable independiente.....	xli
2.8.2. Variables dependientes.....	xli
CAPÍTULO III.....	xlii
3. MARCO METODOLÓGICO .....	xlii
3.1. Alcances y Limitaciones .....	xlii
3.1.1. Alcance .....	xlii

3.1.2. Limitaciones.....	xlii
3.2. Tipo y diseño de la Investigación.....	xliii
3.2.1. Tipo de Investigación .....	xliii
3.2.2. Nivel de Investigación .....	xliii
3.3. Población y muestra.....	xliii
3.4. Ubicación de la Investigación .....	xliv
3.4.1. Descripción geológica general.....	xliv
3.4.2. Descripción geomecánica y geotécnica del tajo .....	xlvi
3.4.3. Propiedades de la roca intacta y macizo rocoso .....	xlvi
3.4.4. Dominios estructurales .....	xlix
3.4.5. Diseño geométrico del tajo .....	li
3.4.6. Proceso Operativo de Perforación.....	liii
CAPITULO IV .....	lvi
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	lvi
4.1. Análisis e interpretación de los datos .....	lvi
4.2. Rendimiento de brocas triconicas en mineral .....	lviii
4.3. Determinación de la eficiencia operativa de brocas en mineral. lxiv	
4.4. Determinación del daño de la broca .....	lxxi
4.5. Rendimiento de brocas en desmonte.....	lxxiv
4.6. Determinación de la eficiencia operativa de brocas en desmonte. lxxx	

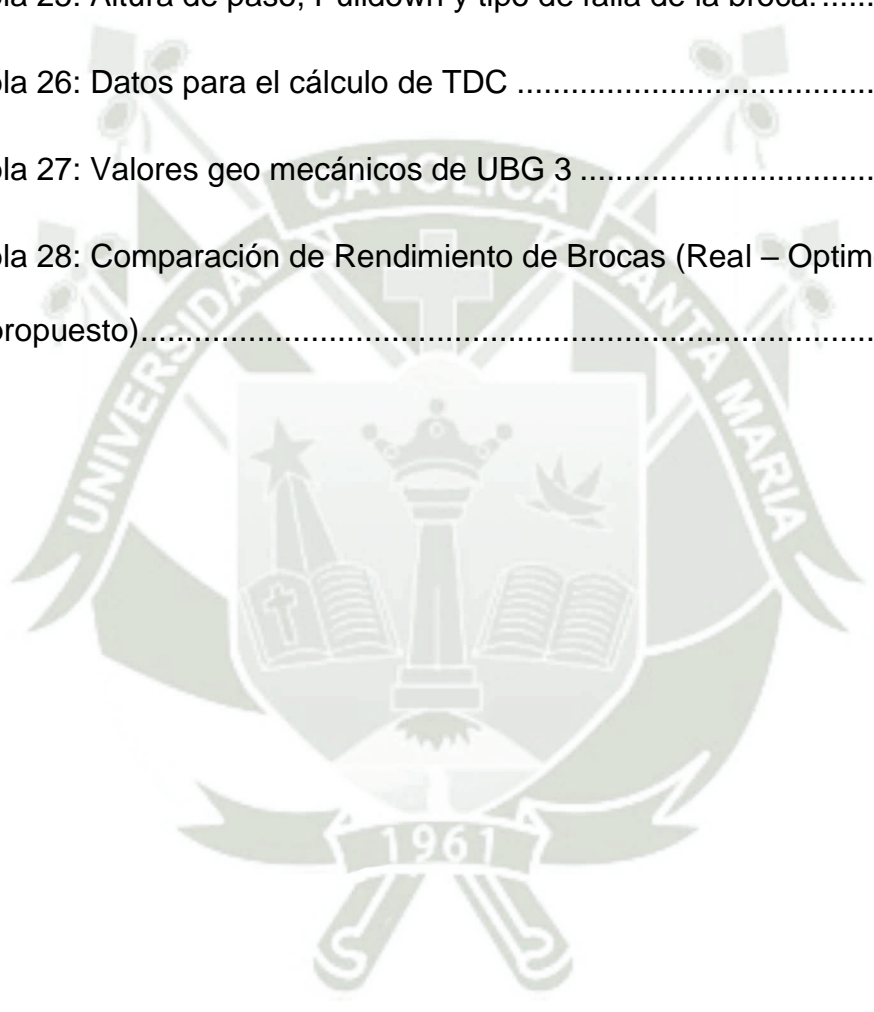
4.7. Modelo General para el rendimiento de brocas triconicas ..	xc
4.8. Costo de perforación por broca .....	xcii
5. Validación .....	xciii
CONCLUSIONES .....	xcvii
RECOMENDACIONES.....	xcix
REFERENCIAS .....	C
ANEXOS.....	ciii



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aleaciones para triconos .....	xxviii
Tabla 2: Parámetros de diseño y construcción de bancos-taludes .....	li
Tabla 3: Características de las brocas triconicas usadas en el estudio ....	lv
Tabla 4: Equipos de perforación en operación.....	lvi
Tabla 5: Ubicación de la perforación en el tajo. ....	lvii
Tabla 6: Metros perforados antes de fallar por conos descolgados .....	lix
Tabla 7: Metros perforados antes de fallar por rotura de conos.....	lx
Tabla 8: Metros perforados antes de fallar por polines superpuestos.....	lxi
Tabla 9: Metros perforados antes de fallar por insertos rotos .....	lxii
Tabla 10: Metros perforados antes de fallar por faldones desgastados..	lxiii
Tabla 11: Metros perforados antes de fallar por cambio de terreno.....	lxiv
Tabla 12: Características geomecánicas de la UBG .....	lxv
Tabla 13: Variables operativas en mineral .....	lxvi
Tabla 14: Altura de paso (Dp) según los metros perforados por broca ...	lxxi
Tabla 15: Altura de paso, Pulldown y tipo de falla.....	lxxiv
Tabla 16 Metros perforados por brocas antes de fallar por insertos rotos	lxxv
Tabla 17: Metros perforados antes de fallar por conos descolgados ...	lxxvii
Tabla 18: Metros perforados antes de fallar por polines sobrepuestos	lxxviii
Tabla 19: Metros perforados antes de fallar por cambio de terreno.....	lxxix
Tabla 20: Metros perforados antes de fallar por rotura de conos.....	lxxx

Tabla 21: Variables geomecánicas en desmonte.....	lxxx
Tabla 22: Variables operativas para desmonte .....	lxxxii
Tabla 23: Altura de paso, Pulldown y tipo de falla de la broca.....	lxxxv
Tabla 24: Altura de paso y metros perforados por broca. ....	lxxxvi
Tabla 25: Altura de paso, Pulldown y tipo de falla de la broca.....	lxxxix
Tabla 26: Datos para el cálculo de TDC .....	xciii
Tabla 27: Valores geo mecánicos de UBG 3 .....	xciv
Tabla 28: Comparación de Rendimiento de Brocas (Real – Optimo según modelo propuesto).....	xcvi



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: estructura y partes de un tricono.....	xxv
Figura 2: diagrama del ángulo de posición de los conos .....	xxvi
Figura 3: disposición de rodamientos en el cono .....	xxvii
Figura 4: Forma de insertos. ....	xxix
Figura 5: código de identificación de IADC .....	xxx
Figura 6: ejemplo de identificación de un tricono .....	xxxii
Figura 7: desgaste de inserto en brocas triconicas .....	xxxiii
Figura 8: Relación entre la profundidad del taladro y las revoluciones de conos con insertos. ....	xxxiv
Figura 9. Modelo dinámico de triconos. ....	xxxvi
Figura 10: Resistencia al corte de una estructura de superficie plana	xxxviii
Figura 11: resistencia al corte en una estructura rugosa .....	xxxix
Figura 12: Unidades litológicas del tajo.....	xlvi
Figura 13: Propiedades del macizo rocoso presentes en el tajo .....	xlviii
Figura 14: columna estratigráfica .....	xlix
Figura 15: Delimitación de Unidades Básicas Geológicas .....	I
Figura 16: zonificación de UBG tajo en estudio. ....	liii
Figura 17: Frecuencia de rendimiento de brocas triconicas en mineral ..	lviii
Figura 18: Brocas descartadas por conos descolgados.....	lx
Figura 19: Brocas descartadas por rotura de conos .....	lxi

Figura 20: Brocas descartadas por polines superpuestos. ....	lxii
Figura 21: Brocas descartadas por insertos rotos.....	lxiii
Figura 22: Brocas descartadas por faldones desgastados. ....	lxiii
Figura 23: Brocas descartadas por cambio de terreno. ....	lxiv
Figura 24: Relación de empuje promedio y velocidad esperada.....	lxvii
Figura 25: Relación de PD y velocidad esperada .....	lxviii
Figura 26: Relación del PD y metros perforados por las brocas .....	lxix
Figura 27: Altura de paso de insertos en función a los metros perforados por brocas.....	lxxiii
Figura 28: Frecuencia de rendimiento de brocas en desmote .....	lxxv
Figura 29: Brocas descartadas en desmote por rotura de insertos.....	lxxvi
Figura 30: Brocas descartadas en desmote por conos descolgados	lxxviii
Figura 31: Brocas descartadas en desmote por polines superpuestos.	lxxix
Figura 32: Brocas descartadas en desmote por cambio de terreno....	lxxix
Figura 33: Brocas descartadas en desmote por rotura de conos.....	lxxx
Figura 34: Relación entre empuje y velocidad esperada .....	lxxxiii
Figura 35: Relación entre Pulldown y velocidad esperada.....	lxxxiv
Figura 36: metros perforados en desmote y altura de paso. ....	lxxxv
Figura 37: relación entre Pulldown y metraje perforado por broca.....	lxxxv
Figura 38: metros perforados en desmote y altura de paso. ....	lxxxix
Figura 39: Costo vs metros perforados .....	xc

## CAPITULO I

## 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

En la perforación, el costo de accesorios consumibles (que son las partes que tienen un desgaste irreversible durante el trabajo) es significativo para la determinación del costo de operación (OPEX). Según O'Hara mencionado por Ceballos Cabezas, L. M. A. (2019) en su trabajo. "*Modelo empírico para la evaluación económica de un yacimiento a rajo abierto*" (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello). El costo de accesorios de perforación representa el 25% del costo total, sin embargo, como se trata solamente de las brocas el costo es alrededor del 8.33%.

Las brocas triconicas son partes de cambio frecuente en la sarta de perforación, por tanto, la duración de estas determina el costo unitario por metro de los hoyos o taladros. La presente investigación se justifica porque, mediante el análisis estadístico de la eficiencia operativa real de las brocas y los factores de desgaste, se establece el metraje real de cada broca triconicas. Teniendo en cuenta estos factores, así como PDC (Penetration Drill Cost) (\$/m), se puede estimar el rendimiento de futuras brocas a usar, y ajustar el presupuesto real de una empresa, así mismo este modelo nos indicará si las características técnicas de la broca son las que corresponden a la Unidad Geotécnica Básica a perforar.

### 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo general

Establecer un modelo predictivo que explique la eficiencia operativa de las brocas triconicas en campo y estimar el rendimiento de las siguientes brocas en operación.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la eficiencia operativa de las brocas triconicas relacionando el tiempo de desgaste de los insertos en función a la competencia del macizo rocoso evaluado para cada unidad geotécnica básica (UGB) donde trabajan las perforadoras.
- Determinar la eficiencia operativa de las brocas triconicas comparando variables operacionales teóricas, como velocidad de penetración efectiva y tiempo de ciclo efectivo, con los resultados en campo. Se incluye la evaluación estadística de la habilidad del perforista.
- Establecer un modelo para predecir y maximizar la eficiencia operativa de las brocas tricónicas en un yacimiento tipo pórfido cobre y molibdeno.

### 1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

#### 1.3.1. Pregunta Global

¿Cómo establecer un modelo predictivo que explique eficiencia operativa de las brocas triconicas aplicado a la perforación rotativa?

#### 1.3.2. Preguntas Especificas

- 1) ¿Cómo determinar eficiencia operativa de las brocas triconicas en función a la unidad geotécnica básica (UGB)?
- 2) ¿Cómo determinar eficiencia operativa de las brocas triconicas en función a las variables operacionales?
- 3) ¿Cómo establecer un modelo predictivo para las próximas brocas en operación en un yacimiento tipo pórfido cobre y molibdeno?

### 1.4. LINEA DE INVESTIGACIÓN

Optimización de procesos Mineros.

## CAPITULO II

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Estado del Arte

Las dos razones principales para el desgaste de las brocas triconicas son: El efecto de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, que influye directamente sobre el desgaste de los insertos (bit) y la estructura de la broca (faldones y conos) produciendo un adelgazamiento en la broca, por efecto del giro y la vibración durante la operación que es producto de la fuerza aplicada sobre la sarta de perforación y el giro de la broca, determinando el desgaste de los triconos.

El efecto de este desgaste determina, que el ratio de penetración (RP) en metros por minuto, hace que disminuya la eficiencia operativa de la broca. (Rafezi, H., & Hassani, F., 2021). En un nivel microscópico, el efecto de la composición de la roca sobre el desgaste de los insertos o el daño a los insertos se produce en la estructura de la aleación (en este caso carburo de tungsteno) y está relacionado básicamente a la presión y temperatura a la que trabaja la broca, por esta razón varia en cada zona estudiada.

Existe una condición donde el daño presentado es mayor, se debe a la presencia de sílice (Si) que puede reaccionar para convertirse di-siliciouro de cobalto ( $\text{CoSi}_2$ ) (Jones, H. G., et al. ,2017). Este fenómeno es estudiado por la triboquímica, esta es la razón por la que la roca se convierte en altamente abrasiva, lo que explica que cuando existe cantidades importantes de Sílice o Cuarzo, la roca es abrasiva acelerando el desgaste de los insertos por el cambio químico producido por el rozamiento (triboquímica).

La “perforabilidad”, o capacidad de penetrar con los triconos en cada tipo de macizo rocoso, es un índice importante para el evaluar las operaciones y el costo de perforación. Existe una relación directa entre el rendimiento de la maquina y desgaste de los insertos producido por las características geomecánicas del macizo rocoso. Las variables que más explican este desgaste son: La resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_1$ ), la resistencia a la tensión ( $\tau$ ) y el índice de carga.

Además, siempre se debe considerar los aspectos geológicos específicos como: Las discontinuidades, el espaciamiento entre juntas, la orientación de las juntas, el relleno de las juntas, el grado de alteración, las condiciones de agua en la roca y esfuerzos in situ. (Zhang, G., et.al 2022).

La evaluación del desgaste de los triconos mediante fotografías es fundamental porque se puede llegar a explicar que la presión ejercida por el tricono va disminuyendo debido al desgaste y está en relación es lineal a la disminución del área superficial de la broca, es decir, que disminuye el diámetro de perforación. Se considera que el desgaste crítico se da en los faldones y conos (matriz de la broca).

Es difícil establecer un punto crítico del desgaste porque no se puede tomar fotografías permanentemente durante la perforación. El procedimiento de evaluación por imágenes es importante porque se puede establecer un algoritmo que evalúe el grado de desgaste de las brocas para tomar decisiones sobre su cambio. (Saeidi, O., et al. 2014).

Durante las operaciones de perforación se utilizan varios tipos de brocas triconicas debido a su eficiencia y durabilidad. La fabricación de la broca tiene un papel importante en la resistencia al desgaste, el tipo de roca que se perfora tiene una gran influencia en la broca. Cuando se produce una pérdida de filo que incluye los insertos y el cojinete.

En las brocas triconicas o de cono giratorio, los insertos se dividen en dos tipos principales; brocas de dientes fresados o de acero y brocas de carburo de tungsteno (TC) o de inserción. El desgaste de la broca comienza directamente después de comenzar a perforar debido a las características abrasivas de la roca que se está perforando, lo que reduce los metros perforados por la broca (Rafid K. Abbas, et al, 2020).

Los modelos de predicción del rendimiento de perforación se dividen generalmente en dos categorías: modelos de predicción basados en la física y basados en datos. Los modelos basados en la física, o modelos tradicionales, usan correlaciones empíricas para modelar el desempeño de la perforación. Estos modelos

normalmente presentan constantes en sus ecuaciones que deben calibrarse mediante pruebas de perforación. Por otro lado, los modelos de predicción basados en datos necesitan conjuntos de datos de perforación históricos para entrenar sus algoritmos para predecir el rendimiento de perforación mediante aprendizaje automático, redes neuronales o ambos. (Jeronimo de Moura, et al, 2021).

## 2.2. Unidades geotécnicas básicas

SKR consulting (2021), menciona que para determinar la competencia en cada dominio geo mecánico de la mina se usa el criterio planteado por Hoek-Brown (Hoek et al.,1997), que define la resistencia del macizo rocoso de la siguiente forma:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[ mb * \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right) + S \right]^a \quad (1)$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor,  $m_i$  es un parámetro que está asociado a la pendiente de la envolvente de falla de la roca intacta,  $\sigma_{ci}$  es la resistencia en comprensión uniaxial de la roca intacta, GSI es el índice de resistencia geológica del macizo rocoso propuesto por Hoek (1997).

El valor de roca  $m_b$  se puede calcular por.

$$m_b = m_i * e^{\left( \frac{GSI-100}{28} \right)} \quad (2)$$

Para los valores de S y a, dependen del GSI entonces si el GSI >25

$$S = e^{\frac{GSI-100}{9}} \quad (3)$$

$$a = 0.5 \quad (4)$$

Si GSI < 25

$$S = 0 \quad (5)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (6)$$

Se determinaron los valores equivalentes de la cohesión y ángulo de fricción, considerando una envolvente de Mohr-Coulomb para esfuerzos de confinamiento correspondientes a  $\sigma_3 > 2$  MPa y un factor de daño por voladura,  $D = 0.7$ . El módulo de deformabilidad del macizo rocoso ( $E$ ) se determinó de acuerdo con la siguiente expresión (Hoek & Diederichs, 2006):

$$E = E_i \left[ 0.02 + (1 - (D/2)) / \left( 1 + e^{\left( \frac{60+15D-GSI}{11} \right)} \right) \right] \quad (7)$$

La razón de Poisson del macizo rocoso  $\nu$  se determinó de acuerdo con la siguiente expresión (Hoek, Karzulovic, 2000):

$$\nu = 0.40 - 0.01 \times GSI^{0.7} \quad (8)$$

### 2.3. Índices operacionales de perforación

La perforación rotativa en mina utiliza triconos como elementos de corte. Los índices operacionales de perforación son: Empuje sobre la broca (E), Pull down (PD), velocidad de giro (N), velocidad de penetración específica (VP), y velocidad media (VM) (Bauer, A, 1971, et al).

### 2.3.1. Empuje

Según, DE LINAN, C. A. C., (1994). Existen dos tipos de empuje el mínimo ( $E_{min}$ ), indica cuando las brocas tricónicas no pueden vencer la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso, y el empuje máximo ( $E_{max.}$ ) que indica que los insertos del tricono se romperán. El empuje aplicado a la perforación debe ser el promedio, es decir la suma del  $E_{min}$  más el doble del  $E_{max.}$  Se determina multiplicando una constante (28,5) el diámetro del taladro (D, en pulgadas) y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS, en Mpa), el empuje promedio se da en libras (lb). Si aplicamos las fórmulas propuestas DE LINAN, C. A. C. (1994). Podemos determinar la siguiente formula empírica expresada en kg.

$$E_{prom}(kg) = \left[ \frac{3}{2} (28.5 * \sigma_{ci} * D) \right] * 0.4536 \quad (9)$$

### 2.3.2. Pulldown.

El “pulldown” (PD) o presión axial ejercida sobre el área de la broca, que se determina función al radio (r), (la mitad del diámetro) de la broca.

$$PD (Mpa) = \left( \frac{E_{prom.}}{(\pi r)^2} \right) \quad (10)$$

### 2.3.3. Velocidad de Giro (N), Velocidad de penetración (VP) y Velocidad media (VM)

Las fórmulas deducidas a continuación se basan en las propuestas por A. Bauer (1971) y DE LINAN, C. A. C. (1994). La velocidad de giro está relacionada a la resistencia a la compresión simple (UCS) y tiene un rango de entre 35 RPM para rocas con UCS~ 250 MPa y 160 RPM para rocas de UCS~55 MPa. Se puede calcular con la siguiente expresión:

$$N(\text{rpm}) = \frac{250 \cdot 35}{\sigma_{ci}} \quad (11)$$

El ratio de penetración o velocidad específica de penetración, es aquella que no considera las operaciones unitarias como. movimiento de la perforadora para cambiar de punto de perforación y cambio de barras o brocas. Se calcula mediante la formula (D es en mm):

$$VP \left( \frac{m}{\text{hra}} \right) = \frac{63.9 \cdot E_{prom} \cdot N}{\sigma_{ci}^2 \cdot D^{0.9}} \quad (12)$$

En las operaciones reales se debe considerar todas las demoras operativas de la perforadora, entonces la ecuación 12 se debe corregir por:

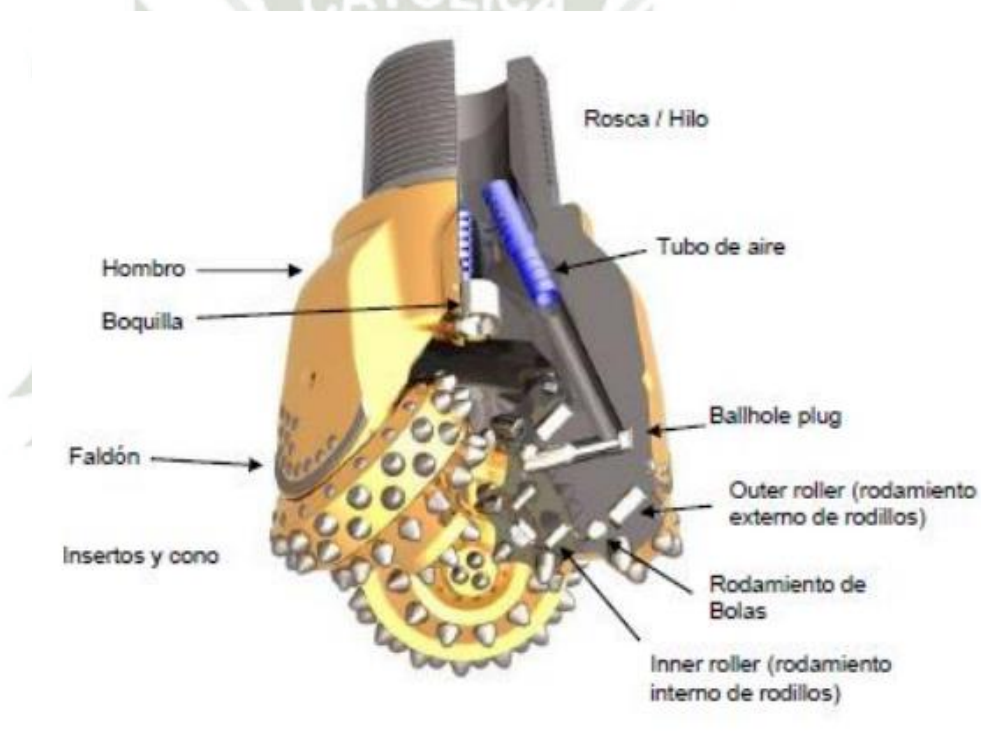
$$VM \left( \frac{m}{\text{hr}} \right) = (2 * VP)^{0.65} \quad (13)$$

#### 2.4. Triconos

Los elementos de corte o brocas que se usan para la perforación rotativa en bancos altos son los triconos, los conos son los elementos cortantes que están

dispuestos en una estructura llamada Faldón, tiene seis filas de insertos y un sistema de enfriamiento por aire, se mueven independientemente porque tienen cojinetes de cilindros y bolas. El hombro del tricono sirve para crear un espacio donde se depositan los detritus (pequeños trozos de roca) para ser evacuados por el aire comprimido que ingresa por el medio de la sarta de perforación. En la figura 1 se muestra la estructura y partes de un tricono.

Figura 1: estructura y partes de un tricono



Nota: tomado de INACAP apuntes de perforación mina.

#### 2.4.1. Proceso de corte perforación con triconos

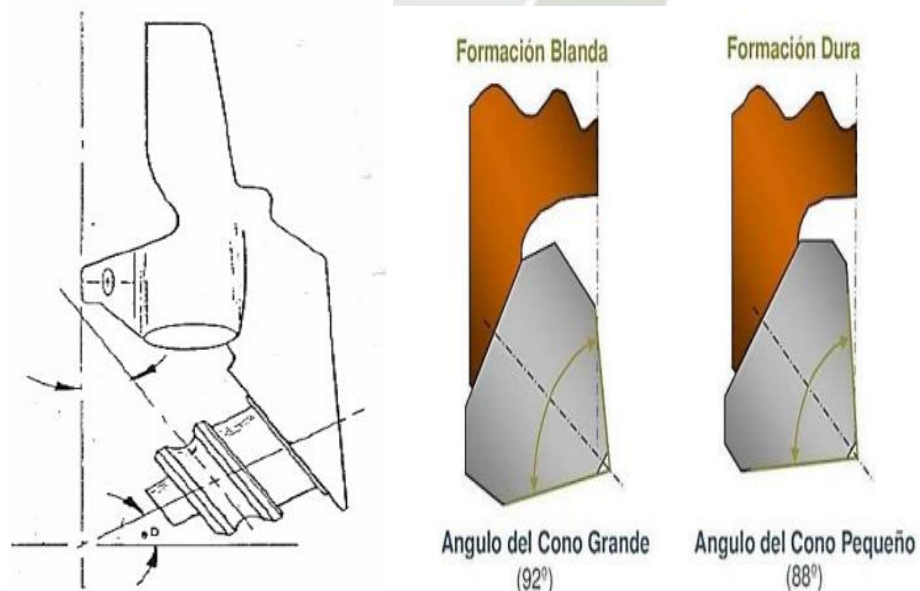
Los triconos actúan sobre el macizo rocoso debido al empuje generado por la sarta de perforación, estos logran el escareo debido a dos acciones de los insertos. La primera es la incrustación (“indentación”) del inserto en

el macizo rocoso que produce fracturas axiales y luego el corte, debido al giro del cono.

#### 2.4.2. Criterios de selección de triconos

Las partes principales son los conos, que están colocados en el faldón de la broca y tienen un sistema de rodamientos que permiten el giro independiente al de la sarta de perforación. Para generar el corte los conos están dispuestos en un ángulo con respecto al eje de la broca, Este ángulo depende de la dureza de la roca a perforar y puede ser de  $92^\circ$  para conos grandes y  $88^\circ$  para conos pequeños.

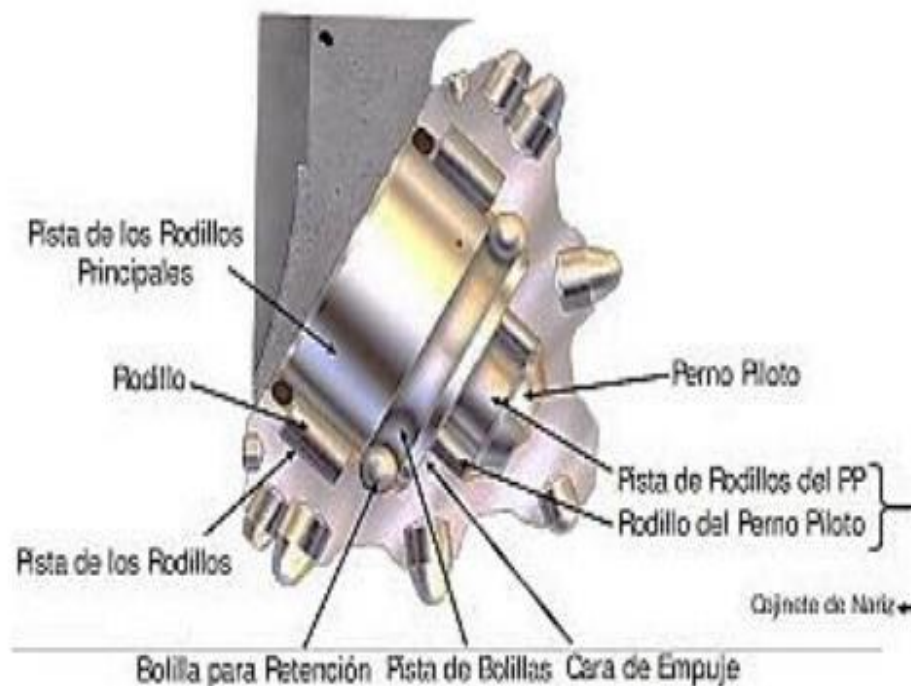
Figura 2: diagrama del ángulo de posición de los conos



*Nota: Tomado de INACAP, apuntes de perforación mina.*

La pista de rodamientos se encuentra en el Faldón y es una estructura rígida donde se colocan los conos. El cojinete está compuesto de dos tipos de rodamientos, en la parte central tiene un rodamiento de bolas, y en la parte superior e inferior son rodamientos de cilindros, esto sirve para soportar el empuje sobre los conos.

Figura 3: disposición de rodamientos en el cono



Nota: Tomado de INACAP, apune de perforación mina.

### 2.4.3. Aleaciones para brocas tricónicas

Las partes de una broca tricónica se fabrican en diferentes aleaciones metálicas, el tipo de aleación depende de las propiedades físicas requeridas por el elemento que está en función a las características geológicas y geomecánicas del macizo a perforar. En la tabla siguiente se muestra el elemento del cono, la aleación y propiedad requerida.

*Tabla 1: Aleaciones para triconos*

Parte de la broca	Tipo de acero (metales en la aleación)	propiedad
Cono	C, Mn, Ni y Mo	Resistencia impacto
Cabezas	C, Mn, Cr y Mo	abrasión Resistencia fatiga impacto
Cojinetes	C, Mn, Ni, Cr y Mo	Resistencia impacto
Bujes	C, Mn, Ni, Cr y Si	Resistencia desgaste
Insertos	C, W y Co	Resistencia impacto abrasión

*Nota: Elaborado en base a los apuntes de perforación mina de INACAP.*

#### 2.4.4. Tipos de insertos

La selección de los insertos es en función a la resistencia a la compresión uniaxial de la roca (UCS), se considera una roca suave entre 75-125 MPa. roca media entre 126-200 MPa y roca dura  $>201$  MPa. la forma del inserto también es importante. En la siguiente figura se aprecia las formas de insertos.

Figura 4: Forma de insertos.



- A. Inserto de carburo de tungsteno de diente largo.
- B. Inserto de carburo de tungsteno en forma de diente.
- C. Inserto de carburo de tungsteno de forma cónica.
- D. Inserto de carburo de tungsteno de forma oval.

*Nota: Tomado de INACAP, apune de perforación mina*

#### 2.4.5. Identificación de triconos

Para identificar el tipo de tricono y las aleaciones de sus partes, se usa el código propuesto por la Asociación internacional de Contratistas en perforación (IADC). Este se divide en el tipo de dientes, acero o insertos,

la formación rocosa donde se aplica, muy blandas, blandas, medias y duras; la dureza; suave, medio suave, medio dura, medio dura y dura, el sistema de rodamiento y toberas.

En la siguiente figura se ve la codificación internacional de los triconos.

*Figura 5: código de identificación de IADC*



	1er Dígito	2do Dígito	3er Dígito										
			Sistema de Corte	Dureza	Sistema de rodamiento								
					1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dientes de Acero	1	Dientes de acero para formación blanda	1 Suave	T	O	P	B	B	C	C	P	O	
			2 Media Suave	O	B	R	A	L	H	H	A	A	
			3 Media Dura	B	E	O	L	U	U	M	M	A	R
			4 Dura	E	R	T	E	M	A	C	C	E	R
	2	Dientes de acero para formación media	1 Suave	A	S	C	S	E	R	E	R	P	
			2 Media Suave	S	A	I	S	E	R	A	R	E	
			3 Media Dura	P	A	Ó	S	E	R	A	R	E	
			4 Dura	A	R	N	S	E	L	S	E	L	
	3	Dientes de acero para formación dura	1 Suave	L	O	A	A	D	O	L	L	A	
			2 Media Suave	O	D	L	L	O	L	L	L	L	
			3 Media Dura	L	O	L	L	O	L	L	L	L	
			4 Dura	O	D	L	L	O	L	L	L	L	
Dientes de Insertos	4	Dientes de inserto para formación muy blanda	1 Suave	Y	Y	I	P						
			2 Media Suave	B	B	B	P						
			3 Media Dura	A	A	R	R						
			4 Dura	L	L	E	R						
	5	Dientes de inserto para formación blanda	1 Suave	E	S	T	A	N	D	A	R		
			2 Media Suave	B	A	L	E	R	O	S			
			3 Media Dura	E	S	T	A	N	D	A	R		
			4 Dura	B	A	L	E	R	O	S			
	6	Dientes de inserto para formación media	1 Suave	E	S	T	A	N	D	A	R		
				B	A	L	E	R	O	S			
				E	S	T	A	N	D	A	R		
				B	A	L	E	R	O	S			
7	Dientes de inserto para formación dura	1 Suave	E	S	T	A	N	D	A	R			
		2 Media Suave	B	A	L	E	R	O	S				
		3 Media dura	E	S	T	A	N	D	A	R			
		4 Dura	B	A	L	E	R	O	S				
8	Dientes de inserto para formación extra dura	1 Suave	E	S	T	A	N	D	A	R			
		2 Media Suave	B	A	L	E	R	O	S				
		3 Media dura	E	S	T	A	N	D	A	R			
		4 Dura	B	A	L	E	R	O	S				

Nota: Tomado de INACAP, apuntes de perforación mina.

Un ejemplo de interpretación del código del IADC se muestra en la siguiente figura:

Figura 6: ejemplo de identificación de un tricono

**7 21 G**

Serie de Estructura de Corte		Tipo de Estructura de Corte (1 a 4)	Descripción de Cojinetes	Características Disponibles (Opcional)
STEEL TOOTH BITS	Soft Formations with Low Compressive Strength and High Drillability	1	Standard Roller Bearing	A - Air Application
	Medium to Medium Hard Formations with High Compressive Strength	2	Roller Bearing Air Cooled	B - Special Bearing Seal
	Hard Semi-Abrasiva and Abrasive Formations	3	Roller Bearing Gauge Protected	C - Center Jet
INSERT BITS	Soft Formations with Low Compressive Strength and High Drillability	4	Sealed Roller Bearing	D - Deviation Control
	Soft to Medium Formations with Low Compressive Strength	5	Sealed Roller Brg - Gauge Protected	E - Extended Nozzles
	Medium Hard Formations with High Compressive Strength	6	Sealed Friction Bearing	G - Gauge/Body Protection
	Hard Semi-Abrasiva and Abrasive Formations	7	Sealed Friction Brg Gauge Protected	H - Horizontal Steering Appl.
	Extremely Hard and Abrasive Formations	8		J - Jet Deflection

1 se refiere a la formación más blanda en una serie particular y 4 se refiere a la formación más dura dentro de la misma serie.

L - Lug Pads  
M - Motor Application  
S - Standard Steel Tooth  
T - Two Cone Bit  
W - Enhanced Cutting Structure  
X - Predominantly Chisel Tooth Insert  
Y - Conical Tooth Insert  
Z - Other Shape Insert

Nota: tomado de INACAP, apuntes de perforación mina

## 2.5. Desgaste de brocas triconicas

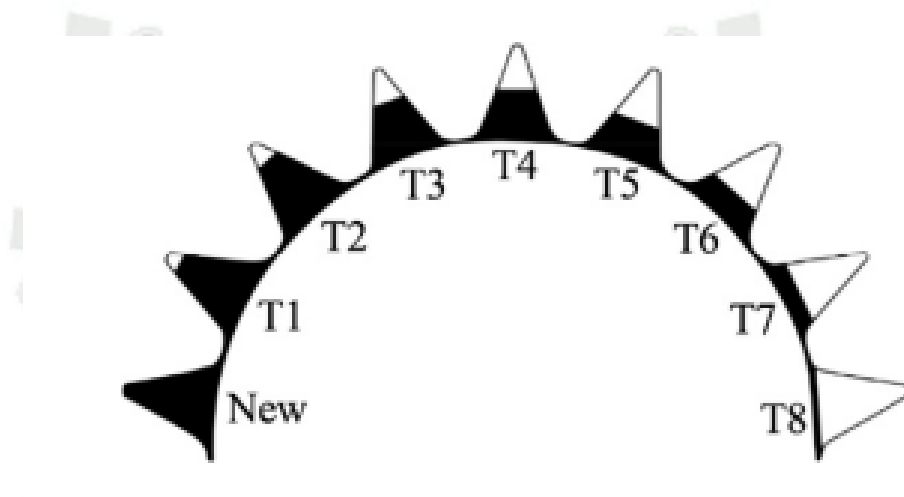
El desgaste de las brocas triconicas se debe a que, durante la perforación los detritus causan cambios en las partes internas y externas de la broca.

### 2.5.1. Desgaste de insertos

La medición del desgaste de los insertos se basa en clasificar 8 niveles del tamaño del inserto de acuerdo con lo establecido por la asociación

internacional de contratista de perforación (Halliburton. IADC, 2009). La figura muestra los ocho niveles de desgaste de los insertos.

*Figura 7: desgaste de inserto en brocas triconicas*



*Nota: Tomado de: Hamed Rafezi, Ferri Hassani, Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring (2021)*

### 2.5.2. Falla en los cojinetes

La falla en los cojinetes o rodajes del cono se debe al exceso en la presión de la broca (pull-down), a vibraciones que causan torsión, a la incorrecta selección de los insertos en función al macizo rocoso o mala operación durante la perforación. El riesgo de una falla en los rodamientos es que estos se desprendan del faldón de broca triconica, causando un mayor problema. (Hamed Rafezi, Ferri Hassani, 2021).

### 2.5.3. Indentación

Es la penetración de los insertos en el macizo rocoso que produce fracturas radiales, luego los conos giran y levantan pequeños trozos de roca llamados “detritus”.

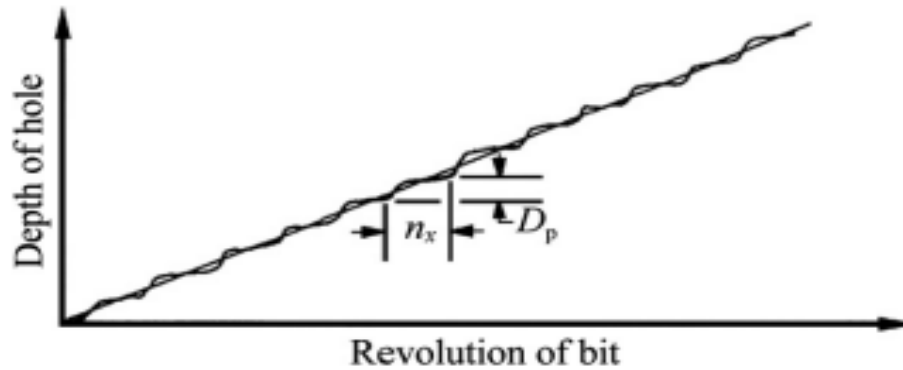
La altura del inserto que penetra en la roca define la profundidad media del cráter y se denomina altura de paso ( $Dp$ ), puede ser calculada relacionando la velocidad media o ratio de penetración en m/hr. ( $VM$ ) por el número de rotaciones del cono-insertos ( $nx$ ) entre la velocidad de rotación en RPM ( $N$ ).

$$Dp = \frac{VM * nx}{N} \quad (14)$$

Cuando sucede la indentación se produce vibraciones axiales que dañan al cono e insertos.

El daño de estos se incrementa cuando es mayor profundidad del taladro debido a que se incrementa las revoluciones de los conos.

*Figura 8: Relación entre la profundidad del taladro y las revoluciones de conos con insertos.*



*Nota: Tomado de Hamed Rafezi, Ferri Hassani, Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring (2021)*

#### 2.5.4. Modelo de interacción macizo rocoso-broca tricónica

Sheppard MC, Lesage M. (1988) propusieron un modelo que explica el desgaste de los insertos en función al macizo rocoso. Los autores asumieron que en un instante un solo inserto, de toda la fila de insertos del cono, penetra en el macizo rocoso. Afirman también que la presión axial sobre el barrenado se distribuye en todas las filas de insertos del cono. En las pruebas realizadas donde midieron el torque y las fuerzas ejercidas en cada fila de insertos demostraron que la velocidad de rotación del cono ( $n_x$ ) está en un rango de 1.25 -1.31 veces que la velocidad de giro (N) de la broca.

Las fuerzas axiales en las filas de conos pueden ser calculadas aproximadamente por las siguientes ecuaciones (Poletto F, Miranda F. 2014).  $F(t)$  es la fuerza axial en un tiempo sobre los insertos,  $F_m$  y  $F_0$  la medida de las fuerzas dinámicas sobre el inserto y el cono

respectivamente,  $\varnothing_{row}$  velocidad angular del cono y  $F_{max}$ ,  $F_{min}$  la fuerza máxima y mínima aplicada sobre la fila de insertos.

$$F(t) \approx F_m + F_0 \sin \varnothing_{row} t \quad (15)$$

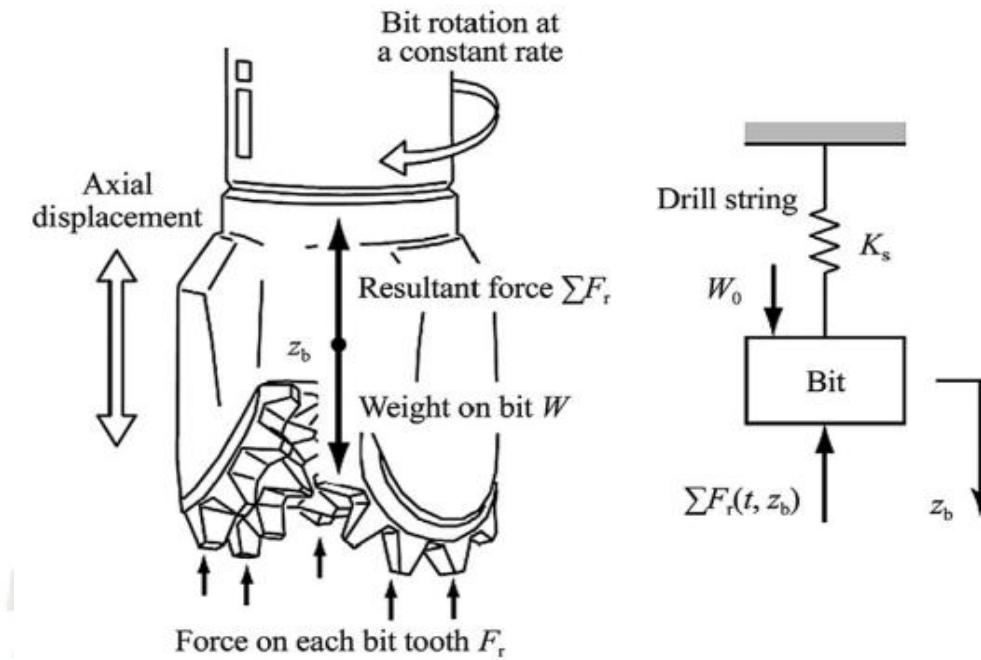
$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (16)$$

$$F_0 = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \quad (17)$$

Las fuerzas se deducen de la ecuación (9) para el cálculo de empuje (Eprom), entonces  $F_{min} = E_{prom}/2$  y  $F_{max} = 2E_{prom}$

Un modelo dinámico para los tricónos fue propuesto por Naganawa (2012). En este trabajo se propuso una ecuación para relacionar el peso de la sarta de perforación ejercido sobre el tricóno ( $W_o$ ) y los componentes dinámicos que se producen por este peso sobre el inserto (Weight Over Bit, WOB), con las fuerzas que el macizo rocoso ejerce ( $F_{r,ijk}$ ). Donde el subfijo k es el número de insertos en una fila del cono, el sub fijo i el cono donde está el inserto y sub fijo j el número de conos. En la siguiente figura se esquematiza los componentes del modelo propuesto.

*Figura 9. Modelo dinámico de tricónos.*



*Nota: Tomado de Naganawa S. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration.*

Si se asume que el WOB se ejerce en un medio elástico donde existe grado de deformación  $K_s$ ,  $W_0$  el peso estático sobre la broca,  $Z_b$  representa del movimiento axial de la broca,  $Z_b'$  es la posición de equilibrio donde no se ejercen las fuerzas dinámicas, la ecuación del movimiento se expresa como:

$$W_0 - K_s (Z_b - Z_b') - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{nr;i} \sum_{k=1}^{nt,ij} F_{r,ijk} = 0 \quad (18)$$

## 2.6. Antecedentes

La perforación en yacimientos mineros inicia el proceso de producción de minerales y metales.

En métodos a cielo abierto con bancos altos, se realiza con perforadoras rotativas. Estas ejercen un empuje y giro sobre la sarta de perforación (barra-estabilizador-broca triconica), logrando cortar la superficie del macizo rocoso para formar un hoyo o taladro que sirve cargar el explosivo.

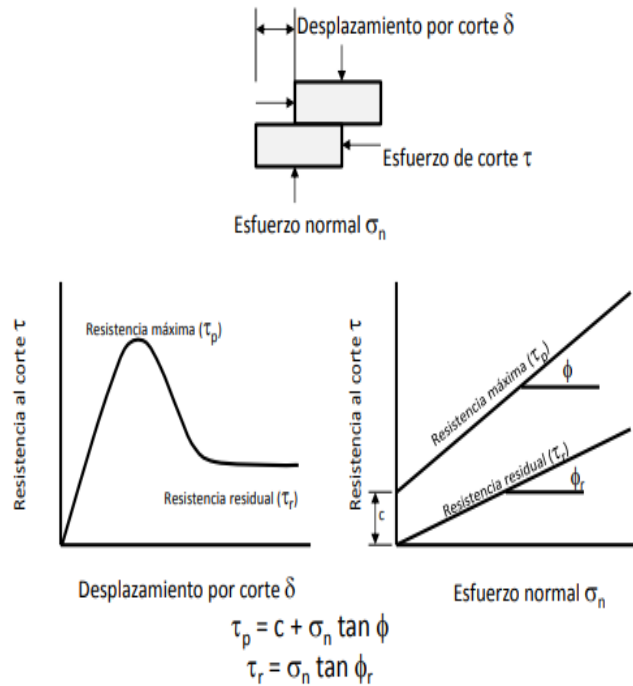
Los insertos de las brocas triconicas, tiene tres conos con seis filas de insertos (bit) de aleaciones extrafuertes, básicamente Carburo de Tungsteno, son los elementos de corte en la sarta de perforación, se diseñan en función a la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de deformabilidad de la roca (Deere & Miller 1966).

Las pruebas de duración de los insertos se realizan en laboratorio, en un ensayo de corte directo a un plano de medio de falla según el criterio de Patton (1966).

En la figura 10 se muestra el comportamiento teórico de una estructura de superficie plana, sometida a un esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y un esfuerzo de corte ( $\tau$ ) que genera un desplazamiento de corte ( $\delta$ ).

La estructura desarrolla una resistencia máxima y una resistencia residual que permite estimar la cohesión ( $c$ ) y el ángulo de fricción ( $\phi$ ) para ambos estados. (Patton 1966).

*Figura 10: Resistencia al corte de una estructura de superficie plana*

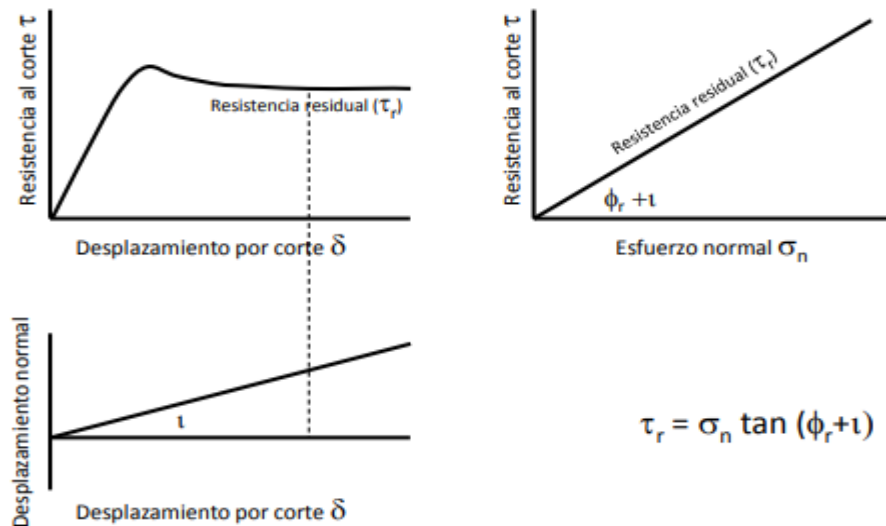
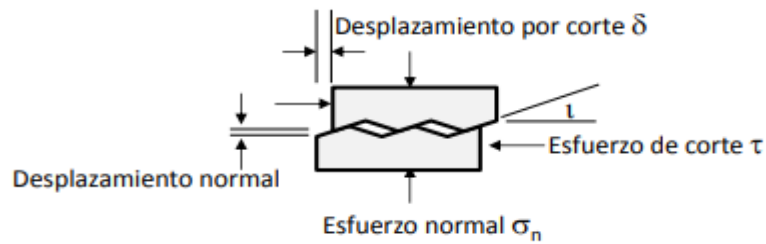


*Nota: Tomado de informe de SRK Consulting: N° 01-1086-04: Estudio Geotécnico Plan de 15 años, Tajo*

En la corteza terrestre, el corte a se produce en una superficie rugosa por lo cual se modela el efecto de rugosidad aplicando un “ángulo de dilatancia”. (Patton 1966).

En la figura 11 se muestra el esquema del criterio de Patton (1966) que modela la ondulación y/o rugosidad a través de un ángulo de dilatancia ( $i$ ). Se presenta la forma de medición de “ $i$ ”, su efecto sobre la resistencia al corte de una estructura y la expresión del criterio de corte.

*Figura 11: resistencia al corte en una estructura rugosa*



*Nota: Tomado de informe de SRK Consulting: N° 01-1086-04: Estudio Geotécnico Plan de 15 años, Tajo*

La elección de los insertos de tricono, se determinan de acuerdo con las características geotécnicas de las áreas a perforar, también llamadas dominios geo mecánicos o unidades geotécnicas básicas (UGB).

La eficiencia operativa de la broca puede variar por distintos factores, como la habilidad del operador en las perforadoras rotativas, el macizo rocoso de la malla de perforación, o el diseño del tricono, sin embargo, si se estima una relación entre estos factores se podrá predecir el rendimiento de futuras brocas a usar, y ajustar un presupuesto real para el área de Perforación.

## 2.7. Hipótesis

Si las características geológicas-geomecánicas del macizo rocoso determinan la eficiencia operativa de las brocas tricónicas entonces, en función al desgaste real, se puede predecir las características técnicas de brocas triconicas a usar en cada unidad básica geológica.

## 2.8. Variables

### 2.8.1. Variable independiente

- Eficiencia operativa promedio de la broca (mp)

### 2.8.2. Variables dependientes

- Unidades geotécnicas Básicas (UGB)
- Factores operacionales de perforación (FO)
- Habilidad del perforista (HP).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Alcances y Limitaciones

##### 3.1.1. Alcance

La investigación es operativa y abarca todas las áreas de perforación en bancos de producción dentro del Pit. Existen áreas de mineral y áreas de desmonte donde varían los diámetros de las brocas (10 5/8 pulgadas para el mineral; 12 1/4 pulgadas para el desmonte). Se realiza para todas las condiciones geológicas y geotécnicas del tajo en estudio.

##### 3.1.2. Limitaciones

La información base para esta investigación, se recolectó en un yacimiento tipo pórfido cobre y molibdeno, con carácter educativo y con fines de investigación. Esta se limitará únicamente al área de Perforación de producción (perforación rotativa).

Las limitaciones de la investigación están referidas a que se realiza en un yacimiento tipo pórfido donde la competencia de las unidades básicas geotécnicas (UBG) está relacionadas a los tipos de alteración del yacimiento. Para otro tipo de yacimientos debe ser evaluada con condiciones geotécnicas y geológicas específicas.

## 3.2. Tipo y diseño de la Investigación

### 3.2.1. Tipo de Investigación

La presente investigación es aplicada porque quiere analizar el problema del desgaste de brocas en campo, determinar la relación entre el desgaste o falla de los componentes de las brocas (insertos, conos y polines) y determinar estadísticamente la correlación entre los factores de desgaste y las brocas.

### 3.2.2. Nivel de Investigación

Esta investigación corresponde a un nivel correlacional ya que tiene como objetivo el análisis de distintas variables.

## 3.3. Población y muestra

Para el estudio se tomaron datos diarios de enero- marzo de 2021, en cinco unidades geotécnicas básicas (UGB) (litología: Latita, Andesita basáltica, Andesita intrusiva, Riolita porfírica y Brecha basáltica), 6 perforadoras rotativas (modelos P&H 2800XPB, P&H 4100A, Bucyrus 495 y P&H 4100XPC), dos marcas de triconos: Varel, (modelos RB 53,60 y 67) y CENERG (modelo CN 70).

Las brocas que se usan representan la población, que se puede considerar infinita; entonces el tamaño de muestra ( $n$ ) se calcula con la siguiente fórmula:

$$n = Z^2 * s^2 / p$$

En la investigación, el Z corresponde a 1.96, para un nivel de confianza del 95%, s, la desviación estándar, 1.19 y la p el error en la toma de muestras 0.05 por lo que nos sale una muestra de 109 brocas para el estudio.

### **3.4. Ubicación de la Investigación**

La investigación se realizó en el distrito de Torata, ubicada en el departamento de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto a 3430 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas son 17° 1' 53" S, 70°42'34" W. su posición UTM (Universal Transverse Mercator) es CB11 y su referencia JOG (Joint Operation Graphics) SE19-05.

#### **3.4.1. Descripción geológica general**

El yacimiento es un pórfido de cobre (Cu) y Molibdeno (Mo), con tipos de rocas volcánicas pertenecientes al periodo Cretácico superior y Cuaternario, la antigüedad estimada de formación es de 23 millones de años.

El depósito tiene 50 tipos litológicos donde se incluyen las rocas encajonantes que son básicamente Andesita Basáltica, Riolíta Porfírica, Doloritas y rocas intrusivas que incluyen Dioritas, Latitas porfíricas, Brechas y Diques.

La mineralogía principal está distribuida en los minerales de Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) que son los minerales mena.

El perfil litológico completo fue estudiado SKR consulting (2021) y sus resultados se muestra en la siguiente figura.



Figura 12: Unidades litológicas del tajo.

LITO	CÓDIGOS	LITOLÓGIA	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS			NUEVA UG	%													
					LITO	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN															
1	LP	LATITA PORFIRITICA	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	LATITA	FRESCA-FILICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 1	6.1								
	BLP	LATITA PORFIRITICA ESTERIL									POTASICA	PRIMARIO	UGB 2	2.0								
	DK	DIQUE DE LATITA PORFIRITICA									FILICA-ARGILICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 3	0.3								
	LP3	LATITA PORFIRITICA LP3									ARGILICA	OX-LIX-ENR-TRANS	UGB 4	0.9								
2	RP	RIOLITA PORFIRITICA	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	RIOLITA PORFIRITICA	PROPLITICA-PRO.FILICA	WASTE	UGB 5	7.8									
3	BA	ANDESITA BASALTICA								PROPLITICA-FILICA_POTASICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 6	1.1									
4	IA	ANDESITA INTRUSIVA								FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	ANDESITA BASÁLTICA	POTASICA	PRIMARIO	UGB 7	3.6	
	DI	DIORITA																PROPLITICA	WASTE	UGB 8	64.7	
	DO	DOLERITA	FILICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 9	1.6																
	BX-IA	BRECHA DE ANDESITA INTRUSIVA	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)									OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	BRECHA DE ANDESITA	WASTE	UGB 11	0.0
	BX-BLP	BRECHA DE BLP																		PRIMARIO	UGB 12	0.2
	BX-RP	BRECHA DE RIOLITA PORFIRITICA																		TOBA INFERIOR	-	UGB 13
BX-BA	BRECHA DE ANDESITA BASALTICA	TOBA CRISTAL								-	UGB 14	1.4										
PX	PEBBLE BRECHA	CONGLOMERADO								-	UGB 15	0.3										
BX-LP	BRECHA DE LATITA PORFIRITICA	TRAQUITA (TOBA)								-	UGB 16	3.1										
5	BXT	BRECHA TURMALINA	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	TOBA BLANCA	-	UGB 17	0.3								
	PA	ANDESITA PORFIRITICA										TOBA SALMÓN	-	UGB 18	0.3							
	AS	AGLOMERADO SUPERIOR										VITROFIRO	-	UGB 19	0.0							
	AI	AGLOMERADO INFERIOR										OTROS	OX-LIX-ENR-TRANS	UGB 20	1.0							
	TS	TOBA SUPERIOR										COBERTURA	-	COVER + BOTADERO	UGB 21	2.6						
	TI	TOBA INFERIOR																				
6	PA	ANDESITA PORFIRITICA	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	TOBA CAFÉ	-	-	-								
	TBM	TOBA MICÁCEA										-	-	-								
	CB	CONGLOMERADO BASAL										-	-	-								
	TBC	TOBA CAFÉ										-	-	-								
7	TC	TOBA CRISTAL	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	CONGLOMERADO RIOLITICO	-	-	-								
	TBM	TOBA MICÁCEA										-	-	-								
8	CB	CONGLOMERADO BASAL	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	TOBA TRAQUITICA	-	-	-								
	TBC	TOBA CAFÉ										-	-	-								
	CR	CONGLOMERADO RIOLITICO										-	-	-								
	TR	TRAQUITA										-	-	-								
9	TR	TRAQUITA	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	TOBA TRAQUITICA	-	-	-								
	TBTR	TOBA TRAQUITICA										-	-	-								
10	AT	AGLOMERADO TOBÁCEO	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	AGLOMERADO TOBÁCEO	-	-	-								
	AG	AGLOMERADO GRIS										-	-	-								
	TB	TOBA BLANCA										-	-	-								
	CA/CV	CONG. AMARILLO/CONG. VERDE										-	-	-								
	AGTR	AGLOMERADO TRAQUITICO										-	-	-								
	CTR	CONGLOMERADO TRAQUITICO										-	-	-								
	TRE	TOBA RETRABAJADA										-	-	-								
	AB	AGLOMERADO BLANCO										-	-	-								
11	TSA	TOBA SALMÓN	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	TOBA SALMÓN	-	-	-								
	VT	VITROFIRO										-	-	-								
12	VT	VITROFIRO	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	VITROFIRO	-	-	-								
	AL	ALUVIAL										-	-	-								
13	STOKm	STOCK MRAL	CONGLOMERADO	FILICA (Silice, Sericita, Pirita)	FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	FILICO PROPILITICO (Diorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita)	FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Calcinita, Illita)	LIXIVIADO (LEACHED-CAPPING)	OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSDICIONAL PRIMARIO	COBERTURA	-	-	-								
	BOTd	BOT. DESMONTE										-	-	-								

Nota: SRK Consulting: N° 01-1086-04: Estudio Geotécnico Plan de 15 años, (2021).

### 3.4.2. Descripción geomecánica y geotécnica del tajo

El modelo geotécnico de la mina distribuye las áreas con variables comunes y las denomina Unidades Básicas Geotécnicas (UBG), Estas describen a la roca intacta y el macizo rocoso en las áreas operativas de tajo.

### 3.4.3. Propiedades de la roca intacta y macizo rocoso

En el estudio de las UBG se examina las propiedades principales de la roca intacta que son:

- a. La densidad ( $\gamma$ )
- b. El parámetro de roca intacta ( $mi$ ) propuesto por Hoek & Brown (1997)
- c. La resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_{ci}$ )
- d. En el análisis del macizo rocoso se considera el:
- e. **GSI** (Índice Geológico de Resistencia).
- f. Los parámetros **mb**, **S** y **a**, determinados de acuerdo a las ecuaciones (2), (3) y (4)
- g. **E** Módulo de Young o deformabilidad.
- h. **v** Razón de Poisson, con las ecuaciones (7) y (8)

Estos valores determinan los dominios geo mecánicos o unidades básicas geotécnicas (UBG). Los valores se encuentran tabulados y se muestran en la Figura 13.

Figura 13: Propiedades del macizo rocoso presentes en el tajo

Unidad	Roca Intacta			Macizo Rocoso <sup>(1)</sup>					
	$\gamma$	$m_i$	$\sigma_{ci}$	GSI	mb	s	a	E	$\nu$
	(ton/m <sup>3</sup> )		MPa					GPa	
UGB 1	2.65	16.05	89.91	48	0.92	0.0005	0.51	3.04	0.25
UGB 2	2.61	13.39	94.32	61	1.57	0.0035	0.50	9.72	0.22
UGB 3	2.58	8.71	73.36	41	0.34	0.0002	0.51	1.65	0.27
UGB 4	2.54	14.80	31.14	39	0.52	0.0001	0.51	2.52	0.27
UGB 5	2.62	18.29	128.72	47	0.99	0.0005	0.51	4.88	0.25
UGB 6	2.74	13.59	86.56	54	1.09	0.0013	0.50	3.52	0.24
UGB 7	2.74	18.71	92.62	52	1.34	0.0010	0.50	3.91	0.24
UGB 8	2.78	15.69	135.38	67	2.56	0.0084	0.50	16.57	0.21
UGB 9	2.73	12.95	88.19	47	0.70	0.0005	0.51	2.48	0.25
UGB 10	2.69	15.49	171.01	38	0.51	0.0001	0.51	3.01	0.27
UGB 11	2.77	9.29	190.92	57	0.88	0.0020	0.50	9.14	0.23
UGB 12	2.67	19.16	84.77	48	1.10	0.0005	0.51	4.88	0.25
UGB 13	1.93	8.97	15.25	56	0.80	0.0017	0.50	0.80	0.23
UGB 14	2.29	28.55	80.38	58	2.84	0.0023	0.50	4.66	0.23
UGB 15	1.68	6.25 <sup>(2)</sup>	15.21 <sup>(2)</sup>	45	0.30	0.0003	0.51	0.32	0.26
UGB 16	2.29	21.13	134.27	47	1.15	0.0005	0.51	3.51	0.25
UGB 17	1.76	6.25	15.21	54	0.50	0.0013	0.50	0.57	0.24
UGB 18	1.74	5.75	19.63	47	0.31	0.0005	0.51	0.75	0.25
UGB 19	2.35	14.53	86.36	46	0.75	0.0004	0.51	3.32	0.25

Nota: SRK Consulting: N° 01-1086-04: Estudio Geotécnico Plan de 15 años, Tajo (2021).

### 3.4.4. Dominios estructurales

Los dominios estructurales son áreas delimitadas de acuerdo con las características geológicas y geotécnicas de la mina y sirven esencialmente para el diseño de operaciones mina, en nuestra investigación, la perforación.

En la siguiente figura se muestra un corte transversal del macizo rocoso, donde se aprecia la columna estratigráfica del yacimiento.

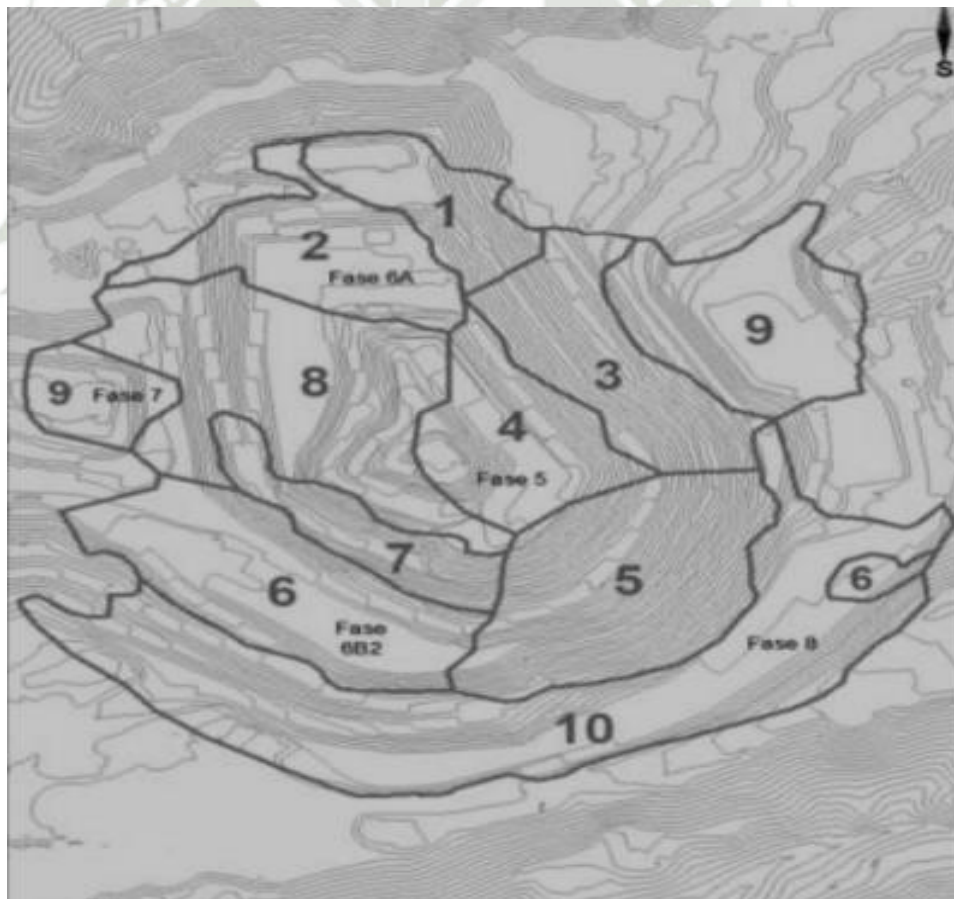
Figura 14: columna estratigráfica

FORM. TEM. TEMA	ERA TEM. TEMA	SIS. TEM. TEMA	SERIE	GEOCRONO-METRIA	UNIDAD LITOES-TATIGRAFICA	LITOLOGIA Y COMPETENCIA	FASE TECTONICA		
FANEROZOICO	CENOZOICA	CUATERNARIO	Holocena Superior	0.01	Aluvial	AL	ALUVIAL, COLUVIALES, TALUS.	QUECHUA II - III	
			Pleistocena	Superior	1.60	3er PERIODO EROSIVO	PA		ANDESITA PORFIRITICA (20.00 mts.)
				Inferior			AS		AGLOM. SUPERIOR (50.00 mts.)
			Pliocena	Superior	3.30	FORMACION CHUNTACALA	TS		TOBA SUPERIOR (65.00 mts.)
				Inferior	9.00 - 5.30		TI		AGLOM. INFERIOR (90.00 mts.)
			Mioceno	Superior	11.00	FORMACION HUAYLILLA	TC		TOBA CRISTAL (120.00 MT S)
		Media		16.20	TR		CONGLOMERADO BASAL (32.00 mts.)		
		Oligocena	Inferior		23.00	FORMACION CHUNTACALA	TA	TARCACEA T BLANCA AG. TOBACEO	
			Superior	16.20			AGLOMERADO GRIS (35.00 mts.)		
		Paleoceno	Paleoceno	Oligocena	Eocena	36.50	3er PERIODO EROSIVO	CONG. AMARILLO Y VERDE (15.00 mts.)	INCA II
								CONG. TRAGUITICO (15.00 mts.)	
								TOBA TRAGUITICA (30.00 mts.)	
								TRAQUITA (150.00 mts.)	
		Cretacico	Cretacico	Superior	Paleocena	65.00	VOLCANICO QUELLAVECO	TOBA SALMON VITROF. (16.00 mts.)	INCA I
								CONGLOM. RIOLITICO (190.00 mts.)	
								DOLERITA TOQUEPALA (130.00 mts.)	
								RIOLITA (370.00 mts.)	
		Mesozoico	Cretacico	Superior		95.00	VOLCANICO PARALAJUE	ANDESITA BASALTICA (+800.00 mts.)	

Nota: tomado del departamento de geotécnica.

Con esta información y las características presentadas en las figuras 10 y 12, se delimitan los dominios estructurales del tajo. Estos se denominan unidades básicas geotécnicas (UBG). La información se alimenta al modelo geo mecánico y es la fuente de la toma de decisiones operativas. En el estudio nos servirá para verificar las condiciones de “perforabilidad” de cada broca triconica usada durante la investigación y correlacionar el desgaste de los insertos, la razón de descarte del tricono y los metros perforados por cada broca.

*Figura 15: Delimitación de Unidades Básicas Geológicas.*



*Nota: Tomado del departamento de geotecnia.*

### 3.4.5. Diseño geométrico del tajo

Las unidades básicas de explotación en el tajo son los bancos estos se diseñan en base a la información geotécnica y operativa. Los principales objetivos de diseño son: 1) Mantener la estabilidad a largo plazo de los taludes y 2) tener las dimensiones adecuadas para asegurar la producción requerida por planeamiento.

#### 3.4.5.1. Parámetros de diseño banco-talud

Los parámetros de diseño son: El ángulo del banco ( $\alpha_b$ ), altura del banco ( $h_b$ ), ancho de berma ( $b$ ) y ángulo global de talud ( $\alpha_{bt}$ ). Los taludes son un conjunto de bancos que pertenecen al mismo dominio estructural o unidad básica geotécnica (UGB), el ángulo del talud es la medida entre la cresta del banco superior y el pie (toe) del banco inferior. En el tajo en estudio, el departamento de geotecnia zonificó las UGB y estableció los siguientes parámetros para la construcción de bancos. La altura de los bancos ( $h_b$ ) es de 30 metros en el fondo del tajo y 15 metros en las demás zonas.

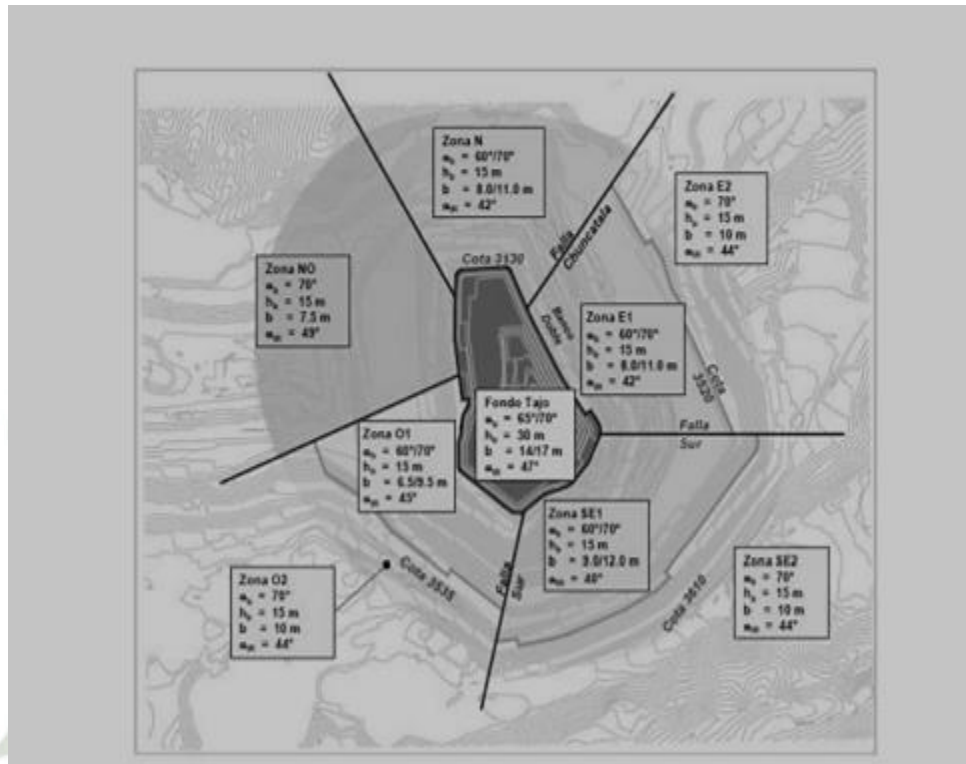
*Tabla 2: Parámetros de diseño y construcción de bancos-taludes*

Zona	Angulo de banco ( $\alpha_b$ )	Ancho de berma (b)	Ángulo talud ( $\alpha_{bt}$ )
Fondo del tajo	65/70°	14/17 m	47°
N	60/70°	8/11 m	42°
E 1	60/70°	8/11 m	42°
E 2	70°	10 m	44°
SE 1	60/70°	9/12 m	40°
SE 2	70°	10 m	44°
O 1	60/70°	6.5/9.5 m	45°
O 2	70°	10 m	44°
NE	70°	7.5	49°

*Nota: elaborado en base al diseño geotécnico para tajo 2015-2020*

La siguiente figura muestra la zonificación del tajo.

Figura 16: zonificación de UBG tajo en estudio.



Nota: Tomado del diseño geotécnico para tajo 2015-2020.

### 3.4.6. Proceso Operativo de Perforación

La perforación inicia el proceso de extracción de los minerales, el objetivo principal es cortar el macizo rocoso para lograr un taladro (hoyo) donde se depositará el explosivo que, al detonar, transmite la energía necesaria para fragmentar la roca. La perforación se realiza en los bancos, de acuerdo con el plan de producción establecido y los taladros se disponen en función a una malla diseñada para cada UBG. Para lograr el corte adecuado del macizo se usan brocas triconicas, estas se seleccionan de

acuerdo con las UBG y los parámetros discutidos en el marco teórico de la presente investigación.

#### **3.4.6.1. Selección de Brocas en el tajo de estudio**

Existen dos materiales principales a perforar-volar, el mineral y el desmonte, las características de diseño de malla para cada material es diferente.

En el caso del mineral (ore), el objetivo es lograr un tamaño de fragmento establecido (P80) para el proceso de conminución. La conminución es reducción de los tamaños del mineral en la voladura, trituración y molienda que sirve para incrementar el área de exposición debido a que un mineral más pequeño es más fácil de recuperar en los procesos fisicoquímicos de la concentración y metalurgia.

Para el desmonte (estéril) el objetivo es reducir a un tamaño adecuado para que se pueda manejar económicamente en la carga, acarreo y disposición en los botaderos. Esto también aplica para el manejo del mineral. El diseño de las mallas de perforación-voladura se hacen con modelos matemáticos que relacionan las UBG, las características del explosivo a usar y las características geométricas del banco a perforar-volar. La característica geométrica principal es el diámetro del taladro, este se toma aproximadamente igual al diámetro de la broca, por lo que se seleccionan diferentes diámetros de broca para cada material. Las características principales de las brocas utilizadas durante el estudio se ven en la siguiente tabla.

Tabla 3: Características de las brocas triconicas usadas en el estudio

Parámetro	Mineral (ore)	Desmonte (waste)
Diámetro en pulgadas	10 5/8	12 1/4
Código IADC	7-2-2	6-3-2
Peso de la broca (kg)	65	97.5
Aleación de la estructura de corte	Carburo de tungsteno	Carburo de tungsteno
Nro. fila del cono (calibre/internos)	3/11	3/12
Insertos en el cono (calibre/internos)	55/11	60/12
Forma de insertos cónicos romos/ (calibre/internos/faldón) cónicos/esféricos		cónicos /semi esféricos
Rango de empuje (Kg)	19270 38555	22200 38872
Rango de velocidad de rotación (RPM)	50-90	50-100
Resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)	241-396	103-305

*Nota: Elaborado a partir de la información del catálogo de los fabricantes CENERG® y MINCOM®*

### 3.4.6.2. Perforadoras

Se utiliza perforadoras rotativas eléctricas de paso completo (single pass), es decir que perforan toda la longitud del banco de diseño con una barra, esto mejora el tiempo de ciclo. Las características operativas se ven en la siguiente tabla.

*Tabla 4: Equipos de perforación en operación*

Código	Marca Modelo	Diámetros(pulg.)	E (Kg)	Máximo Long.de barra (m)
D11	P&H 120 <sup>a</sup>	9-16	49895	18.8-21.3
	BUCYRUS	9 -16	49895	18.8-21.3
D13	49RIII			
	BUCYRUS	9-16	49895	18.8-21.3
D14	49HR			
	P&H	10 5/8 – 17 1/2	68030	18.8 -21.3
D16	320XPC			
	P&H	10 5/8 – 17 1/2	68030	18.8 -21.3
D17	320XPC			
	CAT	9 -16	64000	18.8-21.3
D18	MD6640			

*Nota: Elaboración propia en base a información de campo.*

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUCIÓN

#### 4.1. Análisis e interpretación de los datos

En la presente investigación se observaron 109 brocas triconicas, de estas 36 se utilizaron en perforación de mineral (primario) con diámetro de 10 5/8" y longitud total de perforación de 43746.10 metros y 54 en perforación de desmonte (waste) con diámetro de 12 1/4" y longitud total de perforación de 145597.57 metros, se usaron 6 perforadoras en los siguientes niveles y fases del tajo.

*Tabla 5: Ubicación de la perforación en el tajo.*

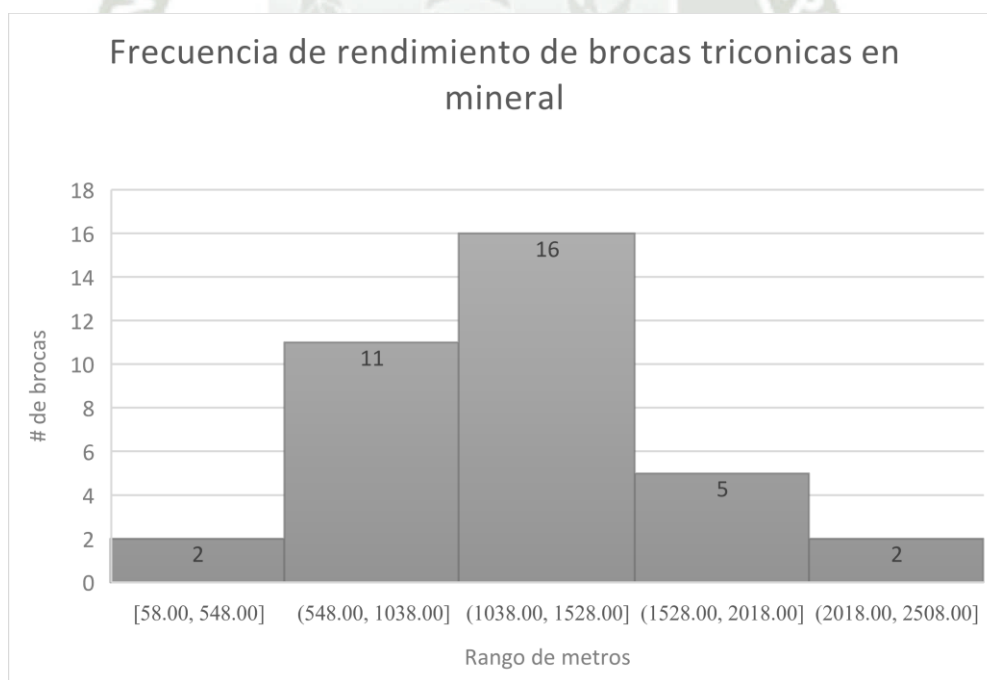
Nivel	Fase Código UBG	Litología	Alteración	Tipo material
3055	6		Propilítica fílica potásica	Primario- waste
3040	6			
3310	7	Andesita	Potásica	Primario
3520	8	Basáltica		
3505	8			
3535	8		Propilítica	waste
3490	8			
3550	8			

*Nota: Elaboración propia en base a información de campo.*

#### 4.2. Rendimiento de brocas triconicas en mineral

El diámetro de perforación en mineral es de 10 5/8, se usan 3 perforadoras (códigos D11, D16 y D17), los rendimientos en metros varían de 58 a 2257 por broca, la media aritmética es 1215.17 m y la desviación estándar 464.55. La frecuencia de rendimiento en metros de las brocas observadas se ve en la Figura 15. Se aprecia que el 44% de las brocas perforó entre 1038 m a 1528m, el 31% entre 548m-1038, el 14% entre 1528m a 2018 y el 5% menos de 548m o más de 59 metros.

Figura 17: Frecuencia de rendimiento de brocas triconicas en mineral

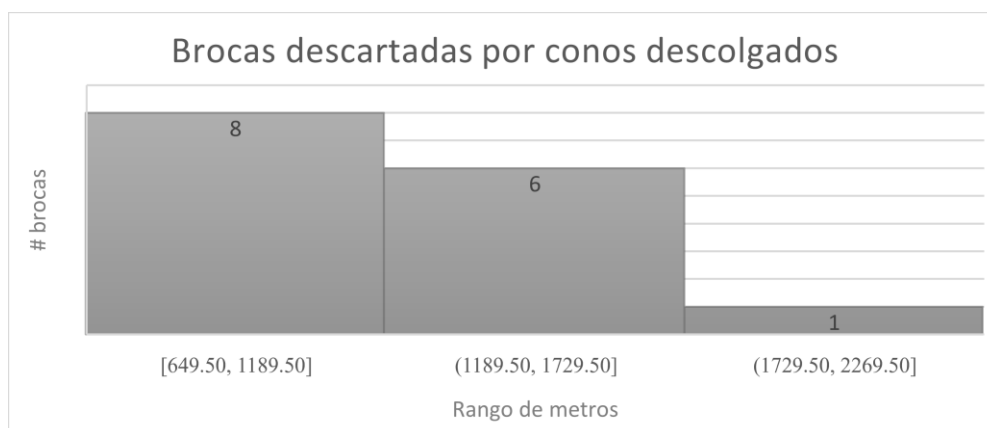


Si evaluamos el motivo de descarte de la broca podemos apreciar que la causa principal de falla es conos descolgados, 15 brocas fueron dadas de baja por esta falla, se usaron en 1232 metros en promedio.

*Tabla 6: Metros perforados antes de fallar por conos descolgados*

Perforadora	metraje	tipo de falla
D11	829.00	Conos Descolgados
D11	1051.00	Conos Descolgados
D11	1654.30	Conos Descolgados
D16	649.50	Conos Descolgados
D17	1173.05	Conos Descolgados
D17	1368.30	Conos Descolgados
D17	1334.20	Conos Descolgados
D17	1389.40	Conos Descolgados
D17	827.50	Conos Descolgados
D17	1013.00	Conos Descolgados
D17	1126.00	Conos Descolgados
D17	1175.70	Conos Descolgados
D17	1289.90	Conos Descolgados
D17	1342.50	Conos Descolgados
D17	2257.00	Conos Descolgados

Figura 18: Brocas descartadas por conos descolgados

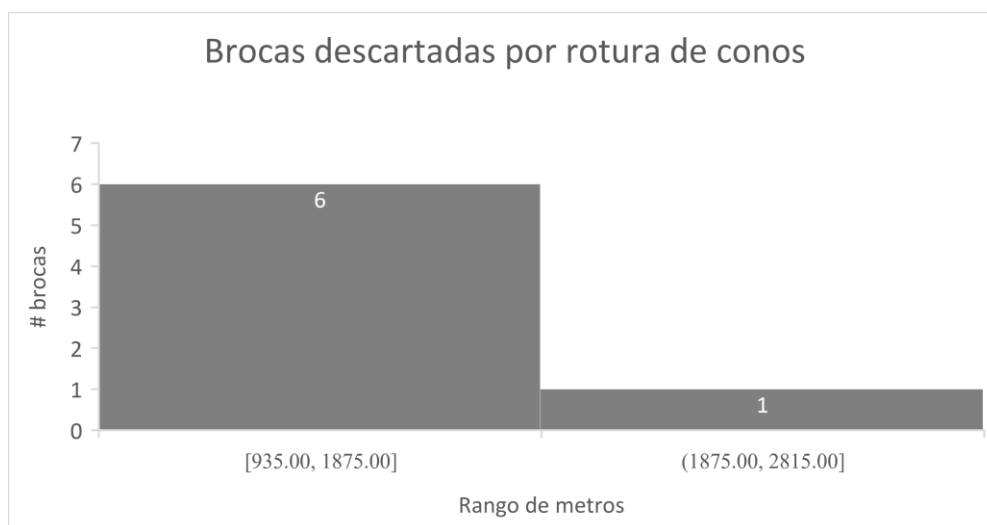


La segunda causa es la rotura de conos, se descartaron 7 brocas que perforaron en promedio 1466 m.

Tabla 7: Metros perforados antes de fallar por rotura de conos

Perforadora	metraje	tipo de falla
D11	1809.00	Rotura de cono
D16	1145.80	Rotura de cono
D17	1585.20	Rotura de cono
D17	2384.50	Rotura de cono
D17	935.00	Rotura de cono
D17	997.00	Rotura de cono
D17	1406.50	Rotura de cono

Figura 19: Brocas descartadas por rotura de conos

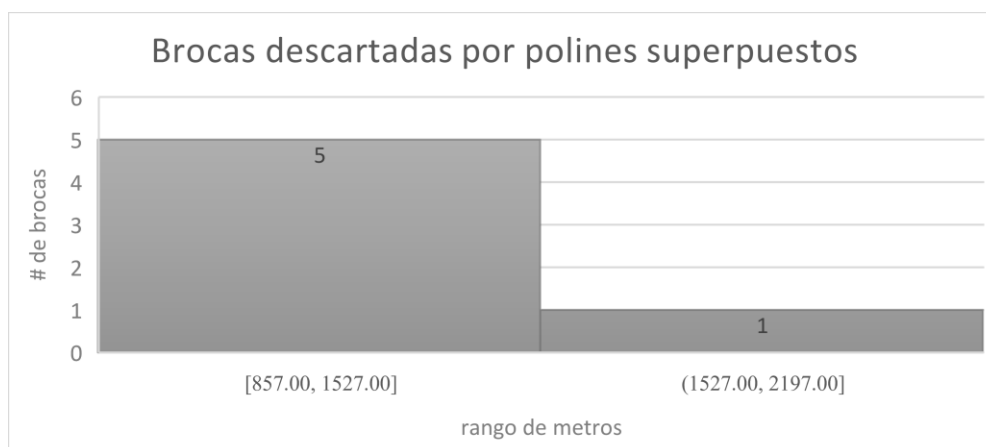


La tercera causa de descarte es polines sobrepuestos, el total de brocas fue de 6, se alcanzó 1281 metros de promedio.

Tabla 8: Metros perforados antes de fallar por polines superpuestos.

Perforadora	metraje	tipo de falla
D11	1244.80	Polines Sobrepuestos
D11	1502.10	Polines Sobrepuestos
D16	1143.50	Polines Sobrepuestos
D17	1847.20	Polines Sobrepuestos
D17	857.00	Polines Sobrepuestos
D17	1090.50	Polines Sobrepuestos

Figura 20: Brocas descartadas por polines superpuestos.



La tercera causa de retiro de las brocas es la rotura de insertos en este caso 4 brocas fallaron por este motivo, la media en metros fue 966.

Tabla 9: Metros perforados antes de fallar por insertos rotos

Perforadora	metraje	tipo de falla
D11	879.70	Insertos Rotos
D11	865.00	Insertos Rotos
D17	1241.65	Insertos Rotos
D17	879.30	Insertos Rotos

Figura 21: Brocas descartadas por insertos rotos



La cuarta falla se da cuando los faldones se desgastan, en nuestro estudio 2 brocas salieron de operación por esta causa luego de perforar en promedio 1243 metros.

Tabla 10: Metros perforados antes de fallar por faldones desgastados

Perforadora	metraje	tipo de falla
D17	1966.50	Faldones Desgastados
		Faldones
D17	519.50	Desgastados

Figura 22: Brocas descartadas por faldones desgastados.



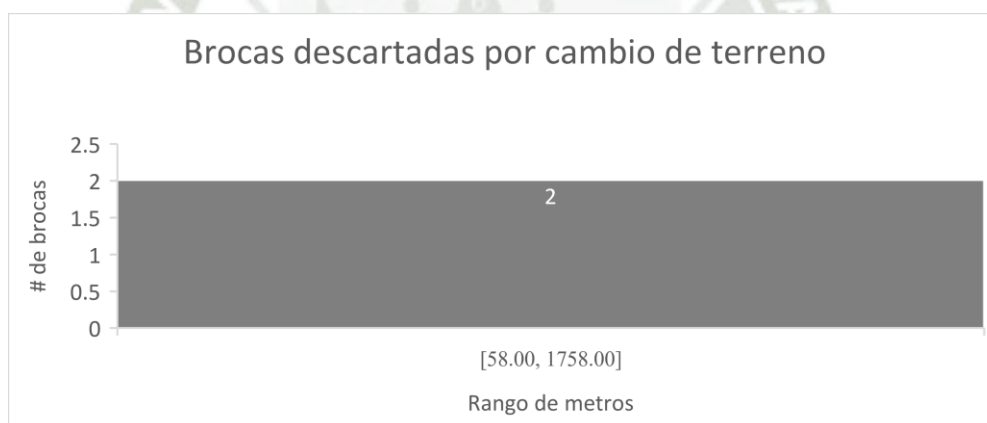
La última causa se debe al cambio de terreno, en este caso se descartaron 2 brocas que perforaron en promedio 483 metros. Esta causa no es técnica

porque se debe a que operativamente la perforadora cambia de zona y tipo de material a perforar

Tabla 11: Metros perforados antes de fallar por cambio de terreno.

Perforadora	metraje	tipo de falla
D11	58.00	Cambio de Terreno
D11	908.00	Cambio de Terreno

Figura 23: Brocas descartadas por cambio de terreno.



#### 4.3. Determinación de la eficiencia operativa de brocas en mineral.

Las variables operativas que deben ser analizadas son; el empuje promedio (Eprom), los RPM (N), la velocidad de penetración (VP), la velocidad media (VM) y el pulldown (PD); estas variables están en función a la unidad básica geotécnica (UGB) de la fase donde trabajan las perforadoras.

En el caso de estudio, la zona mineralizada corresponde a la UBG 7. La geomecánica de importancia para el estudio se muestra en la Tabla 12, el  $\sigma_1$  (resistencia a la compresión de campo definida por Hoek & Brown) se determinó con la ecuación (1).

Tabla 12: Características geomecánicas de la UBG

código UBG	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$\sigma_3$ (Mpa)	mb	S	a	$\sigma_1$ (Mpa)
7	92.62	17.15	1.34	0.001	0.5	156.21

La determinación de las variables operativas se hace aplicando las fórmulas (9), (11), (12) y (13). Los resultados para la UBG donde se usaron las Brocas son Eprom. = 31604.67 kg-f, N= 94.47 rpm, VP= 50.73 m/hra. y VM= 20.14 m/hra. La VP es la velocidad específica, es decir que se refiere a la velocidad sin ninguna demora y en el mismo taladro, la velocidad media (VM) estima las demoras operativas en la perforación (movimientos de perforadora en la malla, ubicación en el punto a perforar, etc).

Este valor lo comparamos con la Velocidad Media Teórica (VR) tomada en campo y tabulada en la Tabla 13, para cada perforadora, calculamos la diferencia ( $\Delta V$ ) entre VM y VR, determinamos el empuje promedio real (ER), determinamos el pulldown (PD) con la ecuación (10) y lo comparamos con el metraje alcanzado por cada broca.

Tabla 13: Variables operativas en mineral

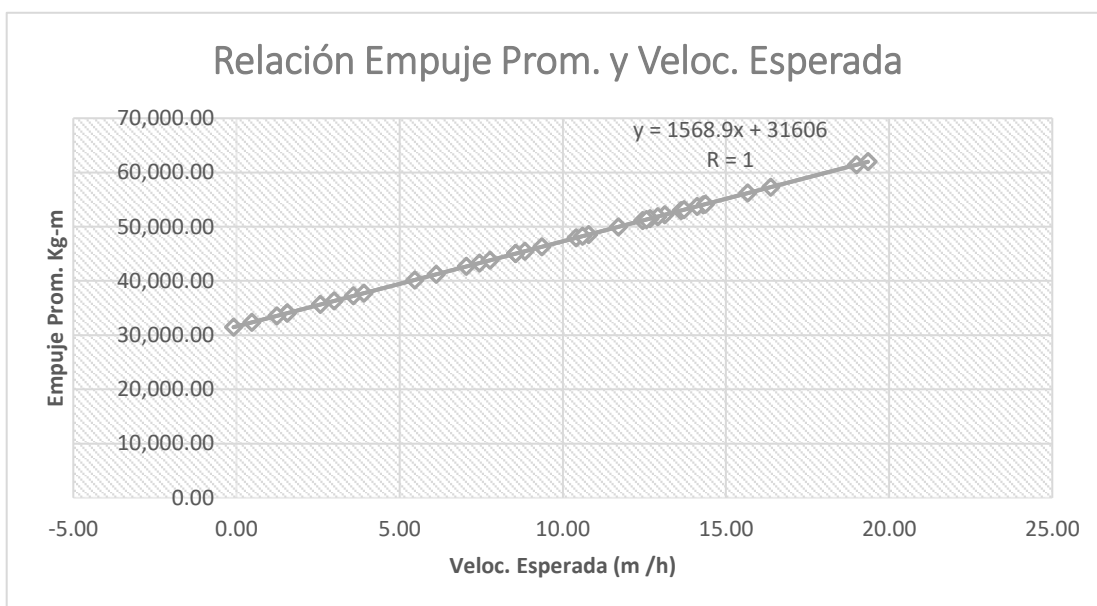
Perforadora	VR (m/hra)	VMT (m/hra)	$\Delta V$ (m/hra)	ER (kg-f)	PD (Mpa)	metros por broca (mp)
D11	30.55	20.14	10.41	47942.83	2.06	879.70
D11	23.72	20.14	3.58	37225.96	1.60	58.00
D11	20.61	20.14	0.47	32340.81	1.39	829.00
D11	23.13	20.14	2.99	36290.69	1.56	865.00
D11	20.06	20.14	-0.09	31470.34	1.35	908.00
D11	21.69	20.14	1.55	34035.25	1.46	1051.00
D11	28.70	20.14	8.55	45025.39	1.93	1244.80
D11	22.71	20.14	2.57	35637.05	1.53	1654.30
D11	21.71	20.14	1.56	34059.65	1.46	1502.10
D11	24.04	20.14	3.90	37723.47	1.62	1809.00
D16	33.27	20.14	13.12	52197.25	2.24	1145.80
D16	33.76	20.14	13.62	52974.26	2.27	1143.50
D16	34.44	20.14	14.30	54037.01	2.32	649.50
D17	31.84	20.14	11.70	49959.78	2.14	1847.20
D17	28.98	20.14	8.84	45471.41	1.95	1173.05
D17	30.93	20.14	10.79	48537.27	2.08	1585.20
D17	33.05	20.14	12.91	51857.93	2.22	2384.50
D17	34.25	20.14	14.11	53738.07	2.30	1241.65
D17	27.58	20.14	7.44	43280.77	1.86	935.00
D17	33.85	20.14	13.71	53111.03	2.28	1368.30
D17	39.14	20.14	19.00	61412.33	2.63	1334.20
D17	32.82	20.14	12.67	51491.13	2.21	1389.40
D17	28.69	20.14	8.55	45017.68	1.93	827.50
D17	35.80	20.14	15.66	56172.57	2.41	857.00

D17	21.37	20.14	1.23	33537.23	1.44	997.00
D17	34.51	20.14	14.37	54148.59	2.32	1013.00
D17	32.60	20.14	12.45	51145.11	2.19	1126.00
D17	39.50	20.14	19.35	61972.87	2.66	1175.70
D17	26.27	20.14	6.12	41213.40	1.77	1289.90
D17	30.75	20.14	10.60	48242.95	2.07	1342.50
D17	25.60	20.14	5.46	40166.24	1.72	1406.50
D17	36.51	20.14	16.37	57291.28	2.46	1966.50
D17	29.50	20.14	9.36	46288.11	1.98	879.30
D17	27.18	20.14	7.04	42651.69	1.83	1090.50
D17	27.91	20.14	7.77	43790.81	1.88	519.50
D17	32.70	20.14	12.56	51309.19	2.20	2257.00

La velocidad esperada (VE) depende del empuje aplicado por la perforadora y la diferencia de velocidades observadas en operaciones.

En nuestro estudio la correlación es lineal y el grafico se muestra en la siguiente figura.

*Figura 24: Relación de empuje promedio y velocidad esperada.*



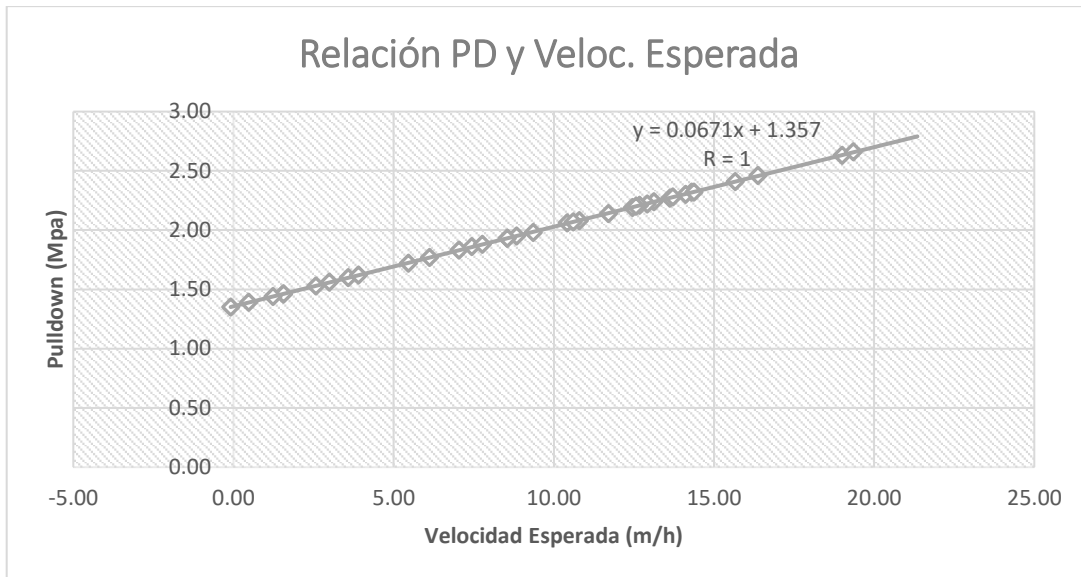
La ecuación para determinar el empuje promedio en función a la velocidad esperada es.

$$E_{prom.} = 1569 VE + 31606 . \quad (19)$$

En la perforación de campo, la variable que define la capacidad de penetración de la sarta de perforación, y por lo tanto de la broca, es la presión que se ejerce sobre el área del tricono o Pulldown (PD).

Este valor fue calculado para todas las observaciones y relacionadas a la diferencia de la velocidad. Los resultados se muestran en la siguiente gráfica.

*Figura 25: Relación de PD y velocidad esperada*



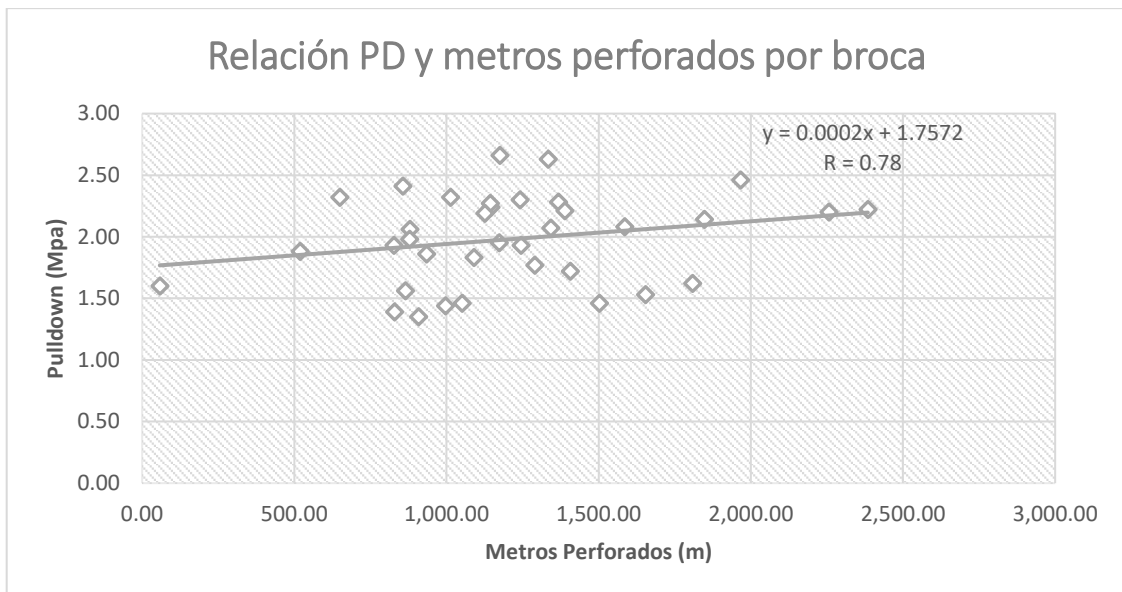
Para determinar el PD en función a la velocidad esperada se utiliza la siguiente ecuación.

$$PD = 0.0671VE + 1.36 \quad (21)$$

Si relacionamos la presión de la sarta de perforación (PD) con los metros perforados por broca (mp), podemos determinar un submodelo predictivo para determinar la duración de la broca en función a las variables operativas de campo.

La grafica de dispersión no muestra la correlación entre los metros alcanzados y el Pulldown aplicado durante la perforación, como se aprecia la mayoría de las observaciones graficadas coinciden con la media calculada de los datos y frecuencia mostradas en la Figura 15.

*Figura 26: Relación del PD y metro perforados por las brocas*



Para determinar el Pulldown aplicado en función a los metros perforados por la broca, se usa la ecuación:

$$PD = 0.0002mp + 1.757 \quad (22)$$

#### 4.4. Determinación del daño de la broca

Los daños de la broca se producen por las vibraciones axiales en los conos y las filas de insertos que son provocadas por el empuje ejercido sobre la sarta de perforación. Si consideramos que el empuje es igual a la fuerza axial ejercida sobre el tricono y se puede calcular con la ecuación (15), deducimos que a mayor Pulldown (PD), mayor vibración en la broca y especialmente sobre las filas de insertos en los conos. Esta vibración se incrementa con la profundidad de perforación y se puede medir en función a la “indentación” con la ecuación (14). En nuestro estudio calculamos la altura de paso ( $D_p$ ) para todas las observaciones en campo como se muestra en la Tabla 14.

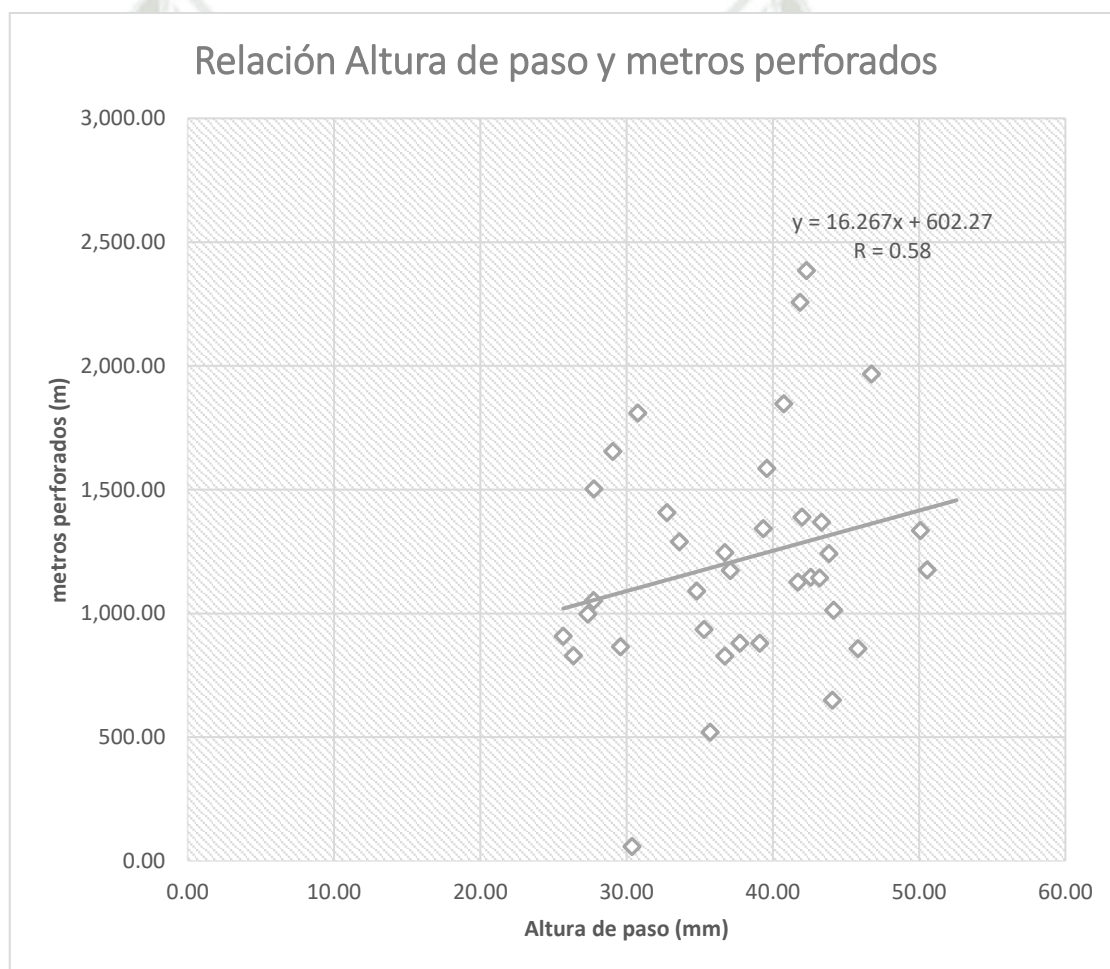
Tabla 14: Altura de paso ( $D_p$ ) según los metros perforados por broca

Perforadora	$D_p$ (mm)	Metros por broca (mp)
D11	39.11	879.70
D11	30.37	58.00
D11	26.38	829.00
D11	29.60	865.00
D11	25.67	908.00
D11	27.76	1051.00
D11	36.73	1244.80
D11	29.07	1654.30
D11	27.78	1502.10
D11	30.77	1809.00
D16	42.58	1145.80

D16	43.21	1143.50
D16	44.08	649.50
D17	40.76	1847.20
D17	37.09	1173.05
D17	39.59	1585.20
D17	42.30	2384.50
D17	43.84	1241.65
D17	35.31	935.00
D17	43.33	1368.30
D17	50.10	1334.20
D17	42.00	1389.40
D17	36.72	827.50
D17	45.82	857.00
D17	27.36	997.00
D17	44.17	1013.00
D17	41.72	1126.00
D17	50.56	1175.70
D17	33.62	1289.90
D17	39.35	1342.50
D17	32.77	1406.50
D17	46.74	1966.50
D17	37.76	879.30
D17	34.79	1090.50
D17	35.72	519.50
D17	41.86	2257.00

En la figura 25 se observa que a mayores metros perforados por la broca la “indentación” o altura de paso es mayor, esto explica fallas de la broca observadas en el punto 4.1.

*Figura 27: Altura de paso de insertos en función a los metros perforados por brocas.*



La ecuación de metro perforados por la broca queda determinada por

$$mp = 16.27dp + 602.27 \quad (23)$$

La altura de paso es determinante en el daño del tricono, en el estudio se ha determinado el promedio ponderado del Dp, con los datos de la Tabla 15 para cada tipo de falla registrada, eliminando el tipo denominado “cambio de terreno” porque no es una falla técnica de la broca ni sus componentes. Los metros perforados por la broca se determinaron con la ecuación (23) y los resultados se ven en la Tabla 15, donde se deduce que; Las falla sucede cuando la indentación está entre 36.48 mm y 44.34 mm. El metraje esperado por broca estará en el rango de 1195 a 1323. El Pulldown (PD) operativo a aplicar es, se calculó con la ecuación (22) y debe ser máximo de 2 Mpa.

*Tabla 15: Altura de paso, Pulldown y tipo de falla*

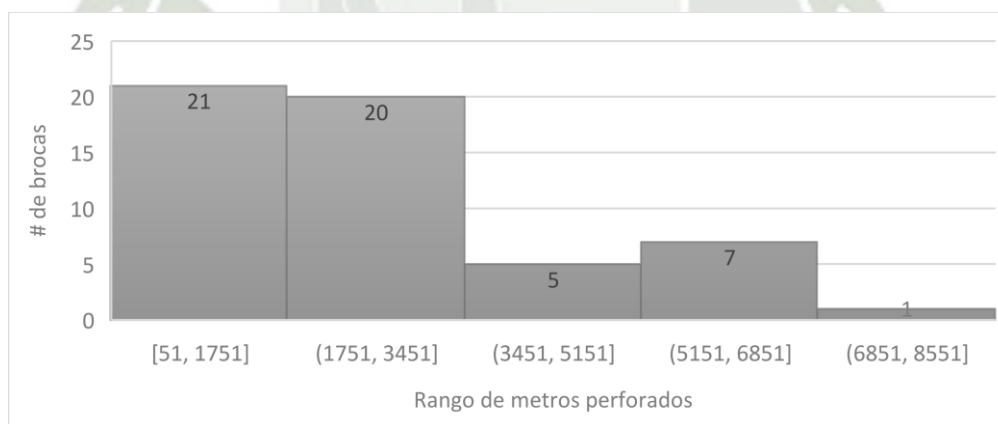
mp por broca	Dp (mm)	PD (Mpa)	Tipo de Falla
1195.77	36.48	1.99	rotura de conos
1214.81	37.65	2.00	polines sobre puestos
1223.60	38.19	2.00	insertos rotos
1243.12	39.39	2.00	conos descolgados
1323.65	44.34	2.02	desgaste de faldones

#### **4.5. Rendimiento de brocas en desmante.**

En la zona de desmonte se usa brocas triconicas de diámetro de 12 1/4”, en seis perforadoras (códigos D11, D13, D14, D16, D17 y D18), el total de metros perforados fue de 145597.51 m. El promedio de metros perforados por broca fue 2696.95 m y la desviación estándar de 1790.57 m. El máximo rendimiento alcanzado por una broca fue 7328.60 m y el mínimo fue 51 m.

La frecuencia y rango de metros perforados se muestran en la Figura 26, se aprecia que la distribución no es normal, está sesgada a la izquierda lo que indica de la mayor cantidad de fallas fue en los rangos de metros menores. El 39% de las brocas logro perforar 1751 m, el 37% perforo hasta 3451 m, 9% de las brocas alcanzo 5151 m, 13% perforó hasta 6851 m y 2% logró perforar 8551 m.

Figura 28: Frecuencia de rendimiento de brocas en desmonte



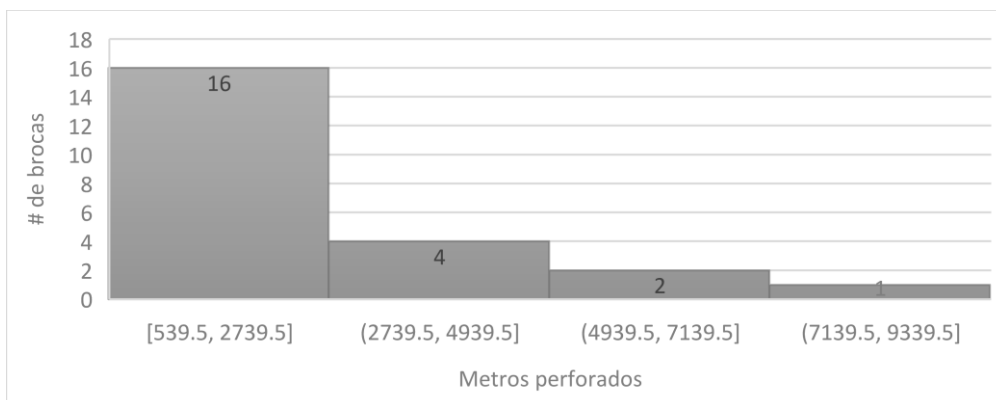
La primera causa de falla de los triconos fue la rotura de insertos, 22 brocas se retiraron por esta causa, el promedio de metros perforados fue 2569.

Tabla 16 Metros perforados por brocas antes de fallar por insertos rotos

Perforadora	Metraje	Falla
D11	1218.0	Insertos Rotos
D11	1179.5	Insertos Rotos

D11	2700.5	Insertos Rotos
D11	5215.1	Insertos Rotos
D13	6334.5	Insertos Rotos
D14	2038.7	Insertos Rotos
D14	1274.2	Insertos Rotos
D14	1523.0	Insertos Rotos
D14	1774.7	Insertos Rotos
D14	3881.3	Insertos Rotos
D14	539.5	Insertos Rotos
D14	1817.0	Insertos Rotos
D14	1507.5	Insertos Rotos
D16	1699.9	Insertos Rotos
D16	2220.5	Insertos Rotos
D16	7328.6	Insertos Rotos
D17	2881.8	Insertos Rotos
D18	4222.0	Insertos Rotos
D18	3438.5	Insertos Rotos
D18	1148.0	Insertos Rotos
D18	1438.7	Insertos Rotos
D18	1720.0	Insertos Rotos
D18	1992.5	Insertos Rotos

*Figura 29: Brocas descartadas en desmonte por rotura de insertos*

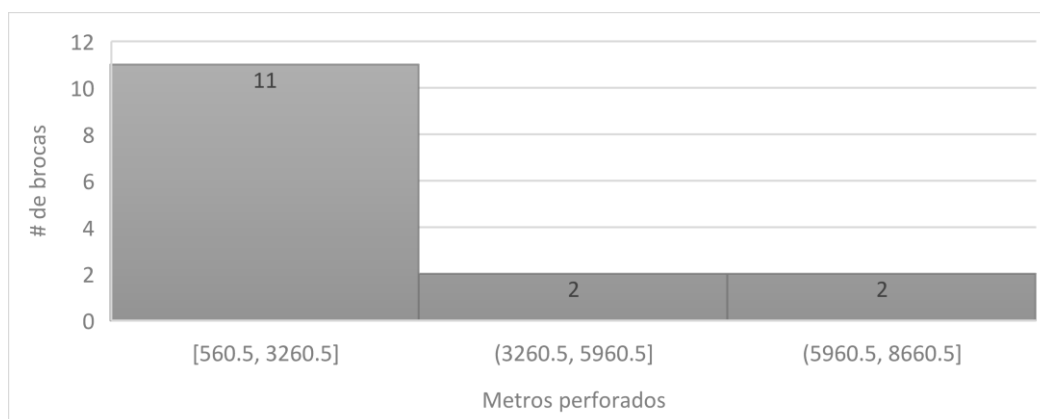


La segunda causa de descarte de brocas fue por conos descolgados, el total de brocas es 15 brocas que perforaron en promedio 2732 m.

Tabla 17: Metros perforados antes de fallar por conos descolgados

Perforadora	metraje	Falla
D11	4310.8	Conos Descolgados
D11	560.5	Conos Descolgados
D13	4744.9	Conos Descolgados
D13	6316.9	Conos Descolgados
D14	1378.2	Conos Descolgados
D14	6711.5	Conos Descolgados
D14	1205.4	Conos Descolgados
D16	1353.5	Conos Descolgados
D16	1621	Conos Descolgados
D16	2570.7	Conos Descolgados
D16	1474.7	Conos Descolgados
D16	2007.5	Conos Descolgados
D17	996.0	Conos Descolgados
D18	2787.5	Conos Descolgados
D18	2938.8	Conos Descolgados

Figura 30: Brocas descartadas en desmonte por conos descolgados

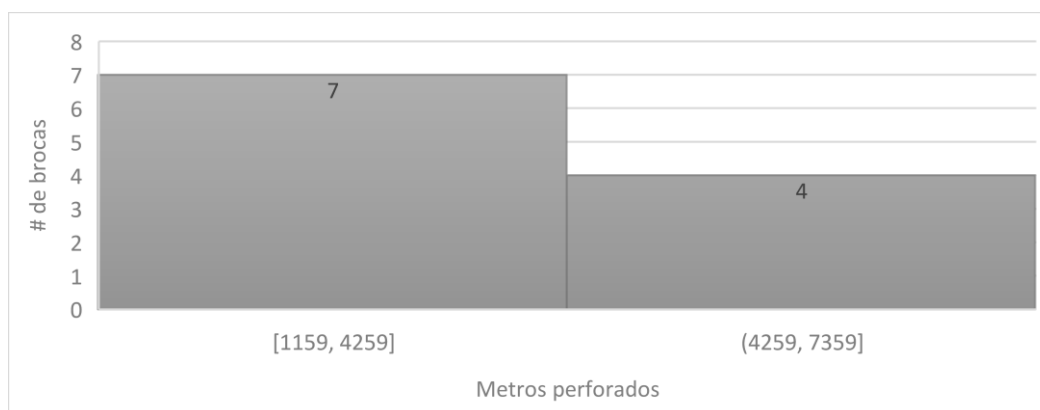


La tercera causa de retiro de las brocas fue por polines descolgados, el metraje promedio alcanzado fue de 3245 con 11 brocas.

Tabla 18: Metros perforados antes de fallar por polines sobrepuestos

Perforadora	metraje	Falla
D11	1159	Polines Sobrepuestos
D11	1224.5	Polines Sobrepuestos
D11	5906.2	Polines Sobrepuestos
D13	5598.79999	Polines Sobrepuestos
D13	5045.49999	Polines Sobrepuestos
D13	5920.84998	Polines Sobrepuestos
D14	2959.2	Polines Sobrepuestos
D16	2156.4	Polines Sobrepuestos
D16	1291.6	Polines Sobrepuestos
D18	2135.6	Polines Sobrepuestos
D18	2305.5	Polines Sobrepuestos

Figura 31: Brocas descartadas en desmonte por polines superpuestas.

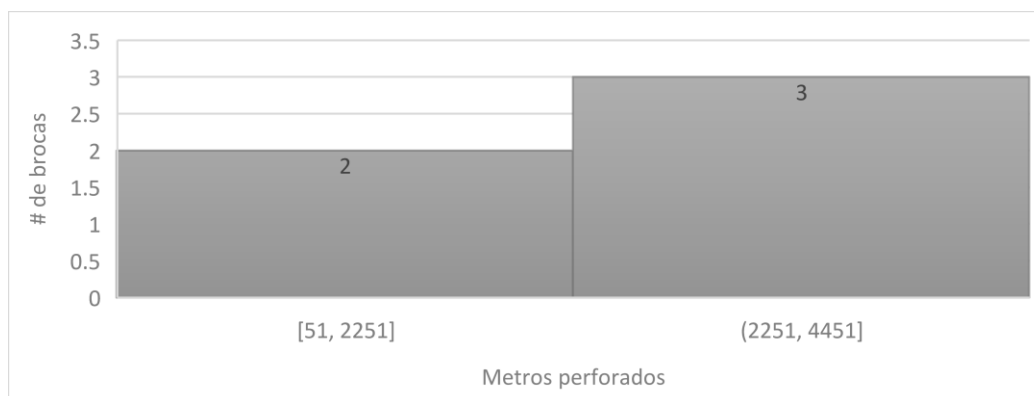


La cuarta causa es cambio de terreno se desecharon 5 brocas que perforaron en promedio 1964 m.

Tabla 19: Metros perforados antes de fallar por cambio de terreno

Perforadora	metraje	Falla
D11	51.0	Cambio de Terreno
D14	2410.5	Cambio de Terreno
D18	2465.7	Cambio de Terreno
D18	2788.0	Cambio de Terreno

Figura 32: Brocas descartadas en desmonte por cambio de terreno.



La última causa es rotura de conos, solo una broca fue desechada perforando en promedio 2107 m.

Tabla 20: Metros perforados antes de fallar por rotura de conos.

Perforadora	metraje	Falla
D18	2107.1	Rotura de cono

Figura 33: Brocas descartadas en desmonte por rotura de conos



#### 4.6. Determinación de la eficiencia operativa de brocas en desmonte.

Durante el estudio la perforación en desmonte se hace en el UBG8 las características geomecánicas se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21: Variables geomecánicas en desmonte.

UBG	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$\sigma_3$ (Mpa)	mb	S	a	$\sigma_1$ (Mpa)
8	110.97	36.66	2.56	0.0084	0.5	307.42

Los resultados de la evaluación con las ecuaciones (9), (11), (12) y (13) son:  
E<sub>prom</sub>=62198 Kg., N=78.85 RPM, VM= 11.54 m/h. y PD=2 Mpa. Los  
resultados de las variables operativas en desmonte se muestran en la tabla  
22.

*Tabla 22: Variables operativas para desmonte*

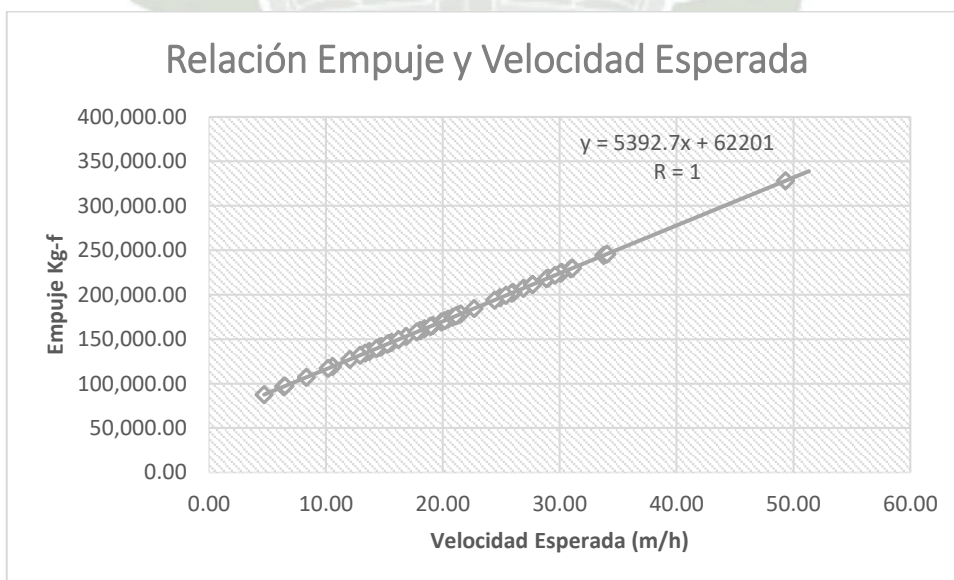
Perforadora	VR (m/hra)	VM (m/hra.)	Δ V (m/hra.)	ER (Kg)	PD (Mpa)	metros por broca (mp)
D11	17.92	11.53	6.39	96655.97	3.12	1218.00
D11	18.03	11.53	6.50	97248.58	3.14	1159.00
D11	16.26	11.53	4.72	87670.81	2.83	1224.50
D11	19.88	11.53	8.34	107196.07	3.46	1179.50
D11	37.50	11.53	25.97	202227.13	6.52	51.00
D11	29.60	11.53	18.07	159643.88	5.15	4310.80
D11	30.48	11.53	18.95	164372.63	5.30	2700.50
D11	60.85	11.53	49.32	328167.99	10.58	5906.20
D11	45.31	11.53	33.78	244365.59	7.88	5215.10
D11	29.99	11.53	18.45	161716.79	5.22	560.50
D13	40.54	11.53	29.00	218596.86	7.05	5598.80
D13	41.65	11.53	30.11	224596.61	7.24	6334.50
D13	38.44	11.53	26.90	207284.25	6.69	4744.95
D13	26.93	11.53	15.39	145204.51	4.68	5045.50
D13	37.56	11.53	26.03	202566.26	6.53	5920.85
D13	32.00	11.53	20.47	172578.26	5.57	6316.86
D14	37.42	11.53	25.88	201769.87	6.51	2959.20
D14	31.43	11.53	19.89	169473.85	5.47	2038.70
D14	31.70	11.53	20.16	170934.54	5.51	2410.55

D14	23.58	11.53	12.05	127159.34	4.10	1378.20
D14	25.27	11.53	13.73	136263.11	4.39	1274.20
D14	22.12	11.53	10.59	119309.27	3.85	1523.00
D14	26.10	11.53	14.57	140776.65	4.54	1774.70
D14	36.44	11.53	24.91	196530.56	6.34	3881.30
D14	41.72	11.53	30.19	225004.36	7.26	6711.50
D14	42.50	11.53	30.96	229179.84	7.39	539.50
D14	24.89	11.53	13.36	134240.11	4.33	1817.10
D14	30.67	11.53	19.14	165419.28	5.34	1507.50
D14	32.84	11.53	21.30	177082.10	5.71	1205.40
D16	28.41	11.53	16.88	153208.19	4.94	1353.50
D16	30.52	11.53	18.98	164577.97	5.31	1621.00
D16	27.15	11.53	15.62	146414.46	4.72	1699.90
D16	33.06	11.53	21.53	178277.89	5.75	2156.40
D16	34.23	11.53	22.69	184569.21	5.95	2220.50
D16	35.96	11.53	24.43	193933.33	6.26	2570.70
D16	39.20	11.53	27.67	211390.76	6.82	7328.60
D16	24.45	11.53	12.92	131870.28	4.25	1291.60
D16	26.22	11.53	14.68	141381.13	4.56	1474.70
D16	26.29	11.53	14.76	141767.68	4.57	2007.50
D17	32.38	11.53	20.85	174610.82	5.63	2881.80
D17	41.61	11.53	30.08	224407.81	7.24	996.00
D18	42.61	11.53	31.08	229809.45	7.41	2465.70
D18	36.92	11.53	25.38	199083.54	6.42	4222.00
D18	40.41	11.53	28.87	217907.99	7.03	3438.50
D18	21.73	11.53	10.19	117175.67	3.78	1148.00
D18	39.22	11.53	27.68	211485.21	6.82	1438.70

D18	45.57	11.53	34.04	245766.37	7.93	2107.10
D18	25.88	11.53	14.34	139540.45	4.50	2135.60
D18	32.66	11.53	21.12	176109.98	5.68	2305.50
D18	41.15	11.53	29.62	221902.99	7.16	2788.00
D18	29.59	11.53	18.06	159574.85	5.15	2787.50
D18	26.78	11.53	15.25	144436.14	4.66	2938.80
D18	27.75	11.53	16.22	149661.58	4.83	1720.00
D18	29.32	11.53	17.79	158112.90	5.10	1992.50

La relación entre el empuje y la velocidad esperada es lineal, a igual que en el mineral, aunque el empuje aplicado es mayor por las características geomecánicas del desmonte.

Figura 34: Relación entre empuje y velocidad esperada

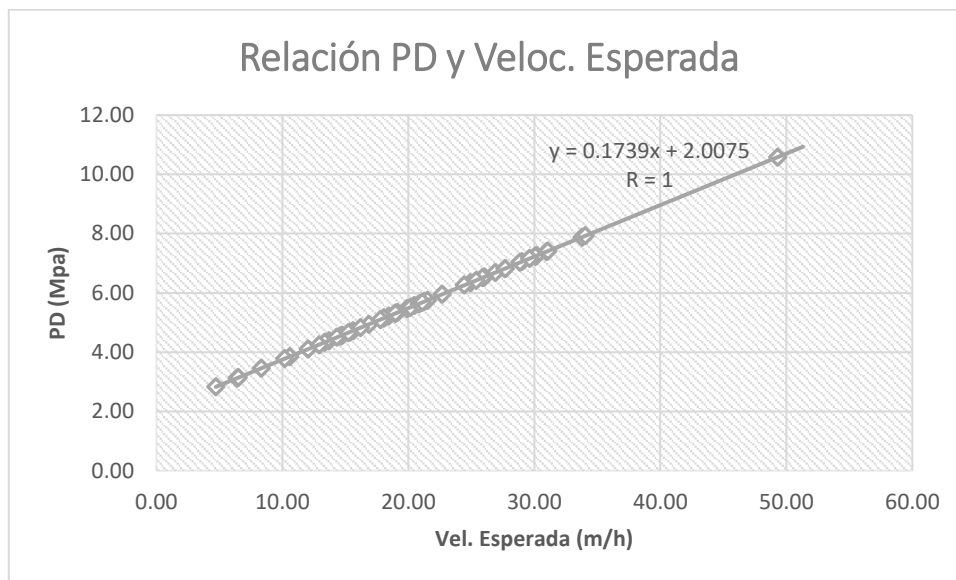


La ecuación de esta relación es

$$E_{prom} = 5392.7VE + 62201 \quad (24)$$

Determinamos la relación entre la velocidad esperada y el Pulldown en desmante.

Figura 35: Relación entre Pulldown y velocidad esperada

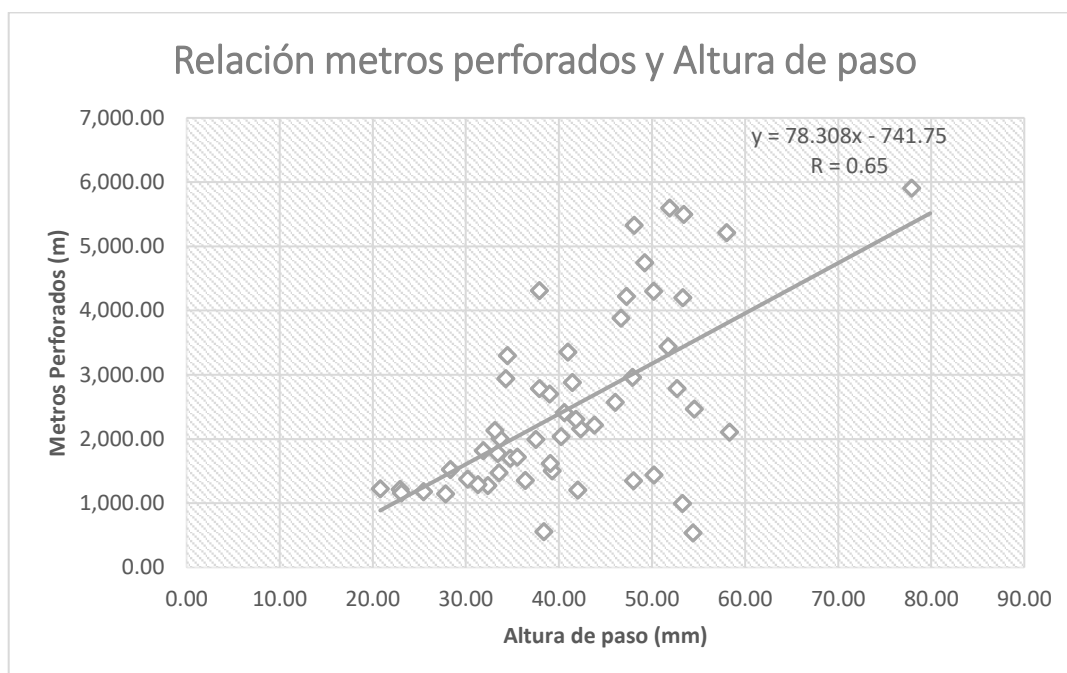


La ecuación de la relación entre Pulldown y la velocidad esperada es:

$$PD = 0.1739VE + 2 \quad (25)$$

Para determinar el Pulldown aplicado en todas observaciones realizadas en desmante se relaciona el PD y los metros perforados por broca.

Figura 36: metros perforados en desmonte y altura de paso.



La ecuación se puede escribir como:

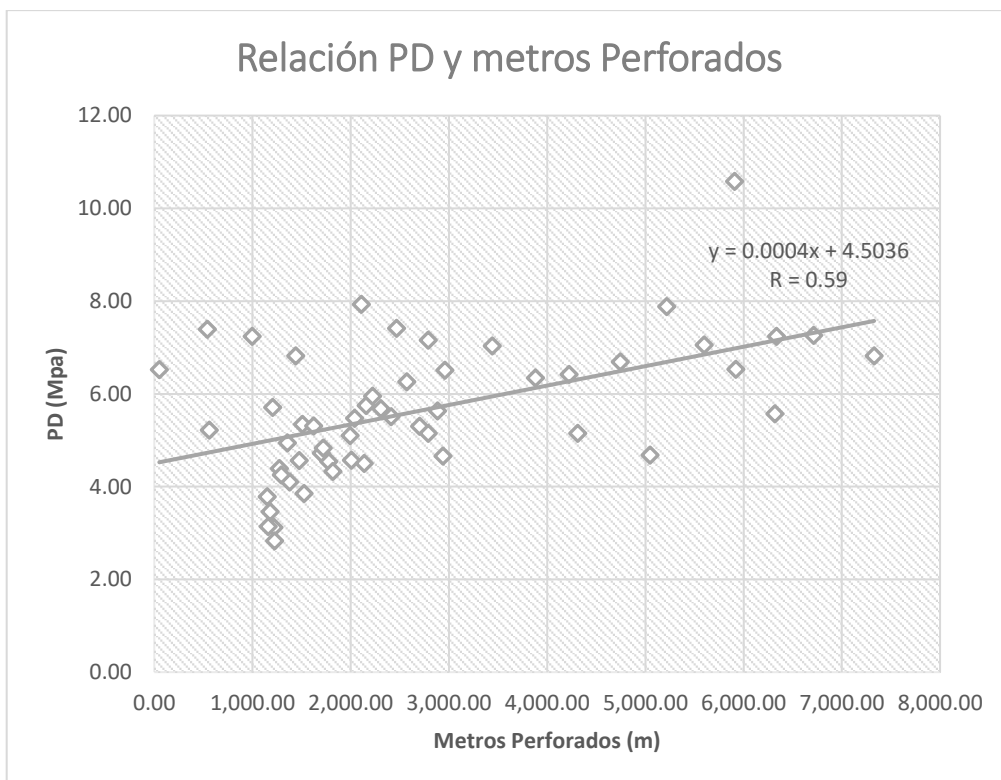
$$mp = 78.31dp - 741.75 \quad (27)$$

En las zonas de desmonte la altura de paso es mayor explicado principalmente por las características geomecánicas del UBG, y en especial el  $\sigma_1$  que es 307 Mpa. En la tabla 23 se ve la relación entre los mp por broca, el DP y el PD.

Tabla 23: Altura de paso, Pulldown y tipo de falla de la broca.

mp por broca	DP (mm)	PD (Mpa)	tipo de falla
2773.64	42.34	5.61	Conos Descolgados
2941.93	44.29	5.68	Insertos rotos
3232.68	47.67	5.79	Polines sobrepuestos
4151.85	58.33	6.16	Rotura de cono

Figura 37: relación entre Pulldown y metraje perforado por broca



La ecuación es:

$$PD = 0.004mp + 4.5 \quad (26)$$

Al igual que en mineral se debe determinar la altura de paso ( $D_p$ ) de la "indentación" en el macizo rocoso de desmonte en función a los metros perforados por la broca.

Tabla 24: Altura de paso y metros perforados por broca.

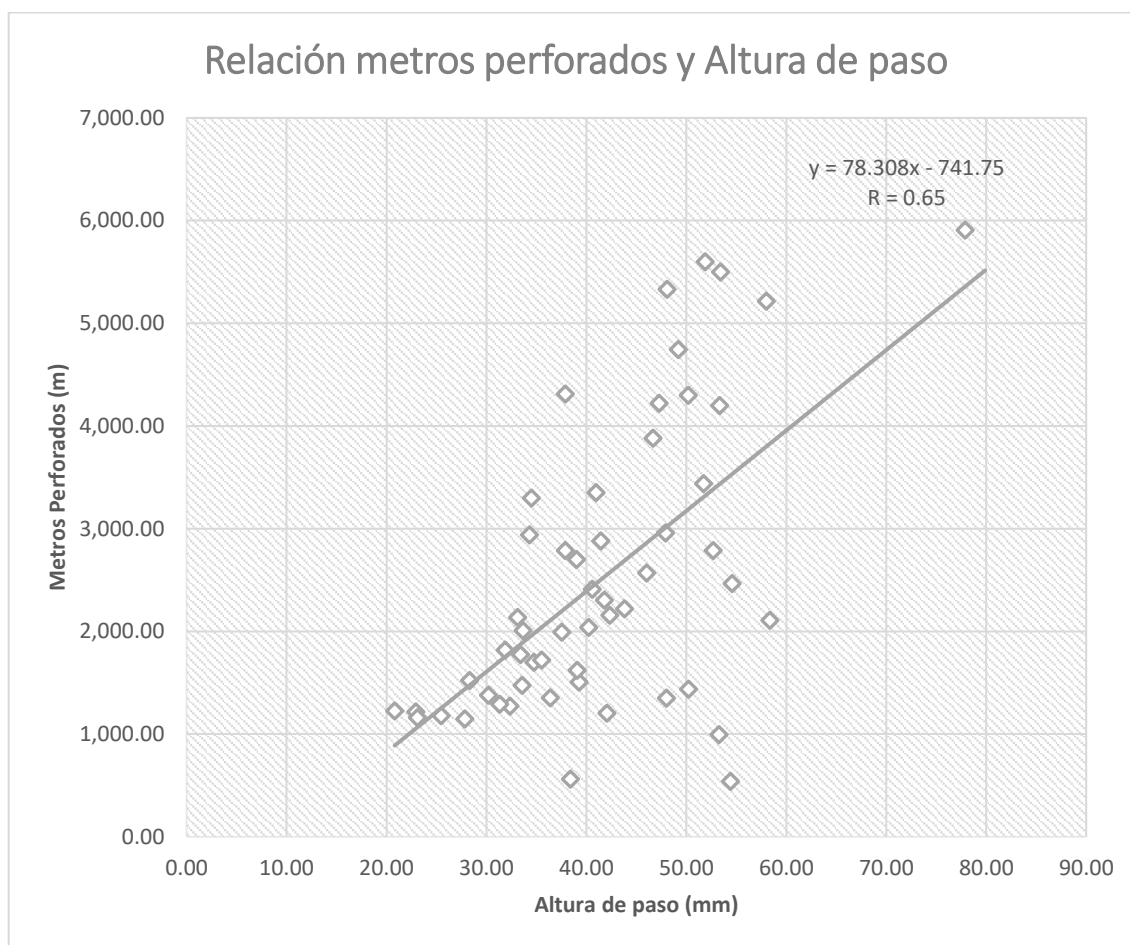
Perforadora	$D_p$ (mm)	Metros por broca (Mp)
D11	22.94	1218.00
D11	23.08	1159.00
D11	20.81	1224.50
D11	25.44	1179.50
D11	48.00	51.00

D11	37.89	4310.80
D11	39.01	2700.50
D11	77.89	5906.20
D11	58.00	5215.10
D11	38.38	560.50
D13	51.89	5598.80
D13	53.31	6334.50
D13	49.20	4744.95
D13	34.47	5045.50
D13	48.08	5920.85
D13	40.96	6316.86
D14	47.89	2959.20
D14	40.23	2038.70
D14	40.57	2410.55
D14	30.18	1378.20
D14	32.34	1274.20
D14	28.32	1523.00
D14	33.41	1774.70
D14	46.65	3881.30
D14	53.41	6711.50
D14	54.40	539.50
D14	31.86	1817.10
D14	39.26	1507.50
D14	42.03	1205.40
D16	36.37	1353.50
D16	39.06	1621.00
D16	34.75	1699.90

D16	42.32	2156.40
D16	43.81	2220.50
D16	46.03	2570.70
D16	50.18	7328.60
D16	31.30	1291.60
D16	33.56	1474.70
D16	33.65	2007.50
D17	41.45	2881.80
D17	53.26	996.00
D18	54.55	2465.70
D18	47.25	4222.00
D18	51.72	3438.50
D18	27.81	1148.00
D18	50.20	1438.70
D18	58.33	2107.10
D18	33.12	2135.60
D18	41.80	2305.50
D18	52.67	2788.00
D18	37.88	2787.50
D18	34.28	2938.80
D18	35.52	1720.00
D18	37.53	1992.50

---

Figura 38: metros perforados en desmonte y altura de paso.



La ecuación se puede escribir como:

$$mp = 78.31dp - 741.75 \quad (27)$$

En las zonas de desmonte la altura de paso es mayor explicado principalmente por las características geomecánicas del UBG, y en especial el  $\sigma_1$  que es 307 Mpa. En la tabla 25 se ve la relación entre los mp por broca, el DP y el PD.

Tabla 25: Altura de paso, Pulldown y tipo de falla de la broca.

mp por broca	DP (mm)	PD (Mpa)	tipo de falla
2773.64	42.34	5.61	Conos Descolgados
2941.93	44.29	5.68	Insertos rotos
3232.68	47.67	5.79	Polines sobrepuestos
4151.85	58.33	6.16	Rotura de cono

#### 4.7. Modelo General para el rendimiento de brocas triconicas

Del análisis anterior se deduce que la variable más importante para definir el desgaste y falla de un tricono es el empuje (E), este tiene dos componentes; el peso de la sarta de perforación y el empuje ejercido sobre el tricono, ambos componentes producen la “indentación” o hundimiento de los insertos en el macizo rocoso, que es directamente proporcional a la profundidad o metros perforados por la broca.

La investigación determino que esta relación es lineal tanto para mineral, como para desmonte y se muestran en las ecuaciones (23) y (27). Estas ecuaciones se reducen para determinar el modelo general donde se ha reemplazado la ecuación (14) con las ecuaciones (12) y (13) debido a que son las variables de controlables en el diseño y estimación de los metros perforados (mp) por una broca triconica.

$$mp = \left[ 47 * \left[ 2 * \left( \frac{63.9 * E * N}{\sigma_{ct}^2 * \varnothing^{0.9}} \right) \right]^{0.65} \right] - 70 \quad (28)$$

Donde:

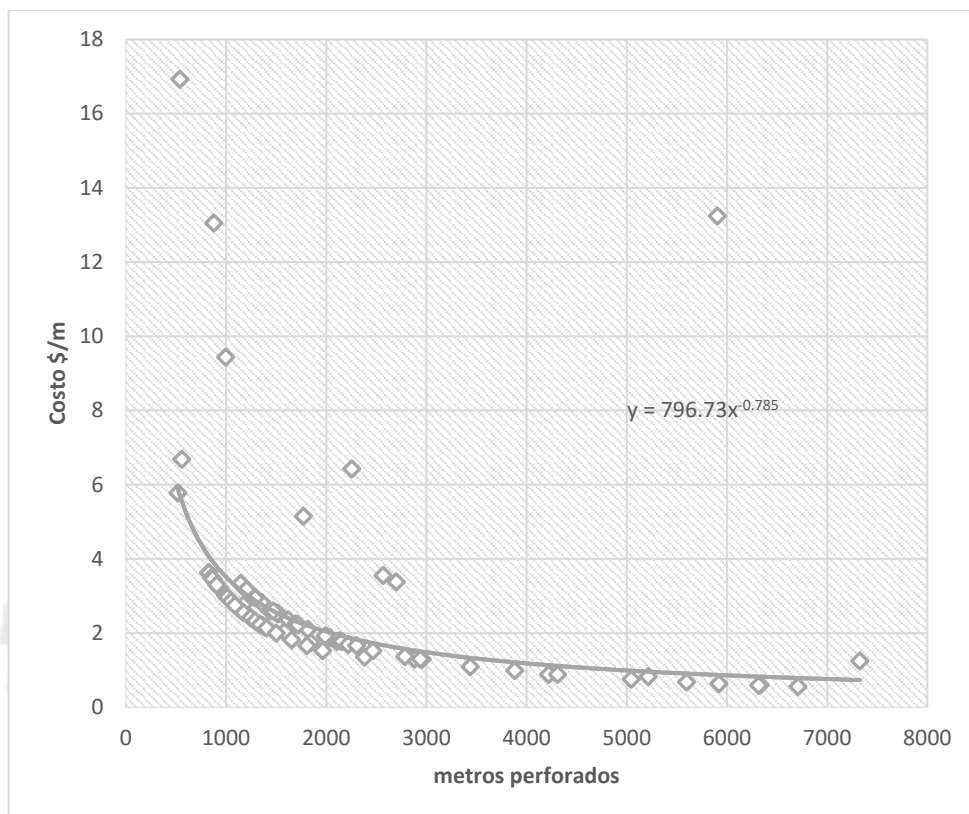
- E: Empuje promedio en Kg-f
- N: Numero de revoluciones por minuto (RPM) de la broca
- $\sigma_{ci}$ : esfuerzo principal de compresión en Mpa.
- $\emptyset$ : Diámetro de la broca triconica en mm

#### 4.8. Costo de perforación por broca

La medición del costo de penetración por Broca o Penetration Drill Cost (PDC) determina la productividad de las brocas antes de ser sacadas de operación. En el estudio la productividad de las brocas, que se mide en metros perforados, es baja en mineral donde se puede alcanzar en promedio hasta 1323 m y el costo penetración es de 2.82 \$/m, sin embargo, causa de retiro es por daño en los faldones que es una causa de desgaste operativo y o un daño en la broca. En desmante o estéril se logra 4151.85 m con un costo de 1.15 \$/m. en este caso se logra más metraje sin embargo el daño de las brocas es prematuro y se explica por conos descolgados e insertos rotos, lo que indica que se puede elevar la productividad de las brocas en desmante.

La figura 35 muestra la relación de metros perforados y el costo de penetración por metro. La línea de tendencia es potencial debido a que no puede existir un costo negativo.

*Figura 39: Costo vs metros perforados*



La ecuación de cálculo del costo/metro es:

$$\frac{\$}{m} = 796 * mp^{-0.785}$$

Para hallar la influencia en la operación es necesario conocer el % de costo de brocas respecto al costo de total de perforación.

Este se puede estimar mediante los siguientes cálculos:

$$TDC = \frac{B}{M} + \frac{D}{ROP}$$

Donde:

- TDC: Costo total de Perforación (US\$/m)
- B: Costo de la broca (US\$)
- M: Total de metros perforados (m)
- D: Costo horario de la perforadora (US\$/h)
- ROP: Velocidad de Perforación (m/h)

Tabla 26: Datos para el cálculo de TDC

B (US\$)	M (m)	D (US\$/h)	ROP (m/h)
3730	4151	175	25.4

Obteniendo un Costo de Total perforación de 7.81 \$/m, y un Costo de penetración por broca de 1.15 \$/m, resulta que el costo de brocas representa un 14.7 % del costo total de perforación en esta Operación.

## 5. Validación

La validación la realizaremos para la unidad básica geotécnica (UBG) tres, donde la litología corresponde a Riólita-Porfírita, la alteración es Fílica- Argilítica y la mineralización primaria. Los valores geo mecánicos calculados son:

*Tabla 27: Valores geo mecánicos de UBG 3*

$\sigma_{ci}$ (Mpa.)	$\sigma_3$ (Mpa)	mb	s	a	$\sigma_1$ (Mpa)
73	10.65	0.34	0.0002	0.51	76.5

El diámetro de la broca es de 10 5/8 (usada para mineral), el empuje promedio es  $E_{prom} = 15107$  kg-f, según ecuación (9) y el giro  $N = 114$  RPM según ecuación (10).  
reemplazando en nuestro modelo tenemos que:

$$mp = 47 * \left[ 2 * \left( \frac{63.9 * 15107 * 119.27}{73.36^2 * (10.62 * 25.4)^{0.9}} \right) \right]^{0.65} - 70 = 1751.16$$

Es decir que se espera un rendimiento de 1751.16 metros antes de que la broca triconica falle en esa UBG.

El Pulldown (PD) o presión sobre la broca y velocidad de giro de la sarta de perforación (N) son los indicadores de eficiencia operativa que están a cargo de los perforistas. El PD necesario para lograr el metraje calculado se deduce de:

$$PD = (0.0002 * 1751.16) + 1.754 = 2.1 \text{ Mpa.}$$

Es decir que los perforistas no deben exceder un PD de 2.1 y mantener un N de 120 RPM. El costo de penetración esperado para este metraje es:

$$\frac{\$}{m} = 796 * 1751.16^{-0.785} = 2.26$$

El modelo optimiza las variables de diseño para alcanzar un rendimiento óptimo de las brocas triconicas.

### 5.1. Costo y Rendimiento de triconos

El modelo propuesto, que se muestra en la ecuación (28) indica el rendimiento óptimo de los triconos aplicando los correctos Índices Operacionales (Empuje, Pulldown).

En la siguiente tabla se compara el rendimiento real y el rendimiento óptimo aplicando el modelo.

Tabla 28: Comparación de Rendimiento de Brocas (Real – Optimo según modelo propuesto)

Perforadora	Condición Geomecanica	RENDIMIENTO REAL			RENDIMIENTO APLICANDO MODELO PROPUESTO		
		metros por broca (m)	PDC (\$/m)	PD (Mpa)	metros por broca (m)	PDC (\$/m)	PD (Mpa)
D11	UGB 7	879.7	4.24	2.06	1261.08	2.96	2.01
D11	UGB 7	829	4.50	1.6	1261.08	2.96	2.01
D11	UGB 7	865	4.31	1.39	1261.08	2.96	2.01
D11	UGB 3	908	4.11	1.56	1748.24	2.13	2.10
D11	UGB 3	1051	3.55	1.35	1748.24	2.13	2.10
D11	UGB 5	1244.8	3.00	1.46	2319.74	1.61	2.22
D11	UGB 9	1654.3	2.25	1.93	2024.37	1.84	2.16
D11	UGB 9	1502.1	2.48	1.53	2024.37	1.84	2.16
D11	UGB 9	1809	2.06	1.46	2024.37	1.84	2.16
D11	UGB 5	1145.8	3.26	1.62	2319.74	1.61	2.22
D16	UGB 5	1143.5	3.26	2.24	2319.74	1.61	2.22
D16	UGB 7	649.5	5.74	2.27	1261.08	2.96	2.01
D16	UGB 9	1847.2	2.02	2.32	2024.37	1.84	2.16
D17	UGB 5	1173.05	3.18	2.14	2319.74	1.61	2.22
D17	UGB 9	1585.2	2.35	1.95	2024.37	1.84	2.16
D17	UGB 2	2384.5	1.56	2.08	2496.18	1.49	2.25
D17	UGB 5	1241.65	3.00	2.22	2319.74	1.61	2.22
D17	UGB 7	935	3.99	2.3	1261.08	2.96	2.01
D17	UGB 9	1368.3	2.73	1.86	2024.37	1.84	2.16
D17	UGB 9	1334.2	2.80	2.28	2024.37	1.84	2.16
D17	UGB 9	1389.4	2.68	2.63	2024.37	1.84	2.16
D17	UGB 3	827.5	4.51	2.21	1748.24	2.13	2.10
D17	UGB 7	857	4.35	1.93	1261.08	2.96	2.01
D17	UGB 3	997	3.74	2.41	1748.24	2.13	2.10
D17	UGB 3	1013	3.68	1.44	1748.24	2.13	2.10
D17	UGB 3	1126	3.31	2.32	1748.24	2.13	2.10
D17	UGB 3	1175.7	3.17	2.19	1748.24	2.13	2.10
D17	UGB 5	1289.9	2.89	2.66	2319.74	1.61	2.22
D17	UGB 5	1342.5	2.78	1.77	2319.74	1.61	2.22
D17	UGB 5	1406.5	2.65	2.07	2319.74	1.61	2.22
D17	UGB 9	1966.5	1.90	1.72	2024.37	1.84	2.16
D17	UGB 3	879.3	4.24	2.46	1748.24	2.13	2.10
D17	UGB 5	1090.5	3.42	1.98	2319.74	1.61	2.22
D17	UGB 7	519.5	7.18	1.83	1261.08	2.96	2.01
D17	UGB 2	2257	1.65	1.88	2496.18	1.49	2.25

Se puede apreciar, un incremento en la vida útil de las brocas aplicando el modelo propuesto en esta investigación, así como una reducción en el PDC (\$/m) lo cual indica que la broca es más eficiente si se regula los parámetros Operacionales (Empuje promedio, Pulldown, Velocidad de Rotación).

## CONCLUSIONES

1. La eficiencia operativa de las brocas triconicas se mide en metros perforados y depende de tres variables principales: Empuje promedio (E<sub>prom</sub>) de la sarta de perforación sobre el tricono, este empuje es calculado en función al diámetro ( $\emptyset$ ) y la resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ) de la roca. La presión ejercida sobre el terreno (PD) que es calculada dividiendo el empuje promedio (E<sub>prom</sub>) entre el área del tricono y la “indentación” o altura de paso de los insertos (db), que es la de penetración del inserto en la roca durante el proceso de escariado de los conos, este se calcula en función a la velocidad media (VM), la velocidad de los conos (n<sub>x</sub>) y la velocidad de giro de la sarta de perforación (N). En el análisis estadístico de estas tres variables se concluyó que tienen una correlación lineal y directa que nos sirvió para evaluar el rendimiento óptimo de una broca triconica, donde los resultados evidencian que el rendimiento óptimo en mineral sería de 1751.16 m con un costo de penetración por metro (PDC) de 2.26 \$/m.
2. En la evaluación estadística del rendimiento de las brocas triconicas de la operación, se observó que existe una diferencia entre el comportamiento de las usadas en mineral y las usadas en desmonte. En mineral el histograma de frecuencias muestra una distribución normal para las fallas de los triconos, el rango duración más frecuente (16 brocas de 35 muestreados) está entre 1038 m a 1528 m, esto demuestra que las variables operativas de la perforación están correctas y se demuestra por que la falla más frecuente es por desgaste de faldones, que se considera una falla debido a desgaste final de la broca por uso y no a problemas de mala operación. En el caso de las brocas que trabajan en desmonte existe una

asimetría hacia los metrajes inferiores, la frecuencia de falla de los triconos (21 de 53 muestreados) están el rango es de 51m a 1751, lo que nos indica una mala operación durante la perforación debido a que la falla más frecuente es conos descolgados seguida por rotura de insertos. Esto implican exceso en la aplicación de como el empuje promedio que genera un mayor Pulldown y la mayor “indentación”.

3. Se determinó un modelo de predicción general para el metraje económico, es decir que el costo de penetración por metro (PDC) sea el menor posible para los triconos. El Modelo se calcula en base a la velocidad media alcanzada (VM), con la correcta aplicación del empuje promedio (Eprom), la velocidad de giro (N) y la “indentación” (dp). El indicador de una correcta operación en la perforación es el Pulldown, (PD), este debe ser calculado para que se aplique por el operador de la perforadora durante la penetración en el dominio geo mecánico donde se opera. La supervisión puede corregir permanentemente la variación de este indicador, ya que es monitoreado por los sistemas de despacho u otros dispositivos digitales, así se evita fallas prematuras por mala operación, causa observada frecuentemente en las zonas de desmonte.

## RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda dar seguimiento al desgaste de las brocas triconicas, sobre todo a aquellas que no llegan al rendimiento promedio (vida útil) del mismo dominio geo mecánico, ya que es un accesorio que se consume en cantidades importantes y frecuentemente, para esto se debe hacer un análisis in situ del rendimiento en cada dominio geo mecánico de la mina.
2. La velocidad de penetración en brocas triconicas constituye un indicador clave para el control de la eficiencia de operaciones en perforación por lo que debe ser siempre calculada en base a modelos matemáticos que relacionen la calidad de roca, el tipo de perforadoras y el tipo de brocas.
3. Para la aplicación de este modelo en operaciones diferentes a la del estudio se recomienda verificar los datos de campo con los que se obtiene en las ecuaciones planteadas, para así determinar un factor de corrección.
4. Para lograr una productividad alta en el uso de las brocas triconicas es necesario monitorear permanentemente las variables de presión o Pulldown, este monitoreo debe ser remoto usando herramientas digitales.

## REFERENCIAS

Ceballos Cabezas, L. M. A. (2019). *Modelo empírico para la evaluación económica de un yacimiento a rajo abierto* (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello).

Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Illinois Univ At Urbana Dept of Civil Engineering.

Bauer, A. L. A. N. (1971). Open pit drilling and blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 71(6), 115-121.

DE LINAN, C. A. C. (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas*. IGME.

Jerónimo de Moura, Yingjian Xiao, Jianming Yang, Stephen D. Butt, *An empirical model for the drilling performance prediction for roller-cone drill bits*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 204, 2021.

Jones, H. G., Norgren, S. M., Kritikos, M., Mingard, K. P., & Gee, M. G. (2017). Examination of wear damage to rock-mining hardmetal drill bits. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 66, 1-10.

Hamed Rafezi, Ferri Hassani, Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring, *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 31, Issue 2, 2021, Pages 187-195, ISSN 2095-2686,

Hoek, E., & Brown, E. (1997). Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica. *Primer Taller Geotécnico Interdivisional. Chuquicamata-Chile*.

Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 203-215.

Hoek, E., & Karzulovic, A. (2000). Rock mass properties for surface mines. *Slope Stability in Surface Mining*, WA Hustrulid, MK McCarter and DJA van Zyl, Eds, Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), Littleton, CO, 59-70.

Halliburton. Roller Cone Drill Bits. IADC Dull Grading; 2009.

INACAP Chile; [http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-geomatica/AAI\\_OPEX01\\_Material\\_Extraccion\\_Mina\\_I\\_Perforacion.pdf](http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-geomatica/AAI_OPEX01_Material_Extraccion_Mina_I_Perforacion.pdf)

Naganawa S. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *J Petrol Sci Eng* 2012; 82:140–50.

Patton, F. D. (1966, September). Multiple modes of shear failure in rock. In *1st ISRM Congress*. OnePetro.

Poletto F, Miranda F. Seismic while drilling: Fundamentals of drill-bit seismic for exploration. *Handbook of Geophys Exploration: Seismic Exploration* (Volume 2004;35): Elsevier.

Rafid K. Abbas, Ali Ghanbarzadeh, Ali Hassanpour, *A novel method for estimating the real-time dullness of tri-cone oil drill bits*, Engineering Failure Analysis, Volume 109,2020.

Rafezi, H., & Hassani, F. (2021). Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(2), 187-195.

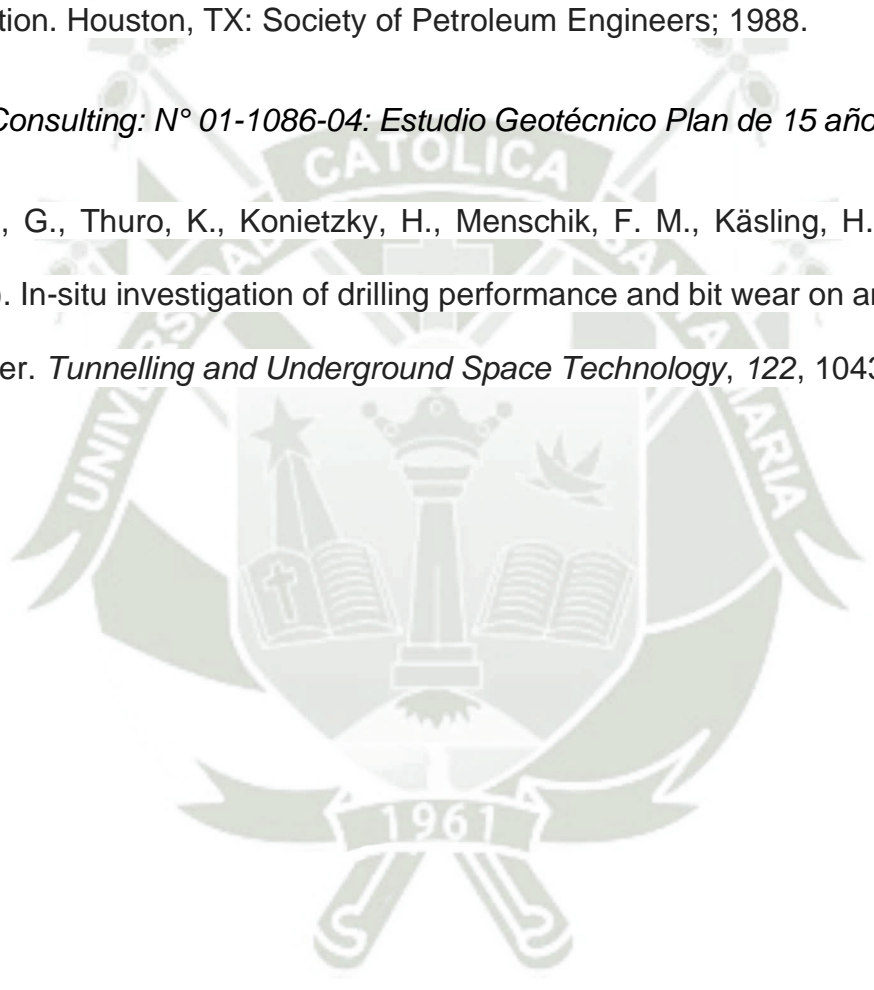
Rodrigo, J. A. (2016). Validación de modelos de regresión: Cross-validation, OneLeaveOut, Bootstrap.

Saeidi, O., Rostami, J., Ataei, M., & Torabi, S. R. (2014). Use of digital image processing techniques for evaluating wear of cemented carbide bits in rotary drilling. *Automation in construction*, 44, 140-151.

Sheppard MC, Lesage M. Forces at the teeth of a drilling rollercone bit: Theory and experiment. In: Proceedings of the 1988 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, TX: Society of Petroleum Engineers; 1988.

*SRK Consulting: N° 01-1086-04: Estudio Geotécnico Plan de 15 años, Tajo (2021).*

Zhang, G., Thuro, K., Konietzky, H., Menschik, F. M., Käsling, H., & Bayerl, M. (2022). In-situ investigation of drilling performance and bit wear on an electrical drill hammer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 122, 104348.





## ANEXO 1

EQUIPO	N° SERIE	INGRESO	SALIDA	MARCA	MODELO	MEDIDA	RECORRIDO (m)	N° TALADROS	TIEMPO (hrs)	VELOCIDAD PENETRACION (m/h)	DIAS	PDC (US\$/m)	RAZÓN DE DESCARTE	ESTADO
D11	1662853	2020/12/31 09:08:38	05/01/2021 01:56	Varel	RB-60	12 1/4	1218.00	74	68	17.92	3	3.13	Insertos Rotos	MUERTA
	1662840	2021/01/05 01:59:11	09/01/2021 18:25	Varel	RB-60	12 1/4	1159.00	70	64	18.03	3	3.29	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	1661476	2021/01/09 18:25:53	15/01/2021 15:56	Varel	RB-60	12 1/4	1224.50	74	75	16.26	3		Polines Sobrepuestos	MUERTA
	1661472	2021/01/15 15:56:53	20/01/2021 17:21	Varel	RB-60	12 1/4	1179.50	72	59	19.88	2	3.23	Insertos Rotos	MUERTA
	1661476	2021/01/20 17:21:23	23/01/2021 01:35	Varel	RB-60	12 1/4	51.00	3	1	37.50	0		Cambio de Terreno	MUERTA
	8905275	2021/01/23 01:35:31	24/01/2021 23:22	CENERG	CN70	10 5/8	879.70	58	29	30.55	1	3.41	Insertos Rotos	MUERTA
D13	8905319	2021/01/24 23:22:07	25/01/2021 11:05	CENERG	CN70	10 5/8	58.00	4	2	23.72	0		Cambio de Terreno	MUERTA
	1661481	2020/12/29 09:08:35	09/01/2021 02:32	Varel	RB-60	12 1/4	5598.80	341	138	40.54	6	0.68	Conos Descolgados	MUERTA
D14	1662844	2021/01/09 02:32:51	23/01/2021 14:52	Varel	RB-60	12 1/4	6334.50	423	152	41.65	6	0.60	Insertos Rotos	MUERTA
	1661478	2020/12/27 18:51:55	06/01/2021 11:56	Varel	RB-60	12 1/4	2959.20	180	79	37.42	3	1.29	Insertos Rotos	MUERTA
	1662837	2021/01/06 11:56:13	10/01/2021 15:32	Varel	RB-60	12 1/4	2038.70	126	65	31.43	3	1.87	Conos Descolgados	MUERTA
	1614342	2021/01/10 15:32:54	17/01/2021 18:05	Varel	RB-53	12 1/4	2410.55	145	76	31.70	3	1.55	Polines Sobrepuestos	MUERTA
D16	1658918	2021/01/17 18:05:54	28/01/2021 20:38	Varel	RB-60	12 1/4	1378.20	83	58	23.58	2	2.76	Insertos Rotos	MUERTA
	M006788001	2020/12/24 15:01:49	18/01/2021 17:09	Sandvik	40QX2	12 1/4	2582.60	154	69	37.53	3		Cambio de Terreno	MUERTA
	8905280	2021/01/18 17:09:59	22/01/2021 01:15	CENERG	CN70	10 5/8	1145.80	71	34	33.27	1	2.62	Conos Descolgados	MUERTA
	8905283	2021/01/22 01:15:28	23/01/2021 22:55	CENERG	CN70	10 5/8	1143.50	69	34	33.76	1	2.62	Insertos Rotos	MUERTA
D17	8905274	2021/01/23 22:55:27	25/01/2021 10:48	CENERG	CN70	10 5/8	649.50	41	19	34.44	1		Cambio de Terreno	MUERTA
	1667493	2020/01/23 18:02:58	07/01/2021 22:24	Varel	RB-67	10 5/8	1847.20	112	64	31.84	3	1.75	Conos Descolgados	MUERTA
	1667471	2021/01/07 22:24:12	10/01/2021 10:21	Varel	RB-67	10 5/8	1173.05	72	40	28.98	2	2.75	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	1667478	2021/01/10 10:21:53	14/01/2021 22:08	Varel	RB-67	10 5/8	1585.20	96	51	30.93	2	2.04	Conos Descolgados	MUERTA
	1667481	2021/01/14 22:08:27	15/01/2021 15:49	Varel	RB-67	10 5/8	2384.50	145	80	33.05	3	1.35	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	8905798	2021/01/15 15:49:50	17/01/2021 22:52	CENERG	CN70	10 5/8	1241.65	78	36	34.25	2	2.42	Rotura de cono	MUERTA
	8905277	2021/01/17 22:52:24	20/01/2021 02:34	CENERG	CN70	10 5/8	935.00	60	34	27.58	1	3.21	Rotura de cono	MUERTA
	8905433	2021/01/20 02:34:02	24/01/2021 21:40	CENERG	CN70	10 5/8	1368.30	85	40	33.85	2	2.19	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	8905278	2021/01/24 21:40:32	28/01/2021 02:29	CENERG	CN70	10 5/8	1334.20	86	34	39.14	1	2.25	Conos Descolgados	MUERTA
	8905322	2021/01/28 02:29:29	31/01/2021 00:02	CENERG	CN70	10 5/8	1389.40	87	42	32.82	2	2.16	Polines Sobrepuestos	MUERTA
D18	1638017	2020/12/18 15:42:26	03/01/2021 13:38	Varel	RB-53	12 1/4	2465.70	149	58	42.61	2	1.52	Conos Descolgados	MUERTA
	1614341	2021/01/03 13:38:53	12/01/2021 08:00	Varel	RB-53	12 1/4	4222.00	253	114	36.92	5	0.89	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	1614345	2021/01/12 08:00:48	25/01/2021 05:26	Varel	RB-53	12 1/4	3438.50	209	85	40.41	4	1.09	Polines Sobrepuestos	MUERTA

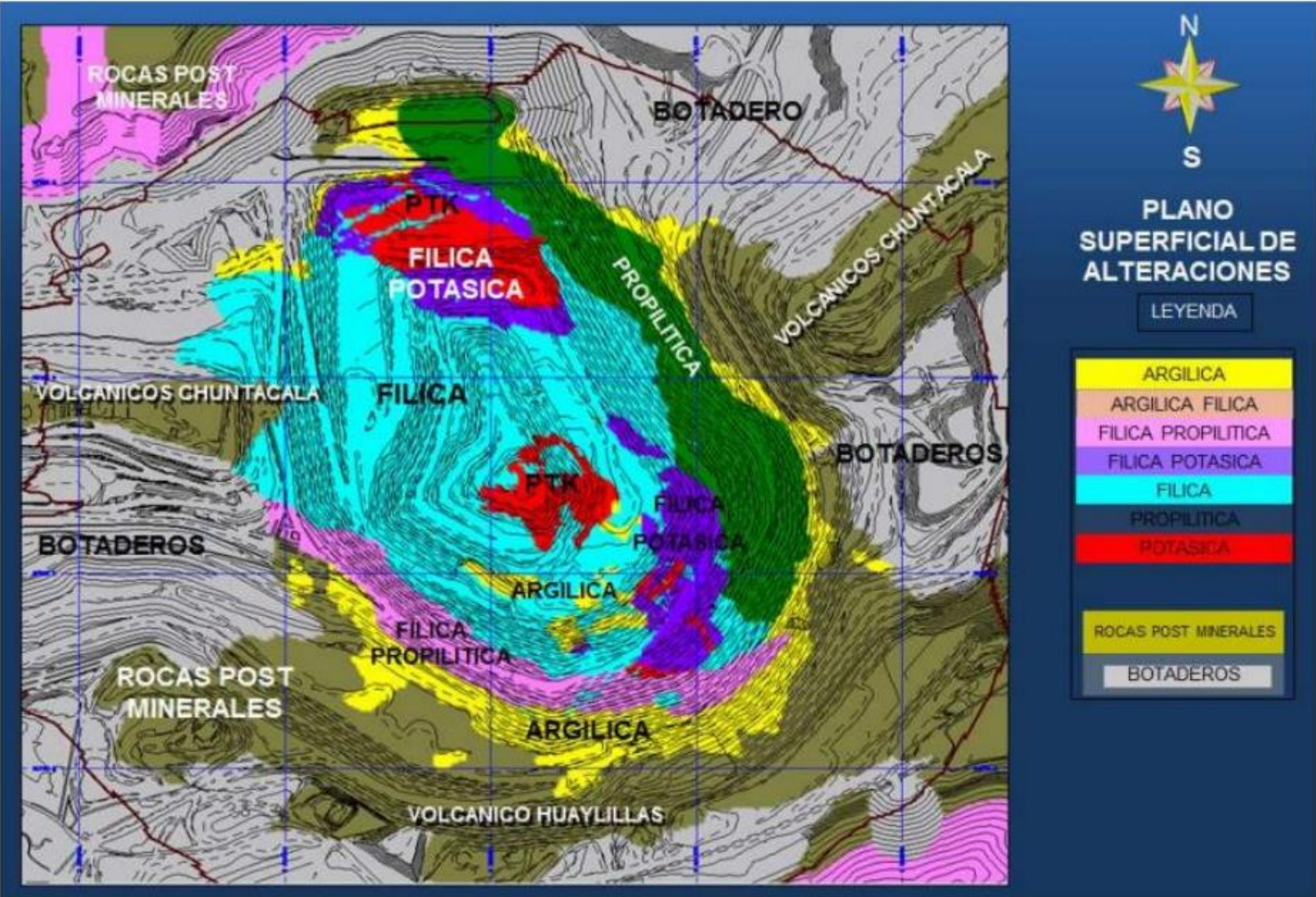
## ANEXO 2

EQUIPO	N° SERIE	INGRESO	SALIDA	MARCA	MODELO	MEDIDA	RECORRIDO (m)	N° TALADROS	TIEMPO (hrs)	VELOCIDAD PENETRACION (m/h)	DIAS	PDC (US\$/m)	RAZÓN DE DESCARTE	ESTADO
D11	821010768	27/02/2021 23:59	04/03/2021 13:33	CENERG	CN64	10 5/8	1,502.10	94	69.20	21.71	2.9	2.00	Rotura de cono	MUERTA
	821011714	04/03/2021 13:33	09/03/2021 21:43	CENERG	CN64	10 5/8	1,809.00	113	75.24	24.04	3.1	1.66	Faldones Desgastados	MUERTA
D13	1662835	08/03/2021 09:42	08/03/2021 16:24	Varel	RB-60	12 1/4	5,906.20	361	145.81	60.85	6.0	13.25	Conos Descolgados	MUERTA
	1600886	08/03/2021 16:24	16/03/2021 05:31	Varel	RB-53	12 1/4	5,215.10	316	128.53	45.31	5.4	0.83	Conos Descolgados	MUERTA
	1600891	16/03/2021 05:31	17/03/2021 07:56	Varel	RB-53	12 1/4	560.50	34	18.69	29.99	0.8	6.68	Insertos Rotos	MUERTA
D14	1614348	19/02/2021 13:49	03/03/2021 13:22	Varel	RB-53	12 1/4	6,711.50	406	160.86	41.72	6.7	0.55	Conos Descolgados	MUERTA
	M006788002	03/03/2021 13:22	04/03/2021 17:01	Sandvik	40QX2	12 1/4	539.50	34	12.69	42.50	0.5	16.92	Cambio de Terreno	MUERTA
	1658879	04/03/2021 17:01	10/03/2021 05:27	Varel	RB-60	12 1/4	1,817.10	109	73.00	24.89	3.0	2.10	Insertos Rotos	MUERTA
	1658880	10/03/2021 05:27	14/03/2021 01:25	Varel	RB-60	12 1/4	1,507.50	89	49.14	30.67	2.0	2.54	Insertos Rotos	MUERTA
D16	1660595	14/03/2021 01:25	16/03/2021 21:27	Varel	RB-60	12 1/4	1,205.40	73	36.71	32.84	1.5	3.17	Insertos Rotos	MUERTA
	1662843	28/02/2021 08:06	04/03/2021 14:36	Varel	RB-60	12 1/4	1,291.60	79	52.82	24.45	2.2	2.95	Insertos Rotos	MUERTA
	1658927	04/03/2021 14:36	09/03/2021 00:31	Varel	RB-60	12 1/4	1,474.70	88	56.25	26.22	2.3	2.59	Rotura de cono	MUERTA
D17	1658897	09/03/2021 00:31	14/03/2021 11:27	Varel	RB-60	12 1/4	2,007.50	119	76.36	26.29	3.2	1.90	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	8905274	28/02/2021 22:01	01/03/2021 15:05	CENERG	CN70	10 5/8	879.30	55	28.21	29.50	1.2	13.05	Insertos Rotos	MUERTA
	820121392	01/03/2021 15:05	04/03/2021 09:09	CENERG	CN64SS	10 5/8	1,090.50	68	40.12	27.18	1.7	2.75	Polines Sobrepuestos	MUERTA
	820121378	04/03/2021 09:09	05/03/2021 16:23	CENERG	CN64SS	10 5/8	519.50	32	18.61	27.91	0.8	5.77	Faldones Desgastados	MUERTA
	1600879	06/03/2021 12:39	13/03/2021 17:13	Varel	RB-53	12 1/4	2,881.80	178	89.00	32.38	3.7	1.30	Polines Sobrepuestos	MUERTA
D18	1600892	16/03/2021 21:42	17/03/2021 14:08	Varel	RB-53	12 1/4	996.00	62	24.37	41.61	1.0	9.43	Cambio de Terreno	MUERTA
	1662842	22/02/2021 20:36	01/03/2021 18:26	Varel	RB-60	12 1/4	2,787.50	168	94.20	29.59	3.9	1.37	Conos Descolgados	MUERTA
	1662836	01/03/2021 18:26	08/03/2021 02:02	Varel	RB-60	12 1/4	2,938.80	184	109.72	26.78	4.6	1.30	Conos Descolgados	MUERTA
	1658885	08/03/2021 02:02	11/03/2021 22:18	Varel	RB-60	12 1/4	1,720.00	108	61.98	27.75	2.6	2.22	Insertos Rotos	MUERTA
	1660597	11/03/2021 22:18	16/03/2021 22:18	Varel	RB-60	12 1/4	1,992.50	121	67.96	29.32	2.8	1.92	Insertos Rotos	MUERTA

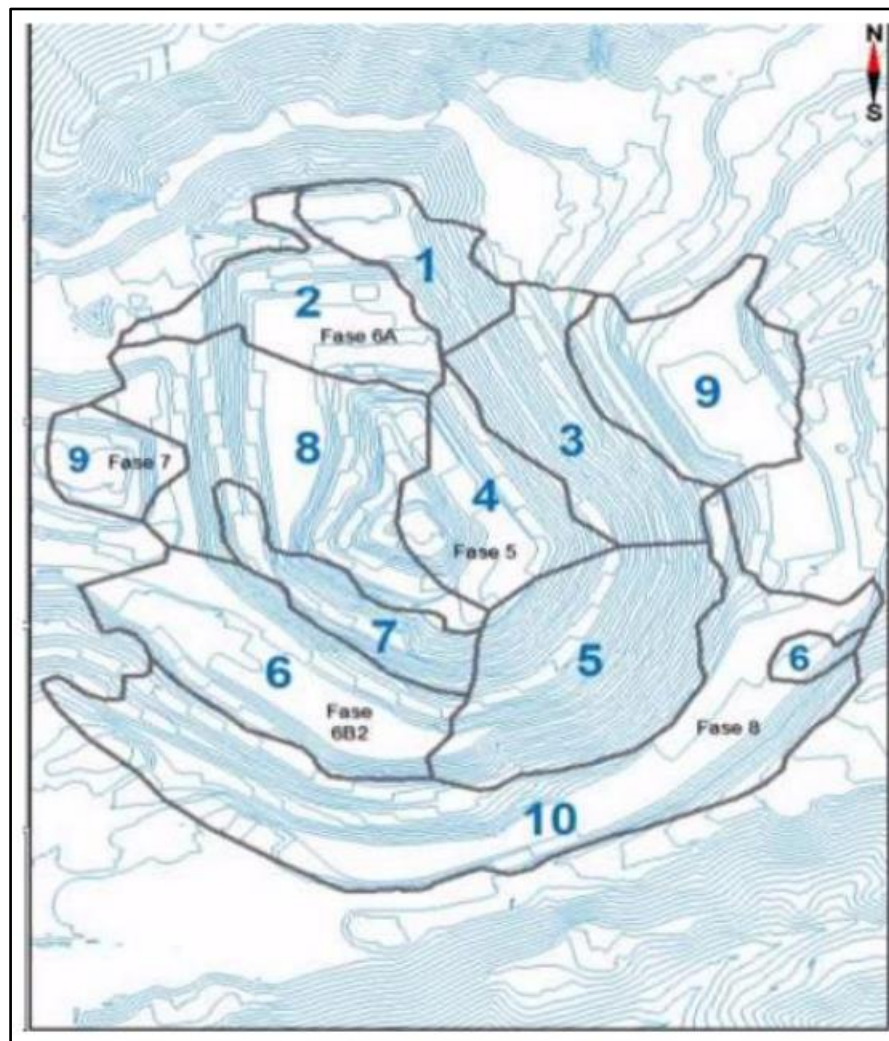
# ANEXO 3

LITO	CÓDIGOS	LITOLOGÍA	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS			NUEVA UG	%				
					LITO	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN						
1	LP	LATITA PORFIRITICA	POTÁSICA (Biotita, magnetita, Silice, Orto, Anhidrita) PROPLITICA (Clorita, Calcita, Epidota, Pirita) FILICA (Silice, Sericita, Pirita) ARGILICO SUPÉGENO Arcillas (Caolinita, Montmorillonita, Illita) FILICO POTÁSICO (Biotita, magnetita, Silice, Sericita, Epidota, Pirita) FILICO PROPLITICO (Clorita, Sericita, Silice, Epidota, Pirita) FILICO ARGILICO (Silice, Sericita, Caolinita, Illita) LIXIVIADO (LEACHED CAPPING) OXIDOS ENRIQUECIDO TRANSICIONAL PRIMARIO		LATITA	FRESCA-FILICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 1	6.1				
	BLP	LATITA PORFIRITICA ESTERIL											
	DK	DIQUE DE LATITA PORFIRITICA											
	LP3	LATITA PORFIRITICA LP3											
2	RP	RIOLITA PORFIRITICA			BA	POTASICA	PRIMARIO	UGB 2	2.0				
3	BA	ANDESITA BASALTICA											
4	IA	ANDESITA INTRUSIVA			IA	FILICA-ARGILICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 3	0.3				
	DI	DIORITA											
	DÓ	DOLERITA											
5	BX-IA	BRECHA DE ANDESITA INTRUSIVA			BRECHA	ARGILICA	OX-LIX-ENR-TRANS	UGB 4	0.9				
	BX-BLP	BRECHA DE BLP											
	BX-RP	BRECHA DE RIOLITA PORFIRITICA											
	BX-BA	BRECHA DE ANDESITA BASALTICA											
	PX	PEBBLE BRECHA											
	BX-LP	BRECHA DE LATITA PORFIRITICA											
	BXT	BRECHA TURMALINA											
6	PA	ANDESITA PORFIRITICA			TI	PROPILITICA-FILICA_POTASICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 6	1.1				
	AS	AGLOMERADO SUPERIOR											
	AI	AGLOMERADO INFERIOR											
	TS	TOBA SUPERIOR											
	TI	TOBA INFERIOR											
7	TC	TOBA CRISTAL	TC	FILICA	PRIMARIO-WASTE	UGB 9	1.6						
8	TBM	TOBA MICÁCEA											
	CB	CONGLOMERADO BASAL											
	TBC	TOBA CAFÉ											
	CR	CONGLOMERADO RIOLITICO											
9	TR	TRAQUITA	TR	PROPILITICA	WASTE	UGB 10	1.9						
	TBTR	TOBA TRAQUITICA											
10	AT	AGLOMERADO TOBÁCEO	TB	FILICA	WASTE	UGB 11	0.0						
	AG	AGLOMERADO GRIS											
	TB	TOBA BLANCA											
	CA/CV	CONG. AMARILLO/CONG. VERDE											
	AGTR	AGLOMERADO TRAQUITICO											
	CTR	CONGLOMERADO TRAQUITICO											
	TRE	TOBA RETRABAJADA											
	AB	AGLOMERADO BLANCO											
	11	TSA						TOBA SALMÓN	TSA			UGB 12	0.2
	12	VT						VITROFIRO	VT				UGB 13
AL		ALLUVIAL											
13	STOKm	STOCK MRAL	COB				UGB 14	1.4					
	BOTd	ROT. DESMONTE											
							UGB 15	0.3					
							UGB 16	3.1					
							UGB 17	0.3					
							UGB 18	0.3					
							UGB 19	0.0					
					OX-LIX-ENR-TRANS		UGB 20	1.0					
						COVER + BOTADERO	UGB 21	2.6					

ANEXO 4



ANEXO 5



ANEXO 6

