LA IMPORTANCIA DE LA PERFORABILIDAD DE LAS ROCAS EN LA EFICIENCIA DE PERFORACION

Neíl Ramírez Valerio
NR INGENIEROS S.A.C
neilramirez@nrigeneiros.com.pe

RESUMEN.

Uno de los aspectos más importantes en la elaboración de los planes de producciónes la determinación de la capacidad productiva de los equipos para las condiciones de una operación minera.

La capacidad productiva de los equipos está relacionada con los tipos de maquinarias seleccionadas y de las condiciones geológicas ymineras del yacimiento.

El reconocimiento de las condiciones geológico mineras, consiste en realizar estudios de las estructuras, fallas y la litología de las rocas, así como estudios geomecánicos del yacimiento. Estos estudios deberían iniciarse en la etapa de exploración con el mapeo geotécnico de los testigos de los sondajes diamantinos, realizando ensayos de carga puntual, de corte indirecto, compresión simple y compresión triaxial, determinándose de esta manera la calidad de las rocas.

Dada la complejidad de las rocas anisotrópicas con las que tienen que tratar las operaciones mineras, los ensayos de campo ayudan a encontrar indicadores que faciliten pronosticar los resultados de operación.

Uno de los aspectos que influyen la determinación de la eficiencia de la perforación, es la perforabilidad de las rocas.

La perforabilidad de las rocas es el indicador físico técnico que sirve para comparar la calidad de las rocas a la penetración durante la perforación y la perforabilidad se puede determinar extrapolando resultados de estudios de campo, mediante fórmulas empíricas y ensayos de laboratorio.

Los estudios realizados sobre la perforabilidad de las rocas en forma experimental han permitido establecer indicadores de perforabilidad de algunas rocas con relación a la compresión simple, que permitiría determinar la velocidad de perforación, factor importante en la determinación de la capacidad productiva de las perforadoras.

INTRODUCCIÓN

La perforación es un proceso laborioso y de alto costo que consiste en la preparación de huecos o taladros en el macizo rocoso para efectuar la voladura.La eficiencia de la perforación de taladros depende de los siguientes factores:

- Capacidad de penetración en las rocas por acción de la broca (factor principal), que está dado por: la presión axial, velocidad de rotación y la evacuación del detritus durante la perforación.
- Tipo y forma de la broca.

- Método de acción en el fondo del taladro (percusión, rotación y roto percusión, etc).
- Esfuerzo y velocidad de acción con los que se actúan sobre el taladro.
- Diámetro del taladro.
- Profundidad de perforación.
- Velocidad de expulsión de detritus.
- Organización y escala de producción de la voladura.

Estos factores constituyen los parámetros tecnológicos de la perforación, yque se eligen sobre todo por la perforabilidad de las rocas.

Por otro lado, la perforabilidad de las rocas depende en gran medida de la forma que tienen las brocas, entre otros factores, hallándose de esta manera la capacidad de triturar la roca en el fondo del taladro.

Por otro lado; el proceso de perforación está dentro de las actividades productivas de perforación, cuya distribución de tiempos se muestra en el Cuadro N°1

Cuadro 1 Principales actividades del tiempo productivo en perforación

Tiempo en preparación y finalización del trabajo operativo (t_{pfo})	Tiempo en ciclo de perforación (T_{ef})	
	Operaciones auxiliares (t_{oa})	Operación neta de perforación (t_{np})
Arranque y calentamiento del equipo	Desplazamiento de taladro a taladro **($t_{tra-per}$)**	Perforación neta **(t_{np})**
Desplazamiento al primer taladro	Nivelación perforadora **($t_{niv-per}$)**	
Acomodo al finalizar la guardia	Plegamiento de gata **($t_{ple-gat}$)**	
	Izaje de barras de perforación **($t_{iza-barr}$)**	
	Barrido de detritus **($t_{barr-det}$)**	

Si bien el tiempo en preparación y finalización del turno de perforación (t_{pfo}) es parte complementaria de la operación de perforación, constituyen tiempos de las demoras operativas de perforación (t_{do}).

Las operaciones en ciclo de perforación, son lostiempos que se emplean en las operaciones auxiliares (t_{oa}) y la perforación neta (t_{np}).

La operación neta de perforación es actividad de perforación propiamente dicha, depende de la perforabilidad de las rocas. El tiempo empleado en perforación se denominan tiempo neto de perforación (t_{np}).

Las operaciones del ciclo de perforación constituyen las actividades productivas del proceso de perforación y se denomina tiempo efectivo de trabajo (T_{ef}).

$$T_{ef} = t_{cp}$$

$$T_{ef} = t_{oa} + t_{np}$$

El tiempo efectivo del ciclo de perforación (T_{ef}) es el tiempo productivo de las operaciones de perforación.

$$t_{oa} = (t_{niv_per} + t_{ple_ga} + t_{tras} + t_{i_barr} + t_{barr})$$

Dónde:

$t_{niv\text{-}per}$	Tiempo de nivelación de la perforadora.
$t_{ple\text{-}ga}$	Tiempo de plegamiento de las gatas.
t_{tras}	Tiempo de desplazamiento de taladro a taladro.
$t_{i\text{-}barr}$	Tiempo de izaje de barras.
t_{barr}	Tiempo de barrido y rectificación de taladro.

CARACTERÍSTICAS DE LA PERFORABILIDAD DE LAS ROCAS.

La perforabilidad de las rocas es el indicador físico técnico que sirve para comparar la calidad de las rocas a la penetración durante la perforación.

La perforabilidad se puede determinar: extrapolando resultados de estudios de campo, mediante fórmulas empíricas y ensayos de laboratorio.

La velocidad de penetración (V_p) para determinada clase de terreno perforado, con un tipo y modelo de perforadora, sirve para determinar la eficiencia del equipo de perforación.

La perforabilidad de las rocas puede ser determinada, mediante la siguiente fórmula empírica.

$$R_{perf} = 0.007 \times (\sigma_c + \sigma_t) + 0.7\gamma$$

Dónde:

R_{perf}	Perforabilidad
σ_c	Resistencia límite de la roca a la compresión
σ_t	Resistencia límite de la roca al corte
γ	Peso específico de la roca.

Las rocas por su perforabilidad se clasifican en 25 categorías y se sub dividen en cinco clases.

Cuadro 2 Clasificación de las rocas por su perforabilidad

DESCRIPCIÓN DE LA PERFORABILIDAD	CLASE	PERFORABILIDAD R_{pef}	CATEGORIA
Suave	I	R_{perf} = 1.0 – 5.0	1,2,3,4,5
Media	II	R_{perf} = 5.1 – 10	6,7,8,9,10
Difícil	III	R_{perf} = 10.1 - 15	11,12,13,14,15
Muy difícil	IV	R_{perf} = 15.1 – 20	16,17,18,19,20
Extremadamente difícil	V	R_{perf} = 20.1 - 25	21,22,23,24,25

DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE PERFORABILIDAD EN FORMA EXPERIMENTAL

Estudios de perforabilidad realizados en brocas de 12 ¼" de diámetro en relación a la resistencia de compresión simple de las rocas, en diferentes litologías de rocas, permitió elaborar el Cuadro N°2, donde se establece la relación de la velocidad de perforación y la resistencia compresiva de las rocas.

Si bien es cierto que la velocidad de perforación (V_p) depende de múltiples factores (diámetro de broca, velocidad de rotación, presión que se ejerce en la broca, presión y caudal de aire para limpieza del detrito, tipo de roca, entre otros), por lo que es complejo establecer parámetros o estándares de velocidad.

En el registro de datos de campo se tomó en cuenta estas variables yal correlacionar los resultados con los parámetros geomecánicos del modelo geotécnico se encontró cierta relación.Para verificar los resultados se tomó datos de perforación en distintas zonas del tajo y los resultados fueron similares a los datos obtenidos inicialmente.

Se ha observado que durante la perforación el perforista aplica la presión sobre la broca de acuerdo a la calidad de la roca, es decir trata de aplicar una fuerza proporcional a la resistencia compresiva.Por ejemplo; para una roca de resistencia compresiva de 30 Mpase aplica una fuerza X1 y para una roca de 75 Mpa se aplica una fuerza de X2 con la finalidad de obtener una velocidad de penetración "constante", como las rocas no son homogéneas se obtienen distintas velocidades de penetración.

Para encontrar una relación entre la velocidad vs calidad de la roca a perforar, se ha establecido el Factor de Resistencia (F_{ucs}).

Factor de resistencia compresiva.

El factor de resistencia compresiva (F_{ucs}) es la relación de la resistencia a compresión simple de la roca σ_c (Mpa) multiplicado por 10 y dividido entre la velocidad de perforación (m/min).

$$F_{cus} = \frac{10 \times \sigma_c}{V_p} \text{, Mpa/(m/min)}$$

Dónde:

σ_c Resistencia a compresión simple, Mpa.
V_p Velocidad de perforación, m/min

Velocidad de perforación.

La velocidad de perforación está dada por la *perforabilidad de las rocas*, que es el indicador de la calidad de las rocas a la perforación.

La perforabilidad de las rocas, es la capacidad de resistencia de las rocas a la penetración de la broca durante la perforación en una unidad de tiempo. Este parámetro

se halla experimentalmente o bien se asume de acuerdo a las experiencias de campo o de laboratorio.

En el Cuadros N°3, se muestran: longitud de taladro perforado (m), tiempo neto de perforación (min), pulldown (psi) y la resistencia de compresión simple (Mpa). En base a estos datos se determinó la velocidad de perforación (m/min) y el factor de resistencia compresiva (F_{ucs}).

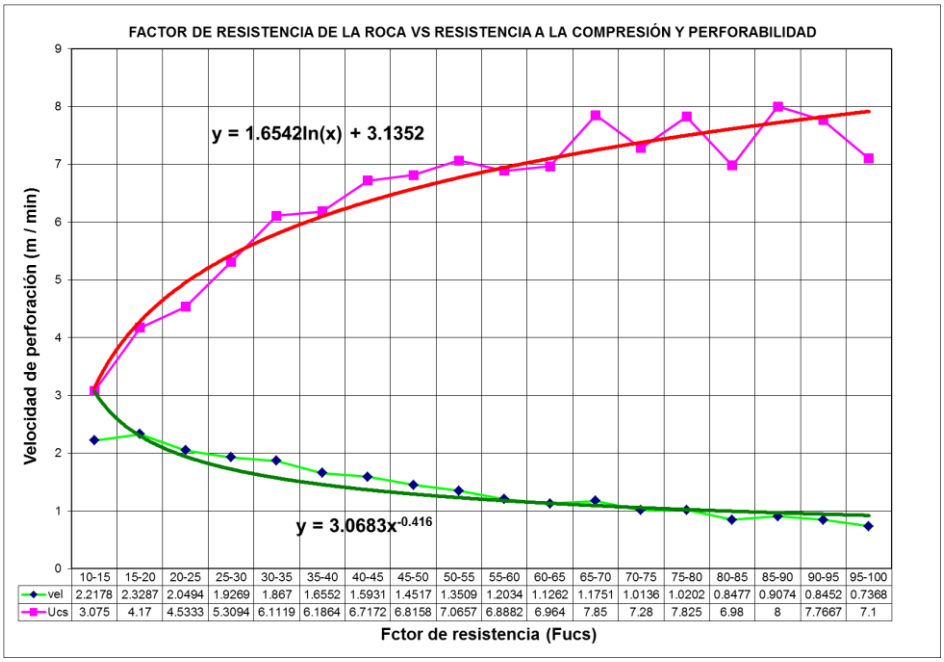
Debemos aclarar que en el presente estudio la resistencia de compresión simple de las rocas (σ_c) se divide entre 10, solo por criterio de escala, para la representación gráfica de los resultados.

Cuadro 3 Tiempo neto de perforación respecto a la resistencia a compresión simple de las rocas

N°	**Longitud de taladro (Lt)**	**Tiempo de perforación neta (T_{np})**	**Pulldown (psi)**	**Resistencia de compresión simple (UCS))**	**Velocidad de perforación (m/min)**	**Factor de resistencia compresiva**
	(m)	**(min)**	**(psi)**	**(Mpa)**	**(m/min)**	**F_{ucs}**
1	16.29	7.5	2,658	3.08	2.2	13.9
2	15.94	7.3	2,463	4.2	2.3	18.0
3	16.58	8.2	2,637	4.5	2.0	22.1
4	14.93	8.0	2,813	5.3	1.9	27.6
5	15.17	8.4	2,730	6.1	1.9	32.8
6	15.27	9.4	2,841	6.2	1.7	37.4
7	15.46	9.9	2,743	6.7	1.6	42.2
8	14.64	10.3	2,755	6.8	1.5	47.0
9	14.03	10.5	2,485	7.1	1.4	52.3
10	14.26	12.1	2,573	6.9	1.2	57.3
11	13.42	12.1	2,350	7.0	1.1	61.9
12	14.15	12.4	2,506	7.9	1.2	66.8
13	13.61	13.8	2,300	7.3	1.0	71.9
14	13.19	13.6	2,523	7.8	1.0	76.6
15	13.70	16.2	2,294	7.0	0.8	82.3
16	11.00	12.2	2,088	8.0	0.9	88.1
17	12.50	15.0	2,382	7.8	0.8	91.8
18	13.85	18.8	2,025	7.1	0.7	96.4

En el Cuadro N° 3 se resume resultados de más de 500 datos registrados y agrupados en intervalos denominados “intervalos del factor de resistencia”.

Gráfico 1 Factor de resistencia respecto a la velocidad de perforación y resistencia a compresión simple de las rocas



Velocidad de perforación vs resistencia compresiva de las rocas.

Durante la perforación, se ha tomado el tiempo de perforación neta, cuando se perforaba un determinado tipo de roca. En base al modelo de bloque geotécnico existente de la zona de perforación, se estableció la relación entre la velocidad de perforación y la calidad de la roca por la resistencia compresiva. Cuyo resumen se muestra en el Cuadro N°4.

Cuadro 4 Relación de velocidad de perforación vs resistencia a la compresión simple

N°	Intervalos del factor de resistencia Fucs	Velocidad de perforación (Vp)	Resistencia compresión simple (UCS)
	((Mpa/10)/(m/min))	(m/min)	(Mpa)
1	10-15	3.1	31.35
2	15-20	2.3	42.82
3	20-25	1.9	49.53
4	25-30	1.7	54.28
5	30-35	1.6	57.98
6	35-40	1.5	60.99
7	40-45	1.4	63.54
8	45-50	1.3	65.75
9	50-55	1.2	67.70
10	55-60	1.2	69.44
11	60-65	1.1	71.02
12	65-70	1.1	72.46
13	70-75	1.1	73.78
14	75-80	1.0	75.01
15	80-85	1.0	76.15
16	85-90	1.0	77.22
17	90-95	0.9	78.22
18	95-100	0.9	79.16

Velocidad de perforación respecto a la resistencia compresiva y RQD de las rocas.

El registro de datos de las características geomecánicas de las rocas durante las perforaciones diamantinas en la etapa de exploración y durante el desarrollo de las operaciones, cobra importancia no solo para el cálculo de recursos y reservas, sino además puede ser utilizada en las operaciones de perforación y voladura, con esta finalidad se necesita elaborar el modelo geotécnico de bloques que incluye las resistencia a la compresión simple, resistencia a la carga puntual, resistencia al corte, RQD.

En el presente estudio se ha utilizado el modelo de bloques geotécnico desarrollado por el área de geotecnia de la empresa BHP BillitonTintaya.

En base a estudios de tiempos y movimientos realizados en operaciones de perforación, se han obtenido los datos de perforación de taladros en diferentes "*polígonos programados*", cuyos datos fueron procesados para obtener resultados de velocidad de perforación. Estos resultados se han correlacionado con las características geotécnicas del modelo geotécnico respectivo, cuyos resultados se muestra en el Cuadro N°5.

En el Cuadro N°5, se muestra el tiempo de perforación, pulldown de perforación (psi), el factor de resistencia a la compresión (F_{ucs}), la calidad de la roca por RQD hallado durante el logeo de los sondajes diamantinos.

Cuadro 5 Velocidad de perforación respecto al factor de resistencia y RQD de la roca

Tiempo de perforación (min)	Pull Down (PSI)	Calidad deroca (RQD)	Velocidad de perforación (m/min)	Factor de resistencia compresiva (F_{ucs})	Intervalos de factor de resistencia compresiva
9	2507	17.5	1.988	8.77	5-10
10	2630	21.3	1.777	12.09	10-15
12	2669	23.9	1.417	17.01	15-20
10	2775	39.4	1.709	23.15	20-25
10	2806	43.6	1.613	27.11	25-30
11	2950	47.9	1.503	31.85	30-35
12	2867	52.2	1.415	37.20	35-40
14	2933	52.7	1.225	42.85	40-45
17	3000	46.3	0.998	46.75	45-50

Gráfico 2 Factor de resistencia de la roca vs velocidad de perforación

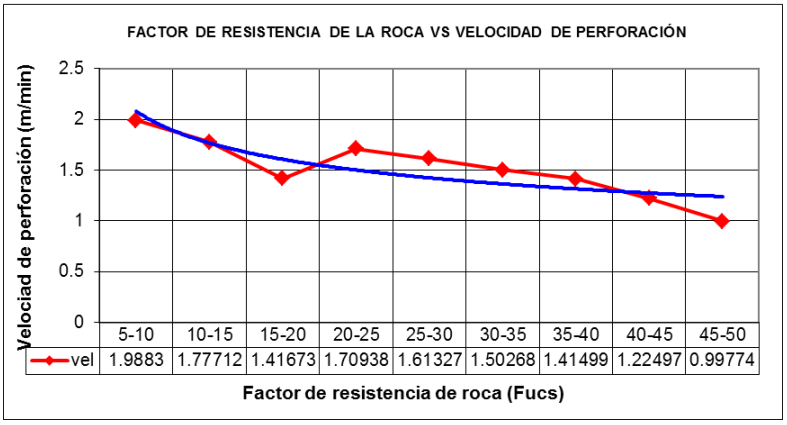
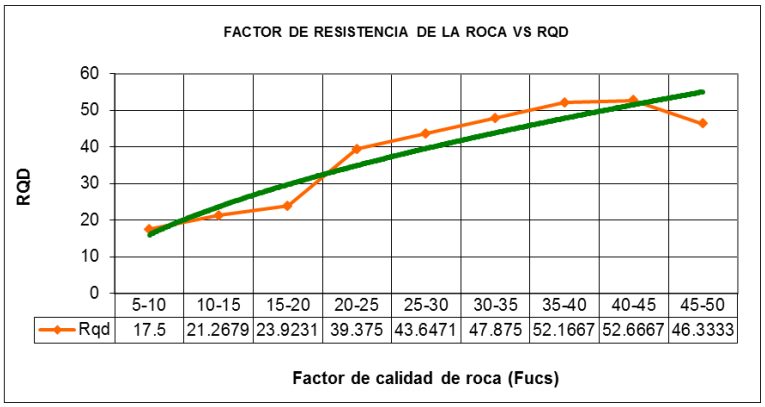


Gráfico 3 Factor de resistencia de la roca vs RQD



Como se observa, la velocidad de perforación depende de muchos factores externos como: características geológicas, propiedades físicas de las rocas, distribución de tensiones y estructuras internas de las rocas.

La velocidad de penetración se puede determinarsetambién por la fórmula de R. Praillet.

$$V_p = 63.9E \times V_t / \sigma_c \times D_t$$

Dónde:

E Empuje (Pulldown), Kg.
V_t Velocidad de rotación,
σ_c Resistencia de compresión a la roca, Mpa.
D_t Diámetro de taladro, mm.

La velocidad de perforación es un parámetro importante que se utiliza para determinar el rendimiento de los equipos de perforación.

Con mucha aproximación se pueden emplear los tiempos en operaciones auxiliares y el tiempo neto de perforación por metro de taladro, como un estándar para determinadas condiciones de perforabilidad de las rocas,dado un tipo de perforadora a emplearse.

La estandarización consiste en convertir los tiempos utilizados a unidad de metro perforado, clasificarlos por rangos, para resultados de perforación en rocas de características similares según el factor de resistencia a la compresión.

RENDIMIENTO TECNICO

En este caso, el rendimiento técnico por hora será:

Dónde:

t'_{oa} Tiempo en operaciones auxiliares en un metro de taladro, min.
t'_{np} Tiempo neto de perforación en un metro de taladro, min.
Q_{tp} Rendimiento técnico de perforación, m/h_{ef}.

El tiempo de perforación neta de un metro de taladro (t'_{np}) está dado por:

$$t'_{np} = \frac{1}{V_p} \text{;m/min}$$

Dónde:

V_p Velocidad de perforación, m/min.
H_{ef} Hora efectiva.

El rendimiento técnico de perforación mensual o anual estará dado por la siguiente expresión.

$$Q_{tp} = \left(60 \times \frac{H_{ef}}{(t'_{np} + t'_{oa})}\right) \times T_t$$

En base a estudios de tiempos para un determinado equipo y modelo de perforadora se puede determinar el tiempo neto de perforación (T_{np}) y tiempo en operaciones auxiliares (t_{oa}) en un metro de taladro (cuadro N°6).

Cuadro 6 Estándares del ciclo de las operaciones auxiliares y velocidad de perforación

Actividades de tiempo efectivo de perforación (T_{ef})	Código de tiempos	Unidad	Baja	Media	Alta
			Velocidad (m/min)	Velocidad (m/min)	Velocidad (m/min)
Tiempo neto de perforación	t'_{np}	m/min	1.10	1.42	2.59
Desplazamiento de taladro a traslado	t'_{tra_per}	m/min	0.04	0.08	0.22
Nivelación de la perforadora	t'_{niv_per}	m/min	0.05	0.08	0.12
Plegamiento de las gatas	t'_{pleg_gat}	m/min	0.04	0.05	0.08
Extracción de la barra (Izaje)	t'_{iza_bar}	m/min	0.03	0.05	0.07

Datos obtenidos en base a estudio de tiempos en equipos de Perforación D90KD Drilltech, diámetro de broca de 9 7/8 y en rocas de perforabilidad media.

El tiempo efectivo de trabajo de perforación durante una guardia está dado por la siguiente expresión:

$$H_{ef} = (t'_{oa} + t'_{np}) \times \sum_{i=1}^{N} L_i \text{ ; Minutos}$$

Dónde:

N Número de taladros
L_t Longitud de taladro

RENDIMIENTO DE EXPLOTACIÓN

Se determina considerando además de las operaciones auxiliares y la perforación neta, el tiempo en organización del trabajo y las demoras independientemente del tipo de perforadoras que se utilicen.

$$Q_{\exp} = \frac{T_t - (t_{np} + t_{dm} + t_{dno} + t_{do})}{(t'_{oa} + t'_{np})} \text{ ; m/turno,}$$

$$Q_{\exp} = \frac{T_t - (t_{np} + t_{dm} + t_{dno} + t_{do})}{((\frac{1}{V_p}) + (t'_{niv-per} + t'_{ple-gat} + t'_{tra-per} + t'_{iza-barr}))} \text{ ; m/turno,}$$

El cálculo de rendimiento de los equipos de perforación se realiza con base al estudio de tiempos de las diferentes actividades de perforación, con el propósito de establecer estándares de rendimiento de perforación para diferentes tipos de roca en una operación minera dada.

En el estudio de gestión de tiempos se detalla la determinación de los diferentes factores de rendimiento y que se resume de la siguiente manera:

$$Q_{\exp} = \left(60 \times \frac{H_{ef}}{(t'_{np} + t'_{oa})}\right) \times UT \times T_t \text{ ; m/turno,}$$

Dónde:

UT Factor de Utilización Total,
T_t Tiempo total

El tempo total se refiere altiempo calendário expresado em turno, dia, mês o año.

CONCLUSIONES

La determinación de la perforabilidad de las rocas en una operación minera tiene por finalidad establecer estándares de rendimiento de perforación para distintos tipos de roca.

Los resultados de velocidades de perforación obtenidos en el estudio están relacionados a los parámetros geomecánicosy permiten utilizarlos con mucha aproximación en el cálculo de rendimiento de perforación en la etapa inicial de una operación minera,haciendo que la operación se pueda ir ajustando a la capacidad productiva de los equipos de perforación.

Al conocer la perforabilidad de las rocas de una operación minera, se puede seleccionar y optimizar el uso de brocas para cada tipo de rocas por su perforabilidad, así como seleccionar el equipos de perforación adecuada para las condiciones geomecánicas dadas, lo que incidirá en la mayor eficiencia y en la optimización de las operación de perforación.

REFERENCIAS

1. Neil Ramírez V., Gestión del Tiempo en operaciones Mineras, Lima 2007.

2. Neil Ramírez V., Optimización de los Trabajos de Perforación y Voladura, Mina Tintaya, julio 2002.

3. Neil Ramírez V., Consumo de Energía vs Tipo de Material Alimentado a Chancadora Primaria, Mina Tintaya, setiembre 1999.

4. Tutton, D., Consultor Ingeniero de Minas, Australia, 2002.

5. Neíl Ramírez V., "Rendimiento de Equipos de Perforación en Tajo Abierto", En *V* Conversatorio de Minería a Cielo Abierto, Tacna, 1987.

6. Carlos López Jimeno, Emilio López Jimeno y Pilar García Bermúdez, Manual de Perforación y Voladura de Rocas.

7. Drukovanogo, M.F., Manual de las labores de Perforación y Voladura, Moscú, Editorial Niedra, 1976

8. Ruvinski, V.M., Organización Científica y Estandarización de los Trabajos en Empresas Mineras, Moscú, Editorial Niedra, 1976.