

Métodos empíricos para la determinación de la excavabilidad en el minado a cielo abierto

S. Lucano Polo

DCR Ingenieros S.R.L.

D. Córdova Rojas

DCR Ingenieros S.R.L.

RESUMEN: En el presente trabajo, se emplean 4 métodos empíricos para evaluar el grado de excavabilidad de la masa rocosa involucrada con el minado del proyecto del tajo Pukaqaqa con el objetivo de definir las zonas que serán apropiadas para el digging, ripping y blasting considerando el uso de equipos rippers D8 y D9.

Palabras clave: Excavabilidad, masa rocosa, métodos empíricos, voladura.

ABSTRACT: In the present work, 4 empirical methods are used to evaluate the excavatability degree of the rock mass involved with the mining of the Pukaqaqa pit project with the aim of defining the areas that will be suitable for digging, ripping and blasting considering the use of equipment D8 and D9.

Keywords: Excavatability, rock mass, empirical methods, digging, ripping, blasting

Lista de símbolos y abreviaturas

Is ₅₀	Índice de carga puntual para 50 mm
PLT	Ensayo de carga puntual
UCS	Resistencia a la compresión uniaxial
W	Alteración de la roca intacta
S	Resistencia de la roca intacta
J	Espaciamiento de las juntas
B	Espaciamiento de los estratos
RMR	Valoración de la masa rocosa
DI	Índice de excavabilidad
MG	Método gráfico
GSI	Índice geológico de resistencia

1. INTRODUCCIÓN

Las primeras investigaciones geotécnicas en el proyecto del tajo Pukaqaqa perteneciente a la empresa minera Nexa Resources demostraron que la masa rocosa involucrada con el minado era de mala calidad. En vista de ello, se planteó evaluar la posibilidad de realizar la fragmentación de la masa rocosa mediante el empleo de equipos rippers en lugar de la perforación y voladura. Los principales términos usados en este trabajo se definen de la siguiente manera:

Excavabilidad: es el término usado para medir la facilidad de fragmentar o remover un material con un equipo excavador.

Digging: es el proceso en el que solo se emplea una excavadora para remover el material de una superficie sólida.

Ripping: es el método en el cual se fragmenta y suelta un material consolidado.

Breaking: es el proceso en el que se fragmenta un material mediante percusión.

Blasting: es el método con el que se fragmenta un material mediante el empleo de explosivos.

Con el objetivo de determinar el grado de excavabilidad de la masa rocosa en el futuro tajo Pukaqaqa se emplearon 4 métodos empíricos para determinar las zonas del tajo apropiadas para emplear el digging, ripping y blasting.

Los métodos empíricos para evaluar la excavabilidad de la masa rocosa fueron seleccionados teniendo en cuenta la información geotécnica disponible en el futuro tajo Pukaqaqa. Los 4 criterios utilizados fueron: Albulatif & Cruden (1983) que emplea la clasificación geomecánica RMR; Scoble & Muftuoglu (1984) que determina un índice de excavabilidad (DI) que tiene en cuenta la alteración y resistencia de la roca intacta, además del espaciamiento de las juntas y estratos; Pettifer & Fookes (1994) que tiene en cuenta la resistencia de la roca intacta y el espaciamiento de las juntas y finalmente el criterio de Tsiambaos & Saroglou (2010) que emplea la clasificación geomecánica GSI y la resistencia de la roca intacta.

Esta investigación es pionera ya que en el ámbito nacional no existe evidencia de la aplicación de equipos excavadores para realizar la fragmentación

✉ Sammy Lucano Polo
s.lucanopolo@gmail.com

✉ David Córdova Rojas
dcordova@dcr.com.pe

de macizos rocosos, los antecedentes se limitan al uso de escareadores o rimadores en minería subterránea como es el caso de la mina San Vicente (Ortiz Sánchez, et al., 2009). Sin embargo hasta la fecha no se cuenta con investigaciones publicadas en Perú que evalúen una operación de minado a cielo abierto empleando rippers para producción, es decir, sin el uso de la perforación y voladura.

2. LA EXCAVABILIDAD

Se entiende por excavabilidad a la facilidad de fragmentar o remover la masa rocosa empleando un equipo excavador. Según el grado de excavabilidad se puede clasificar a la masa rocosa desde la más sencilla de excavar hasta la que ofrece mayor resistencia como: *adecuada para digging*, en la que solo se requiere emplear una pala o excavadora para remover el material que es una masa rocosa de muy baja calidad o un suelo medianamente consolidado; *adecuada para ripping*, en la que se requiere del uso de un ripper que es un bulldozer el cual posee una punta metálica en un extremo y que es forzada a ingresar en la roca mientras se traslada para fragmentar o remover la masa rocosa; *adecuada para breaking*, en la que se requiere de un equipo que tiene incorporado un martillo percutidor para fragmentar la masa rocosa y finalmente, *adecuado para blasting*, en la que se requiere del uso de perforación y explosivos para generar la fragmentación de la masa rocosa. La Fig. 1 muestra cada uno de estos procesos.



Fig. 1 Excavabilidad de la masa rocosa a) digging; b) ripping; c) breaking y d) blasting.

Conocer las características de excavabilidad de la masa rocosa es importante para la selección del método más adecuado y rentable para realizar la fragmentación, además, permite la correcta selección de los equipos necesarios tanto en proyectos mineros y obras civiles.

Desde que Franklin, et al., (1971) propusieron una primera aproximación para evaluar la excavabilidad de la masa rocosa, diversos investigadores han desarrollado un número considerable de métodos o

criterios para tal fin (Weaver, 1975; Kirsten, 1982; Abdullatif & Cruden, 1983; Scoble & Muftuoglu, 1984; Pettifer & Fookes, 1994; Hoek & Karzulovic, 2000; Tsiambaos & Saroglou, 2010). El trabajo realizado por Kesimal, et al., (2018) de la Universidad Técnica de Karadeniz en Turquía contiene una excelente recopilación y explicación de los criterios mencionados y muchos más. Además existen algunos trabajos en español que también tratan el tema de la excavabilidad de la masa rocosa (Aduvire, et al., 2007; Ortiz Sánchez, et al., 2009). También, existen publicaciones en las cuales se emplea alguno de estos criterios de excavabilidad en países como Nueva Zelanda (Clark, 1996), Turquía (Kentli & Topal, 2004; Gurocak, et al., 2007) y la India (Avchar, et al., 2018; Naithani, et al., 2018), etc.

2.1. Principales características de la masa rocosa relacionada con la excavabilidad

En los criterios de excavabilidad descritos las principales propiedades geotécnicas de un macizo rocoso que determinan su grado de excavabilidad se pueden resumir de la siguiente manera:

Resistencia de la roca intacta: representada por la resistencia a la compresión por medio del ensayo de UCS, sin embargo, debido a que realizar el ensayo de UCS representa una inversión de tiempo y dinero también es frecuente que la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta esté representada por alguno de sus valores índices como el índice de carga puntual determinado con el ensayo PLT o el número de rebote R determinado con el martillo Schmidt. Como es natural mientras mayor sea la resistencia de la roca intacta mayor será su dificultad a ser excavada.

Grado de alteración de la roca intacta: genera la pérdida de resistencia de la roca intacta, se suele determinar cuantitativamente en laboratorio con el ensayo slake durability y cualitativamente a partir de observaciones en afloramientos rocosos o núcleos de roca de sondajes diamantinos. Como es de esperar cuanto mayor sea el grado de alteración de la roca intacta menor será su dificultad a ser excavada.

Espaciamiento de las discontinuidades: determina el nivel de fracturamiento natural del macizo rocoso, se suele determinar a partir de líneas de detalle en afloramiento rocosos, en sondajes diamantinos mediante la técnica del core orientado o técnicas geofísicas como los visores ópticos y acústicos. En tanto mayor sea el grado de fracturamiento primario de la masa rocosa menor será su dificultad a ser excavada.

Velocidad sísmica: es la velocidad con que viajan las ondas sísmicas a través de la masa rocosa, se determina mediante procedimientos geofísicos. Un

macizo rocoso con alta velocidad sísmica representa a un macizo competente, es decir, con alta resistencia de la roca intacta, bajo grado de alteración y bajo fracturamiento primario, por ende, será un macizo difícil de excavar.

Principalmente a partir de la valoración de alguno o todos estos parámetros y teniendo en cuenta las capacidades de la maquinaria a usar, los criterios de excavabilidad determinan índices, clasificaciones, rangos, etc. que determinan si un macizo rocoso es adecuado para digging, ripping, breaking o blasting.

Es interesante mencionar que de las propiedades geotécnicas descritas algunos investigadores y fabricantes de maquinaria solo consideran a la velocidad sísmica para determinar el grado de excavabilidad de la masa rocosa (Atkinson, 1971; Bailey, 1975; Komatsu, 1987; Caterpillar, 2018). La Fig. 2 muestra un ejemplo del manual de Caterpillar para un ripper D9R. Sin embargo, como advierten (Aduvire, et al., 2007) si bien la velocidad sísmica es el parámetro más significativo para evaluar la excavabilidad de un macizo rocoso, no puede ni debe ser tenido en cuenta aisladamente, sino, visto en conjunto con otros factores del macizo rocoso a considerar.

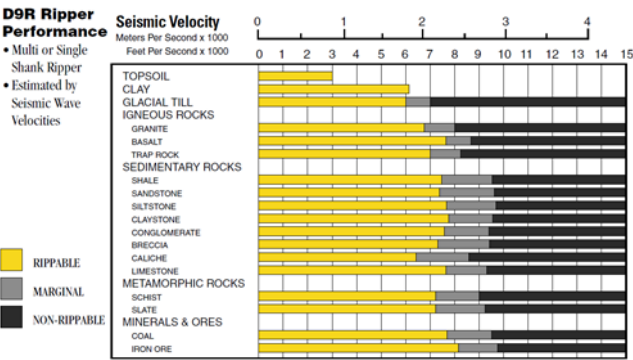


Fig. 2 Desempeño de un equipo ripper D9R en función de la velocidad sísmica (Caterpillar, 2018).

2.2. Criterios de excavabilidad empleados

En vista que hasta la fecha de realización de este trabajo no se contaba con mediciones de velocidad sísmica y que la información disponible correspondía principalmente a valoraciones de la clasificación geomecánicas RMR, GSI, índice de carga puntual en sondajes diamantinos. Se eligieron los siguientes criterios de excavabilidad:

Albullatif & Cruden (1983) - RMR: este criterio emplea como principal parámetro la clasificación RMR. Como se aprecia en la Fig. 3 para determinar rangos de RMR que sugieren la aplicación de digging, ripping o blasting.

Scoble & Muftuoglu (1984) – DI: este criterio define un índice denominado índice de excavabilidad

o DI por sus siglas en inglés (diggability index), que es el resultado de la suma de 4 valoraciones: (a) grado de alteración; (b) resistencia de la roca intacta; (c) espaciamiento de las juntas y (d) espaciamiento de los estratos. Los rangos y valoraciones correspondientes se muestran en la Tabla 1, además, las Tabla 2 muestra la condición de excavabilidad en función del DI.

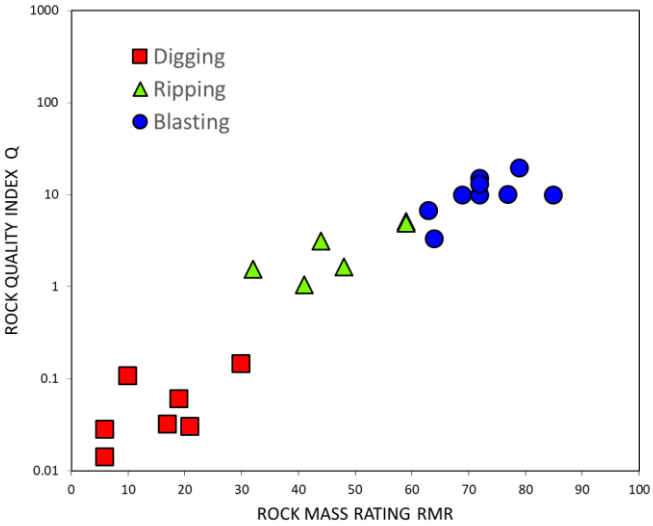


Fig. 3 Excavabilidad en función al RMR (modificado de Abdullatif & Cruden, 1983).

Tabla 1. Valoración del índice de excavabilidad – DI (Scoble & Muftuoglu, 1984).

Parameter		Class				
		I	II	III	IV	V
Weathering (W)	Weathering	Completely	Highly	Moderately	Slightly	Unweathered
	Rating	< 0	5	15	20	25
Strength (S)	U.C.S (MPa)	< 20	20-60	40-60	60-100	> 100
	IS ₅₀ (MPa)	< 0.5	0.5-1.5	1.5-2.0	2-3.5	> 3.5
	Rating	0	10	15	20	25
Joint Spacing (J)	(m)	< 0.3	0.3-0.6	0.6-1.5	1.5-2	> 2
	Rating	5	15	30	45	50
Bedding Spacing (B)	(m)	< 0.1	0.1-0.3	0.3-0.6	0.6-1.5	> 1.5
	Rating	0	5	10	20	30

Tabla 2. Clasificación según el índice de excavabilidad – DI (modificado de Scoble & Muftuoglu, 1984)

Clase	Facilidad de Digging	Indice (W+S+J+B)
I	Muy Fácil	< 40
II	Fácil	40-50
III	Moderadamente Dificultoso	50-60
IV	Dificultoso	60-70
V	Muy Dificultoso	70-95
VI	Extremadamente Dificultoso	95-100
VII	Marginal sin Blasting	> 100

Pettifer & Fookes (1994) – MG: este criterio emplea la resistencia de la roca intacta (PLT), y el espaciamiento de las juntas. Para determinar la condición de excavabilidad usa un gráfico de doble escala logarítmica como se muestra en la Fig. 4.

Tsiambaos & Saraglou (2010) – GSI: este criterio emplea como principal parámetro la

clasificación GSI (Geological Strength Index), por medio de dos tablas define zonas apropiadas para digging, ripping y blasting como se observa en la Fig. 5.

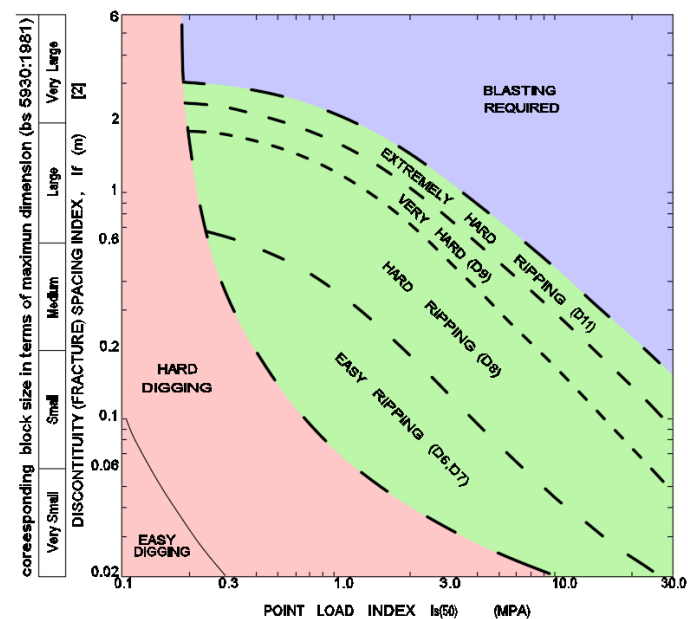


Fig. 4 Método Gráfico (MG) para evaluar la excavabilidad (modificado de Pettifer & Fookes, 1994).

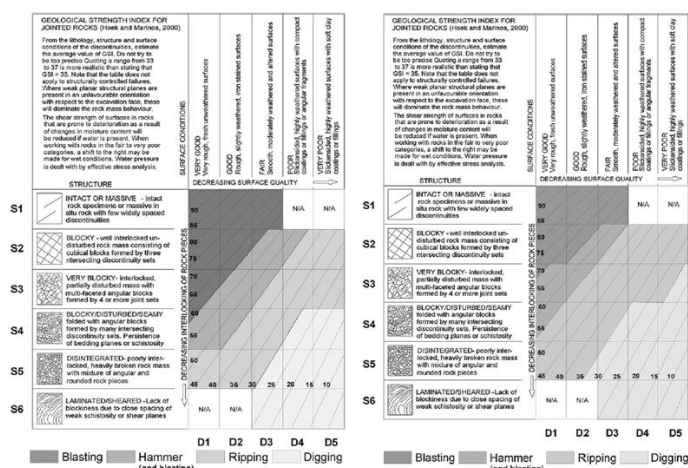


Fig. 5 Criterio de excavabilidad, tabla de la izquierda aplicable para $PLT < 3$ MPa, tabla de la derecha aplicable para $PLT > 3$ MPa (Tsiambaos & Saroglou, 2010).

3. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA MASA ROCOSA

Para caracterizar y clasificar a la masa rocosa involucrada con el minado se dispuso de la información geotécnica recopilada en varias campañas de perforación de sondajes diamantinos. En total la data disponible estuvo conformada por 294 sondajes diamantinos con alrededor de 50 000 metros lineales de información geotécnica como: valoraciones de las clasificaciones RMR y GSI, índice de resistencia a la carga puntual, espaciamiento de las juntas, etc. La Fig. 6 muestra una vista de la distribución de la información disponible en el diseño del futuro tajo.

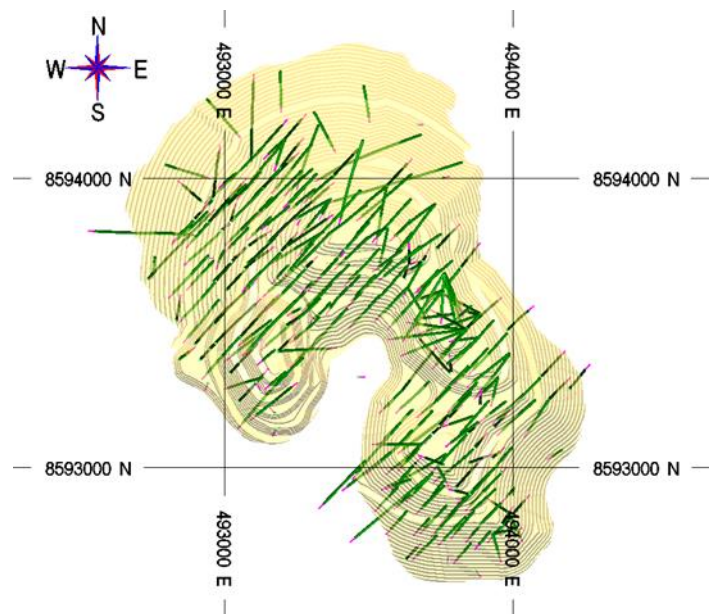


Fig. 6 Vista en planta, distribución de la información geotécnica disponible en sondajes diamantinos.

De manera simplificada en el área en estudio las litologías predominantes son el skarn seguido del mármol. Además, atendiendo a las principales características para definir el grado de excavabilidad de una masa rocosa se pudo identificar 6 materiales típicos:

Tipo 1: Alta resistencia a la compresión uniaxial, entre 70 a 150 MPa y bajo contenido de discontinuidades, entre 1 a 4 discontinuidades por metro lineal. Fig. 7.



Fig. 7 Macizo tipo 1, sondaje GEOT-14 (119.50 – 134.3), mármol.

Tipo 2: Alta resistencia a la compresión uniaxial, entre 70 a 150 MPa y moderado contenido de discontinuidades, entre 5 a 9 discontinuidades por metro lineal. Conformado principalmente por mármol (Fig. 8).

Tipo 3: Resistencia a la compresión no confinada media, entre 30 a 70 MPa y bajo contenido de discontinuidades, entre 1 a 4 discontinuidades por metro lineal. Conformado por mármol y skarn (Fig. 9).

Tipo 4: Resistencia a la compresión no confinada media, entre 30 a 70 MPa y alto contenido de discontinuidades, entre 5 a 10 discontinuidades por

metro lineal. Conformado principalmente por skarn. (Fig. 10).



Fig. 8 Macizo tipo 2, sondaje PND-04-091 (0.0 – 15.5), mármol.



Fig. 9 Macizo tipo 3, sondaje PND-12-388 (77.45 – 93.95), skarn.



Fig. 10 Macizo tipo 4, sondaje PND-12-537 (134.45 – 151.30), skarn.

Tipo 5: Baja resistencia a la compresión uniaxial, entre 1 a 30 MPa y bajo contenido de discontinuidades, entre 1 a 2 discontinuidades por metro lineal. Conformado principalmente por skarn (Fig. 11).

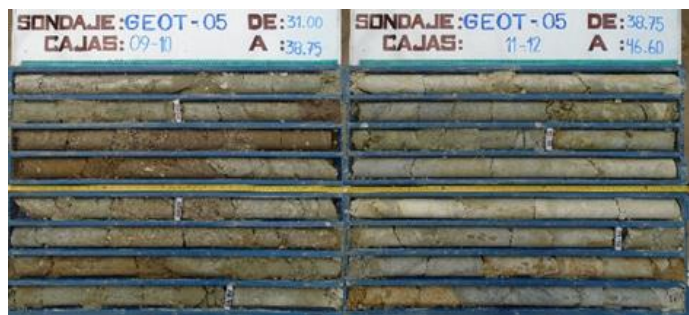


Fig. 11 Macizo tipo 5, sondaje GEOT-05 (31.00 – 46.60), skarn.

Tipo 6: baja resistencia a la compresión uniaxial, entre 1 a 30 MPa y con cores triturados. Conformado principalmente por skarn (Fig. 12).



Fig. 12 Macizo tipo 6, sondaje PND-12-291 (180.0 – 197.1) skarn.

A partir de las Fig. 7 a 12 se espera que el mármol presente mayor dificultad a ser excavado en comparación con el skarn.

Luego de la caracterización de la masa rocosa se emplearon los 4 métodos empíricos descritos para obtener el grado de excavabilidad de la masa rocosa. En vista que el objetivo era determinar qué zonas del futuro tajo eran aptas para ser explotadas con equipos ripper D8 y D9 (Caterpillar, 2018), todos los resultados de ripping con equipos de mayor capacidad que el D9 o breaking fueron asignados a la clasificación de blasting.

4. RESULTADOS

Finalmente, para obtener los resultados del grado de excavabilidad de la masa rocosa en el futuro tajo con cada uno de los 4 criterios seleccionados se emplearon técnicas de interpolación. El resultado final fue producto del contraste entre los resultados obtenidos con cada uno de los 4 criterios empleados. La Fig. 13 muestra el flujo de trabajo empleado desde el inicio del proceso.

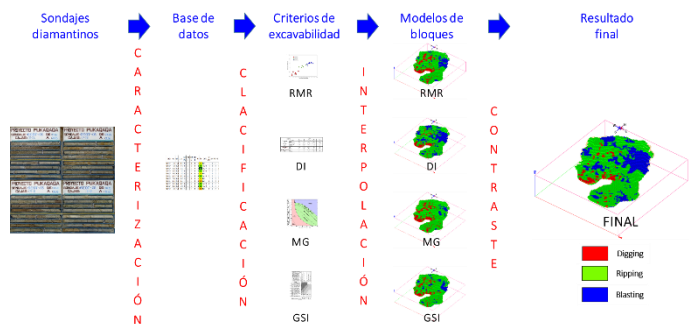


Fig. 13 Flujo de trabajo para la obtención del grado de excavabilidad de la masa rocosa.

Como se observa en la Fig. 14 por cada uno de los 4 criterios de excavabilidad empleados se obtuvo en modelo de bloques de toda la masa rocosa del futuro tajo. La Fig. 16 muestra un gráfico de barras con el porcentaje de masa rocosa apropiada para digging, ripping o blasting con cada uno de los 4 métodos. De los resultados se puede resumir que el porcentaje de roca adecuada para digging varía de 3 % a 14 %; el porcentaje de roca adecuada para ripping varía de 61

% a 81 % y el porcentaje de roca adecuada para blasting varía de 5 % a 36 %. Para este caso en particular el criterio más optimista es el MG (Pettifer & Fookes, 1994) y el más conservador el DI (Scoble & Muftuoglu, 1984).

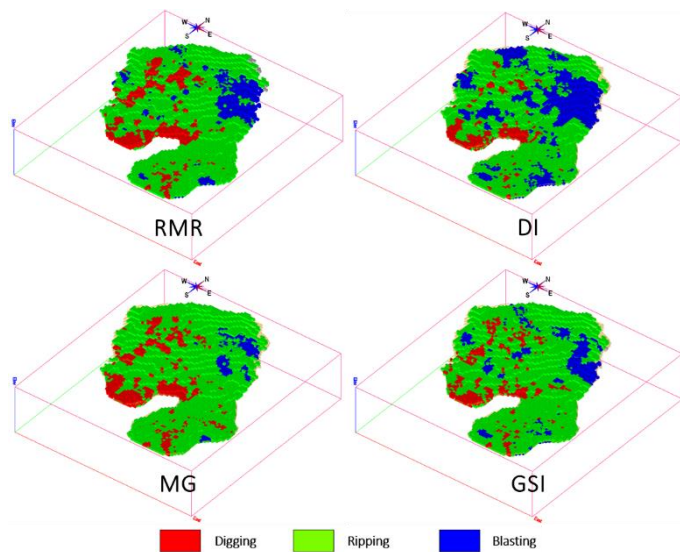


Fig. 14 Vista isométrica, grado de excavabilidad según los 4 métodos empíricos usados.

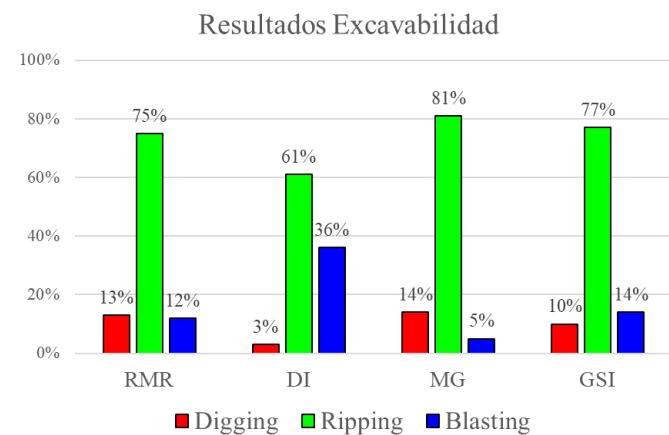


Fig. 15 Porcentaje de masa rocosa adecuada para digging, ripping o blasting (considerando el uso de rippers D8 y D9) según los 4 criterios de excavabilidad.

La Fig. 16 muestra un filtro con las zonas que requerirán blasting y la Fig. 17 muestra un filtro con las zonas en las que se podría efectuar el digging.

A partir de la Fig. 16 se observa que el criterio DI es el que anticipa mayores zonas en las que será necesario aplicar el blasting. Además, se observa que las zonas de blasting anticipadas por alguno de los otros 3 criterios de excavabilidad restantes (RMR, GSI o MG) están contenidas dentro de la zona anticipada por el criterio DI. En vista de ello y adoptando una decisión conservadora se estableció clasificar a un bloque como blasting si por lo menos unos de los 4 criterios empleados así lo anticipaban. Con un razonamiento similar se estableció clasificar a un bloque como digging si los 4 criterios empleados así lo anticipan.

Mediante este procedimiento se realiza un contraste entre los resultados obtenidos con cada uno de los 4 criterios y se obtiene un resultado final que se muestra en la Fig. 18. Además, la Fig. 19 muestra el gráfico de barras con los porcentajes finales proyectados.

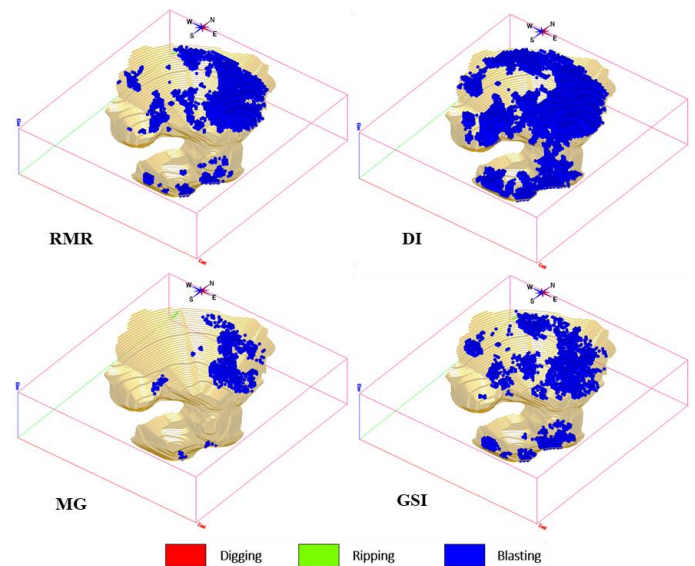


Fig. 16 Vista isométrica, zonas que requieren blasting según los 4 métodos empíricos usados.

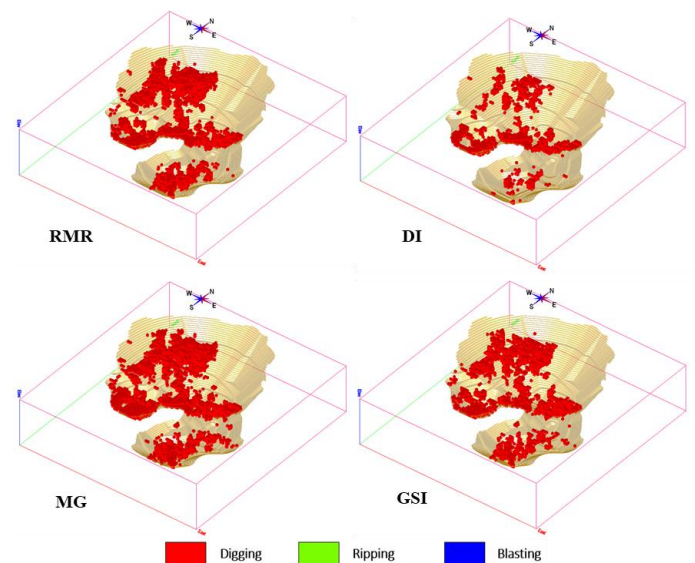


Fig. 17 Vista isométrica, zonas en las que se podría aplicar el digging según los 4 métodos empíricos usados.

Finalmente, la Fig. 20 muestra el contraste entre los resultados obtenidos con cada uno de los 4 criterios empíricos utilizados y el resultado final. Se resalta que los resultados obtenidos con el criterio DI son similares a los del resultado final. Se observa que el porcentaje de masa rocosa adecuada para blasting es 36 % para el DI y 39 % para el resultado final (incremento del 3 %) en otras palabras, los otros 3 criterios de excavabilidad (RMR, GSI y MG) han aportado con 3 % de blasting en el resultado final. También se destaca que el porcentaje de masa rocosa

adecuada para digging es 3 % para el DI y 2 % para el resultado final (disminución del 1 %) es decir, todos los criterios de excavabilidad empleados (RMR, DI, GSI y MG) marcan que el porcentaje de digging es de 2 % como mínimo.

A la luz que los resultados obtenidos se estima que el 60 % de la masa rocosa involucrada con el minado del futuro tajo Pukaqaqa podrá ser explotado con el uso de rippers D8 o D9 (sin la necesidad de perforación y voladura), este 60% de roca ripable está relacionada a la presencia de roca skarn que posee media a baja resistencia a la compresión uniaxial y bajo a alto fracturamiento por metro lineal, en el otro 40 % restante será necesario la aplicación de perforación y voladura para la explotación del mineral, este 40 % está relacionado a la presencia de roca mármol que posee alta resistencia a la compresión uniaxial y baja a media presencia de discontinuidades por metro lineal.

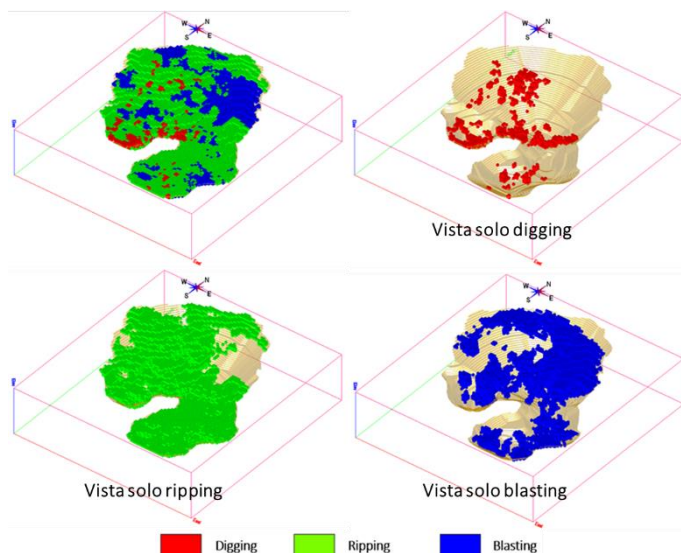


Fig. 18 Vista isométrica, grado de excavabilidad de la masa rocosa (considerando el uso de rippers D8 y D9) en el futuro tajo resultado final.

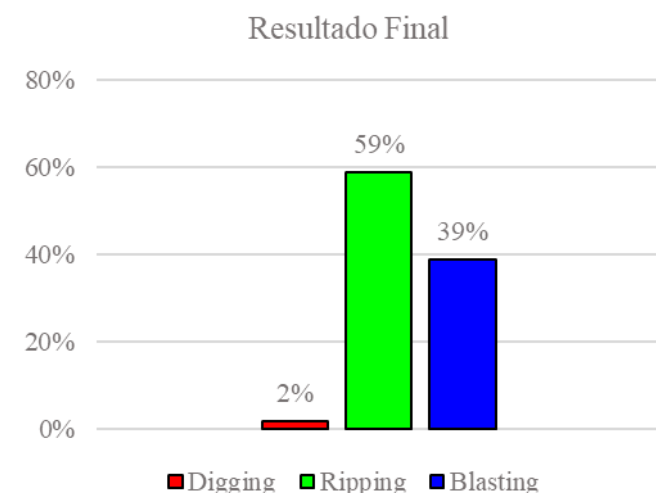


Fig. 19 Porcentaje de masa rocosa adecuada para digging, ripping o blasting (considerando el uso de rippers D8 y D9) resultado final.

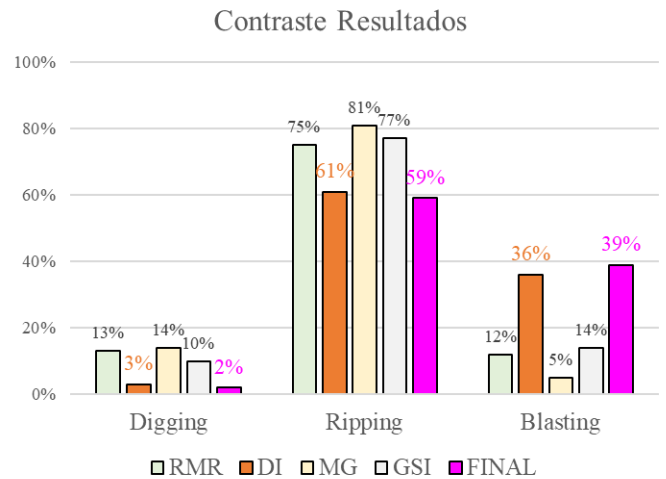


Fig. 20 Gráfico de barras comparativo entre los 4 criterios empleados vs el resultado final.

5. CONCLUSIONES

- El resultado final muestra que alrededor del 60 % de la masa rocosa que será minada es ripable (ripping y digging). Y en el 40 % restante será necesario aplicar la perforación y voladura.
- El resultado final está fuertemente influenciado por el resultado del criterio DI con aportes marginales de los otros 3 criterios.
- Los resultados obtenidos con cada uno de los 4 criterios de excavabilidad definidos son coherentes. Para este caso en específico el criterio más optimista es el MG, y el más conservador el criterio DI.
- Esta investigación constituye una primera aproximación al tema de excavabilidad de la masa rocosa del futuro tajo Pukaqaqa que deberá ser completada con la medición de otros parámetros como la velocidad sísmica y la realización de pruebas piloto previo al inicio de las operaciones.

Agradecimientos los autores de esta investigación queremos expresar nuestro agradecimiento al equipo de DCR Ingenieros S.R.L. que contribuyo con el presente trabajo: Fredy Elorrieta, Samuel Reyes, Christian López y también a la empresa Nexa Resources por autorizar la publicación de los resultados obtenidos.

6. REFERENCIAS

- Abdullatif, . O. M. & Cruden, D. M., 1983. The relationship between rock mass quality and ease of excavation.
- Aduvire, O., Quinteros, J. & Mazadiego, L., 2007. Aplicación de los índices geomecánicos en el arranque de rocas mediante excavación o voladura.
- Atkinson, T., 1971. Selection of open pit excavating and loading equipment.

Avchar, A., Choudhary, B. S., Budi, G. & Sawaiker, U. G., 2018. Applicability of size-strength rippability classification system for laterite excavation in iron ore mines of Goa.

Bailey, A. D., 1975. Rock types and seismic velocity versus rippability.

Caterpillar, 2018. Handbook of ripping (20th ed.).

Clark, P. B., 1996. Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton.

Franklin, J. A., Broch, E. & Walton, G., 1971. Logging the mechanical character of rock.

Gurocak, Z., Alemdag, S. & Zaman, M., 2007. Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya dam site, Turkey.

Hoek, E. & Karzulovic, A., 2000. Rock mass properties for surface mines.

Kentli, B. & Topal, T., 2004. Assessment of rock slope stability for a segment of the Ankara - Pozantı motorway, Turkey.

Kesimal, A., Karaman, K., Cihangir, F. & Ercikdi, B., 2018. Excavatability Assessment of rock masses for geotechnical studies.

Kirsten, H. A. D., 1982. A classification system for excavation in natural materials.

Komatsu, 1987. Specifications and application handbook (10th ed.).

Naithani, A. K., Rawat, D. S., Singh, L. G. & Jain, P., 2018. Assessment of the excavatability of rock based on rock mass quality: a case study from India.

Ortiz Sánchez, O., Giraldo Paredes, M. & Canchari Silverio, G., 2009. Explotación minera sin voladura.

Pettifer, G. S. & Fookes, P. G., 1994. A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock.

Scoble, M. J. & Muftuoglu, Y. V., 1984. Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection.

Tsiambaos, G. & Saroglou, H., 2010. Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI).

Weaver, J. M., 1975. Geological factors significant in the assessment of rippability.