

Geomechanical characterization and exploitation method design of the Polloc limestone deposit, Cajamarca – Peru

Wilder Chuquiruna, Dr¹, Eliana Castrejón, Mg²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, wilder.chuquiruna@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, eliana.castrejon@upn.pe

Abstract: *The present Investigation analyzes the Geomechanical Behavior of the Polloc Limestone Deposit, located in the Encañada District, Cajamarca Province, whose extension is 10 hectares. The purpose is to define the Design of the Exploitation Method of the limestones belonging to the Pullucana Group (Yumagual Formation) of the Upper Cretaceous. 6 Stations were analyzed to define the Geomechanical Behavior of the Reservoir, using RMR89, RQD, RCU and GSI parameters, determining that the Rock Quality according to the Deere's RQD is Medium for stations EG 3 and EG 5 and Good for stations EG 1, EG 2, EG 4 and EG 6. According to Bieniawski's RMR89 Classification, the Rock is of Regular Quality at station EG 5 and Good at stations EG 1, EG 2, EG 3, EG 4 and EG 6. According to the Geological Resistance Index GSI, the Rock is of Good Quality for Stations EG 1, EG 2, EG 3, EG 4, EG 5, EG 6. From the results obtained in the RocData Software, cohesion between 0.718 and 2.074 was calculated. MPa; and friction angle between 45.22° to 49.32°, determining a compact and hard rock. The DIPS software reported low percentages of flat breakage and wedges. With the results obtained, we designed the Exploitation Methods for Ascending Staggered Banks, whose design parameters are bank height 7m, bank width 6m, working angle 75° and final slope angle 42°.*

Keywords: *Geomechanical behavior, exploitation method.*

Caracterización geomecánica y diseño del método de explotación del yacimiento de calizas Polloc, Cajamarca – Perú

Wilder Chuquiruna, Dr¹, Eliana Castrejón, Mg²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, wilder.chuquiruna@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, eliana.castrejon@upn.pe

Resumen: La presente Investigación analiza el Comportamiento Geomecánico del Yacimiento de Calizas Polloc, ubicado en el Distrito de La Encañada, Provincia Cajamarca, cuya extensión es de 10 hectáreas. La finalidad es definir el Diseño del Método de Explotación de las calizas pertenecientes al Grupo Pulluicana (Formación Yumagual) del Cretácico Superior. Se analizaron 6 Estaciones para definir el Comportamiento Geomecánico del Yacimiento, utilizando parámetros RMR89, RQD, RCU y GSI, determinándose que la Calidad de la Roca según el RQD es Media para las estaciones EG 3 y EG 5 y Buena para las estaciones EG 1, EG 2, EG 4 y EG 6. Según la Clasificación RMR89 de Bieniawski la Roca es de Calidad Regular en la estación EG 5 y Buena en las estaciones EG 1, EG 2, EG 3, EG 4 y EG 6. De acuerdo al índice Geológico de Resistencia GSI, la Roca es de Calidad Buena para las Estaciones EG 1, EG 2, EG 3, EG 4, EG 5, EG 6. De los resultados obtenidos en el Software RocData se calculó la cohesión entre 0.718 a 2.074 MPa ; y ángulo de fricción entre 45.22° a 49.32°, determinando una roca compacta y dura. El software DIPS reportó bajos porcentajes de rotura planar y cuñas. Con los resultados obtenidos se diseñó el Método de Explotación por Bancos Escalonados Ascendentes cuyos parámetros de diseño son: altura de banco 7m, anchura de banco 6m, ángulo de trabajo 75° y ángulo de talud final 42°.

Palabras clave: Comportamiento geomecánico, método de explotación

I. INTRODUCCIÓN

La explotación de caliza es una actividad clave dentro de la minería no metálica, debido a su amplia utilización en la industria del cemento y la construcción. El diseño técnico de estas explotaciones debe considerar criterios geomecánicos que aseguren la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad de las operaciones, ya que una evaluación inadecuada puede comprometer tanto la eficiencia productiva como la integridad del personal [1]. En explotaciones a cielo abierto, particularmente en canteras, el comportamiento geomecánico del macizo rocoso condiciona el diseño de bancos, taludes y el método de explotación. Estudios previos señalan que la estabilidad depende principalmente de la calidad del macizo, la resistencia de la roca intacta y la disposición de las discontinuidades, factores que deben evaluarse de manera integral antes del inicio de las operaciones [2].

El yacimiento de calizas Polloc se ubica en el distrito de La Encañada, provincia de Cajamarca, y ocupa un área aproximada de 10 ha. Geológicamente, pertenece al Grupo Pulluicana, Formación Yumagual, del Cretácico Superior, y está constituido por calizas grisáceas, nodulares y macizas, con un espesor cercano a los 700 m, lo que evidencia su potencial para una explotación a cielo abierto [3].

Las condiciones litológicas y estructurales del yacimiento muestran un grado de fracturamiento moderado y un bajo nivel de meteorización. Estas características influyen directamente en la respuesta mecánica del macizo rocoso frente a las excavaciones, por lo que su evaluación resulta fundamental para garantizar la estabilidad de los taludes durante la explotación [4]. Es así que la caracterización geomecánica permite determinar parámetros esenciales como la calidad del macizo rocoso, el comportamiento de las discontinuidades y la resistencia de la roca intacta. Dichos parámetros constituyen la base para el diseño de explotaciones seguras y técnicamente eficientes en canteras de caliza [5].

Entre los métodos más utilizados para esta evaluación se encuentran el índice de calidad de la roca (RQD), la clasificación del macizo rocoso RMR y el índice geológico de resistencia GSI. Estas herramientas facilitan la interpretación del comportamiento del macizo y proporcionan criterios técnicos confiables para el diseño de taludes y bancos de explotación [6]. El uso adecuado de sistemas de clasificación geomecánica permite reducir la incertidumbre en el diseño, establecer ángulos de talud apropiados y minimizar el riesgo de fallas durante las operaciones mineras, contribuyendo así a una mayor seguridad y continuidad operativa [7].

En la región de Cajamarca existe un interés creciente por la explotación de caliza a escala local y regional. Sin embargo, la ausencia de estudios geomecánicos específicos puede generar inestabilidad en los taludes y afectar el desarrollo sostenible de este tipo de proyectos mineros [8]. Es así que el diseño del método de explotación debe integrar los resultados de la evaluación geomecánica con criterios operativos que permitan optimizar la producción y reducir costos, manteniendo condiciones de seguridad adecuadas durante toda la vida útil de la cantera [9].

Desde la perspectiva de la ingeniería de minas, la selección de un método de explotación apropiado en canteras de caliza contribuye de manera significativa a mejorar la eficiencia del proceso extractivo y a disminuir los riesgos asociados a la inestabilidad del macizo rocoso [10]. En este contexto, el presente estudio analiza la influencia del comportamiento geomecánico del yacimiento de calizas Polloc en el diseño del método de explotación, considerando las condiciones geológicas y estructurales del macizo rocoso [11]. Se plantea como hipótesis que el comportamiento geomecánico del yacimiento presenta condiciones favorables de resistencia, fracturamiento y meteorización, que permiten

el diseño de un método de explotación por bancos, garantizando la estabilidad de los taludes y la seguridad de las operaciones mineras [12].

La importancia de esta investigación radica en la generación de información geomecánica confiable que sirva de base para el diseño técnico de la explotación, optimizando el aprovechamiento del recurso caliza y reduciendo los riesgos geotécnicos asociados [13].

Asimismo, los resultados obtenidos aportan información relevante para proyectos similares en la región, constituyéndose en un referente técnico para el diseño de canteras en contextos geológicos comparables [14]. Finalmente, el estudio contribuye al fortalecimiento del conocimiento aplicado en minería no metálica, promoviendo prácticas de explotación seguras y técnicamente fundamentadas, alineadas con los estándares actuales de la ingeniería de minas [15].

En este sentido, el diseño del método de explotación no solo debe garantizar la estabilidad geotécnica, sino también minimizar los impactos ambientales asociados a la actividad minera, es así, que el presente estudio no solo evalúa el comportamiento geomecánico del yacimiento, sino que también se analiza el diseño propuesto en términos de sostenibilidad ambiental.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se basó principalmente en dos etapas, las cuales permitieron alcanzar los objetivos y se detallan a continuación:

A. Etapa de recolección de información

Esta etapa se centró en la recopilación, revisión y sistematización de la información necesaria para el desarrollo del estudio geomecánico y el diseño del método de explotación del yacimiento, considerando los siguientes aspectos:

1. Información geológica y cartográfica: Se recopiló información existente sobre la geología regional y local del área de estudio, incluyendo mapas geológicos, informes técnicos y estudios previos relacionados con yacimientos de caliza y canteras a cielo abierto.
2. Antecedentes técnicos y académicos: Se revisaron tesis universitarias, manuales técnicos y literatura especializada vinculada a métodos de explotación, geomecánica de macizos rocosos y diseño de taludes en canteras.
3. Análisis de imágenes satelitales: Se emplearon imágenes satelitales y modelos digitales del terreno para la identificación preliminar de rasgos geomorfológicos, pendientes y accesos al yacimiento, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica.
4. Sistematización de la información geomecánica: La información recopilada fue organizada para establecer criterios preliminares relacionados con la litología, estructuras geológicas y condiciones del macizo rocoso,

los cuales orientaron la planificación de los trabajos de campo.

5. Definición de criterios técnicos: A partir del análisis de la información secundaria, se definieron los parámetros y métodos a emplear para la caracterización geomecánica y el posterior diseño del método de explotación.

B. Etapa de campo

En esta etapa comprendió el levantamiento de información geológica directamente del yacimiento de calizas Polloc, con la finalidad de obtener los datos necesarios para la caracterización del macizo rocoso y el diseño del método de explotación:

1. Reconocimiento del área de estudio: Se realizó el reconocimiento general del yacimiento, identificando los frentes de explotación, afloramientos rocosos y accesos existentes.
2. Se efectuó el cartografiado geológico a escala apropiada, registrando las unidades litológicas presentes y sus características principales.
3. Se identificaron y midieron las principales discontinuidades del macizo rocoso, considerando orientación, espaciamiento, persistencia y condiciones de relleno.
4. Registro geomecánico: Se recopilaron los datos necesarios para la clasificación geomecánica del macizo rocoso, incluyendo información para los sistemas RQD, RMR y GSI.
5. Se analizaron las condiciones actuales de estabilidad de los taludes, observando posibles signos de inestabilidad y su relación con las estructuras geológicas.
6. Se registraron aspectos relacionados con la geometría de los bancos, alturas, anchos y ángulos de talud, información utilizada posteriormente para el diseño del método de explotación.

Para el procesamiento y análisis de datos se siguió el proceso detallado en la fig. 1:

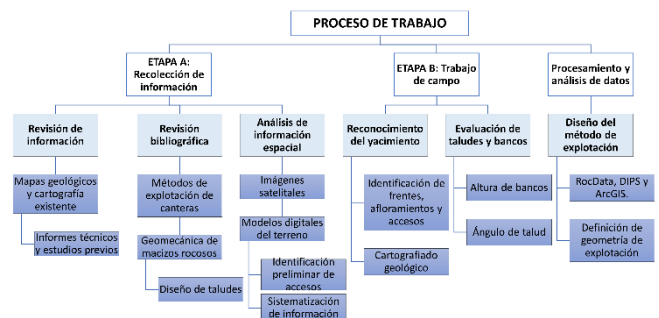


Figura 1. Proceso de trabajo

Geología local

El área de Investigación se encuentra emplazada en rocas calcáreas pertenecientes al Grupo Pulluicana y al Grupo Quilquiñán-Mujarrún.

Formación Yumagual (Ks-yu)

Constituido por una secuencia de rocas calizas nodulares, macizas de color gris parduzco en bancos medianamente uniformes cuyo espesor de estratos están entre los 10 cm hasta mayores a 1 m, presentando un espesor de la Formación entre los 500m. Estas rocas se encuentran fuertemente fracturadas y similarmente meteorizadas como se visualiza en la fig. 2.



Figura 2. Estratos de calizas nodulares grisáceas pertenecientes al Grupo Pulluicana, Formación Yumagual. E 794758, N 9213091. (Vista al SW).

Grupo Quilquiñán-Mujarrún

Formación Quilquiñán Mujarrún (Ks-qm)

TAFUR (1950) reconoció con el nombre de Formación Mujarrún y Quilquiñán a dos unidades consecutivas, integradas dentro de los grupos Pulluicana y Otuzco; años después, BENAVIDES (1956) diferencia en la Formación Mujarrún a los miembros Choro y Culebra y eleva a la categoría de grupo a la Formación Quilquiñán. [16]

Al NW de la zona de investigación como se visualiza en la fig. 3, se observan calizas nodulares macizas de color gris parduzcas con intercalación de margas y lutitas pardoamarillentas fosilíferas pertenecientes al grupo Quilquiñán - Mujarrún.



Figura 3. Afloramientos de calizas nodulares delgadas intercaladas con margas pardoamarillentas perteneciente a la Formación Quilquiñán Mujarrún. E 794213, N 9213132. (Vista al SW).

A. Ubicación

El Yacimiento de calizas Polloc, comprende alrededor de 10 hectáreas de terreno, ubicadas en el Centro Poblado de Polloc, Distrito de La Encañada, Provincia y Departamento de Cajamarca, a una altitud promedio de 3077 m.s.n.m.

Gráficamente podemos observar la ubicación del Yacimiento de calizas Polloc en la fig. 4:

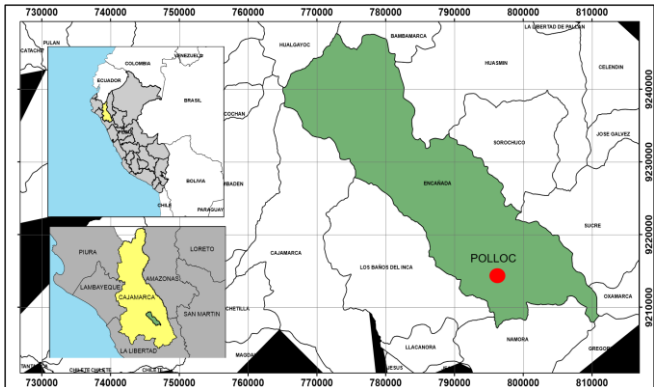


Figura 4. Ubicación del Yacimiento de calizas Polloc

El área de investigación está delimitada en el sistema UTM. WGS 84, zona 17s, mediante las coordenadas mostradas:

Tabla 1. Ubicación Geográfica del área de estudio

Vértices	Norte	Sur
1	794255	9212967
2	794214	9213185
3	794727	9213280
4	794768	9213062

El comportamiento geomecánico del yacimiento de calizas Polloc donde se desarrolló el diseño del método de explotación, estuvo condicionado por la litología, las estructuras, fracturamiento y meteorización del macizo rocoso las cuales definen condiciones inestables en la explotación de las calizas. Para el análisis geomecánico del yacimiento de calizas Polloc, se consideraron 6 estaciones geomecánicas, evaluando: RQD, RMR₈₉ con sus parámetros resistencia de la matriz rocosa, separación de diaclasas, condiciones de discontinuidades y presencia de agua procedente principalmente de las precipitaciones en la zona.

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizaron los siguientes softwares: RocData y DIPS, los cuales permitirán determinar el comportamiento geomecánico calculando la cohesión y ángulo de fricción, parámetros necesarios para el diseño del método de explotación.

B. Estaciones geomecánicas

El análisis geomecánico se realizó en seis estaciones distribuidas en el yacimiento de calizas Polloc, evidenciando una litología homogénea constituida por caliza del Grupo Pulluicana (Formación Yumagual). La resistencia a la compresión uniaxial (RCU) estimada varía entre 70 y 95 MPa, correspondiendo en todos los casos a la Clase R4, categorizada como roca resistente. Valores de RCU entre 90 y 95 MPa se registraron en las estaciones geomecánicas 1, 2 y 6, mientras que resistencias de 80 MPa se identificaron en las estaciones 3 y 4, y el valor mínimo de 70 MPa en la estación 5.

El macizo rocoso se encuentra definido por dos a tres familias de discontinuidades, observándose tres familias en las estaciones 1 y 3, y dos familias en las estaciones 2, 5 y 6. Los espaciamientos predominantes varían entre 0.6 y 2.0 m en la mayoría de las estaciones, registrándose espaciamientos menores de 200 a 600 mm en la estación 5, con persistencias entre 1 y 3 m en todas las estaciones evaluadas.

Las superficies de las discontinuidades presentan características ligeramente rugosas a rugosas, con bajo grado de alteración, siendo ligeramente rugosas en las estaciones 1, 2 y 5, y rugosas en las estaciones 3 y 6. En conjunto, las características mecánicas y estructurales observadas indican un macizo rocoso competente, con condiciones favorables para el diseño de taludes estables y la aplicación de un método de explotación por bancos en condiciones de seguridad operativa.

Tabla 2. Reporte de Estaciones Geomecánicas

EG	RQD	RM R	GSI	σ_{ci} (MPa)	c' (MPa)	ϕ
EG1	76	67	70	90 MPa	1.305 Mpa	48.09
EG2	79	69	75	95 MPa	2.074 Mpa	49.32
EG3	74	68	70	80 MPa	1.173 Mpa	47.56
EG4	76	69	75	80 MPa	1.761 Mpa	48.70
EG5	68	60	65	70 MPa	0.718 Mpa	45.22
EG6	76	70	70	95 MPa	1.371 Mpa	48.32

C. Análisis cinemático en DIPS

El análisis cinemático del macizo rocoso se realizó mediante el software DIPS a partir de los datos estructurales obtenidos en las seis estaciones geomecánicas evaluadas, considerando dos propuestas de diseño del método de explotación del yacimiento de calizas Polloc.

Los resultados evidencian que el Diseño A presenta, en general, mayores porcentajes de cuñas críticas y mecanismos de rotura planar en comparación con el Diseño B. En particular, se registraron porcentajes de cuñas críticas

moderados en varias estaciones, destacándose valores entre 13 % y 19 % en las estaciones 1, 2 y 3, mientras que en la estación 4 se identificó un comportamiento similar, con presencia adicional de rotura planar significativa.

En la estación 5 se observaron los mayores porcentajes de inestabilidad potencial, tanto por cuñas como por rotura planar, en ambos diseños, lo que evidencia una mayor influencia de la orientación de las discontinuidades en este sector del yacimiento.

Asimismo, en la estación 6 se identificaron porcentajes elevados de cuñas críticas para el Diseño A, los cuales disminuyen de manera significativa al evaluar el Diseño B, manteniéndose valores moderados respecto a la rotura planar. En conjunto, los resultados del análisis cinemático indican que, si bien los porcentajes de inestabilidad potencial son variables entre estaciones, el Diseño B presenta un comportamiento geomecánico más favorable en términos de estabilidad global de taludes.

No obstante, los mecanismos de falla identificados, especialmente aquellos asociados a cuñas y rotura planar en determinadas estaciones, deben ser considerados en el planeamiento de minado a corto plazo y en la gestión operativa de la explotación de la caliza.

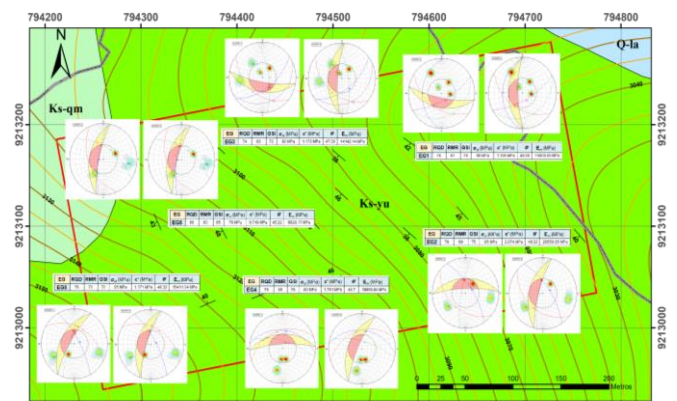


Figura 5. Análisis cinemático del macizo rocoso del yacimiento de calizas Polloc, realizado con el software DIPS a partir de datos estructurales de 6 estaciones geomecánicas. Se comparan los mecanismos de inestabilidad potencial por cuñas y rotura planar para los diseños A y B, observándose mayores porcentajes de inestabilidad en el Diseño A. Destaca la estación 5 con los valores más elevados en ambos diseños, mientras que el Diseño B presenta un comportamiento geomecánico más favorable en términos de estabilidad global de taludes.

D. Diseños del método de Explotación

Tras procesar los datos de las 6 Estaciones y conocer el comportamiento geomecánico del área de Investigación, se procedió a realizar el diseño del Método de Explotación del Yacimiento de Calizas Polloc. Dentro de los parámetros principales para el diseño, se consideró:

- El ángulo mínimo de fricción y el valor mínimo de cohesión obtenidos en el Software RocData de acuerdo a los resultados del Estudio Geomecánico .

- El análisis cinemático realizado mediante DIPS considerando 2 escenarios para el diseño.

Teniendo en cuenta que la caliza del Yacimiento Polloc se encuentra expuesta en superficie, el método de explotación idóneo corresponde a explotación de Tajo Abierto. Asimismo, de la evaluación geomecánica y la topografía del área de investigación se utilizará el método de explotación por bancos. En este caso la alternativa de explotación es mediante Bancos Escalonados Ascendentes, un método frecuentemente utilizado ya que facilita aperturar la cantera al requerir una distancia mínima a la vía de transporte y del mismo modo, el frente de trabajo siempre se encuentra activo.

Considerando las condiciones geomecánicas del yacimiento de Calizas Polloc y los valores mínimos de Resistencia a la Compresión Uniaxial $RCU=70$ MPa; cohesión $c' = 0.718$ MPa y ángulo de fricción $\phi= 45.22^\circ$, se determinó un ángulo de banco de 75° con el fin de asegurar la estabilidad del diseño y garantizar la seguridad de las operaciones:

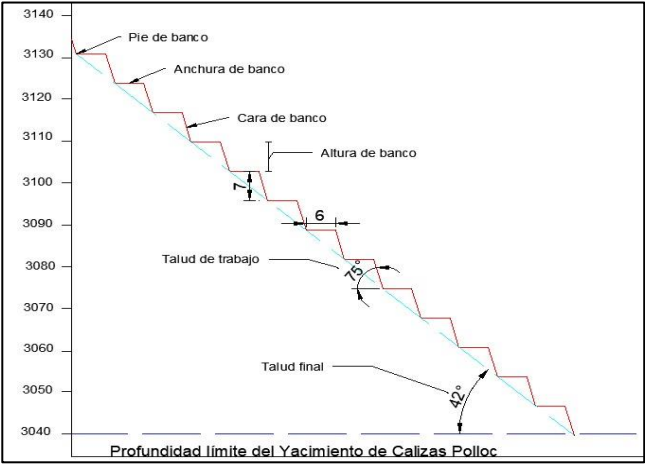


Figura 6. Parámetros geométricos de diseño

Diseño del Método de Explotación (Propuesta A)

Para el Diseño A consideraron los Parámetros Geométricos propuestos en la Fig. 6.

Talud de trabajo: 42°
 Talud de banco: 75°
 Altura del banco: 7 metros
 Anchura de banco: 6 metros

El objetivo del diseño A es aprovechar la mayor cantidad de material a explotar dentro del área delimitada por el titular, considerando para ello el análisis cinemático de rotura planar y en cuña realizado en el Software DIPS. Al tener bajos porcentajes críticos de rotura y determinar un ángulo de talud que genera condiciones de estabilidad. El Diseño A es una propuesta de extracción que busca obtener una alta producción a bajos costos considerando las cortas distancias hacia la vía de transporte. Así también al considerar las Condiciones Geomecánicas del Yacimiento, el método permite mejores condiciones de seguridad y se genera un menor impacto visual. En la fig. 7 se presenta el Perfil A-A'

de dirección E-W, el cuál será utilizado además para la cubicación de reservas.

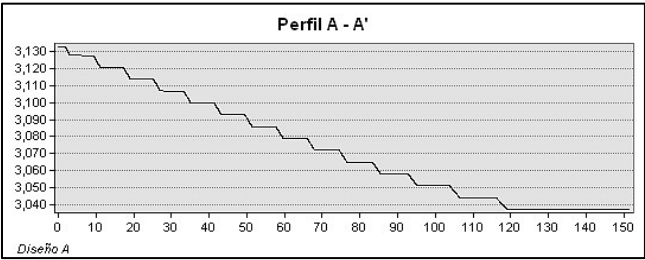


Figura 7. Perfil A-A' - Diseño A del Método de Explotación del Yacimiento de Calizas Polloc.

Cubicación de reservas: Se determinó el volumen de Reservas del Yacimiento de Calizas Polloc considerando el Perfil A - A'. El volumen determinado es 3202850.94 m^3 y teniendo un peso específico de la caliza igual a 0.026 MN/m^3 , se tiene una estimación de reservas igual $8,327,412.4\text{ tm}$ de acuerdo con la tabla 3.

Tabla 3. Cubicación de reservas, Diseño A

Diseño	Perfil	Volumen	Reservas
A	A-A'	$3,202,850.94\text{ m}^3$	$8,327,412.4\text{ tm}$

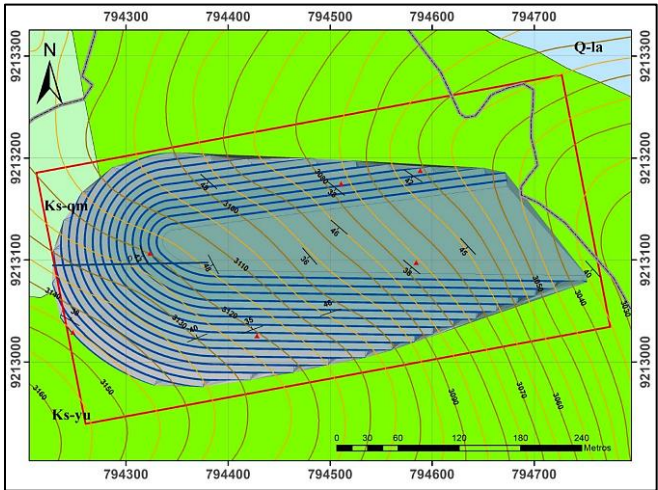


Figura 8. Vista en planta del diseño A

Diseño del Método de Explotación (Propuesta B)

Para el diseño B se ha considerado la intención del Titular de la cantera de ampliar el área de extracción en dirección SE. Si bien se cuenta con un área determinada para el Diseño del Método de Explotación, el titular tiene planificado adquirir una mayor extensión de terreno principalmente en dirección SE respecto al área de explotación. Los parámetros son considerados de acuerdo con la Fig. 6:

Talud de trabajo: 42°
 Talud de banco: 75°
 Altura del banco: 7 metros
 Anchura de banco: 6 metros

La finalidad el Diseño B es ampliar a mediano plazo el área de explotación de la cantera, aumentando así las reservas; es por ello que el límite del diseño de acuerdo con la Geología Local es el grupo Quilquínán Mujarrún. Por otro lado, el Diseño B permite obtener mejores condiciones de seguridad y al tener una plataforma de trabajo más amplia, se facilitará el carguío del material. En la Fig. 9 se presenta el Perfil B-B' de dirección S-W del Diseño B, el cuál será utilizado además para la cubicación de reservas.

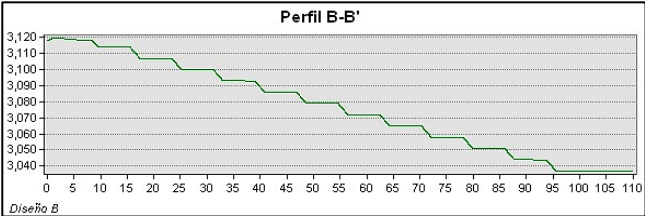


Figura 9. Perfil B-B' - Diseño B del Método de Explotación del Yacimiento de Calizas Polloc

Para el Diseño B, se determinó el volumen de Reservas del Yacimiento de Calizas Polloc considerando el Perfil B - B'. El volumen determinado es 3,007,329.67 m³ y teniendo un peso específico de la caliza igual a 0.026 MN/ m³, se tiene una estimación de reservas igual 7,819,057.14 tm de acuerdo con la tabla 4

Tabla 4. Cubicación de reservas, Diseño B

Diseño	Perfil	Volumen	Reservas
B	B-B'	3,007,329.67 m ³	7,819,057.14 tm

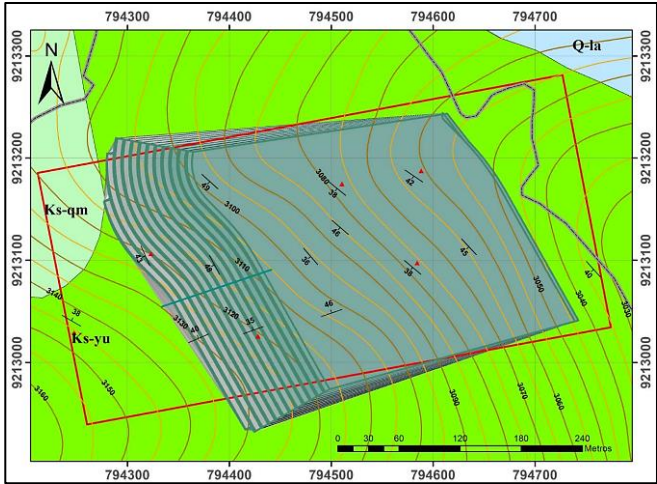


Figura 10. Vista en planta del diseño B

El análisis de las 6 Estaciones determina que todo el material calcáreo presenta estructuras moderadamente fracturadas y levemente meteorizadas, Calidad de Roca Buena con RQD entre 68 a 79, RMR89 con valores que oscilan entre 60 y 70, GSI entre 65 a 75 y Resistencia a la Compresión Uniaxial RCU de 70 a 95; valores de cohesión de 0.718 MPa a 2.074 Mpa y ángulo de fricción de 45.22° a 49.32° y bajos porcentajes críticos de rotura planar y cuñas. Se determina que el Comportamiento Geomecánico del Yacimiento de Calizas Polloc brinda

condiciones óptimas para el Diseño del Método de Explotación por Bancos Escalonados Ascendentes, por lo que se contrasta la hipótesis.

Así también, a partir de la comparación de las dos propuestas de diseño del método de explotación, se determina que el Diseño B presenta condiciones geomecánicas más favorables para la estabilidad global de los taludes. Los resultados del análisis cinemático evidencian menores porcentajes de rotura planar y en cuña respecto al Diseño A, especialmente en las estaciones con mayor grado de fracturamiento. Asimismo, el Diseño B ofrece mejores condiciones de seguridad operativa y mayor flexibilidad para la ampliación futura del área de explotación, manteniendo parámetros geométricos compatibles con las características geomecánicas del macizo rocoso. En consecuencia, el Diseño B es considerado como el diseño óptimo del método de explotación del yacimiento de calizas Polloc.

Desde una perspectiva ambiental, el Diseño B presenta ventajas adicionales frente al Diseño A. La optimización de los taludes reduce el volumen de material estéril generado, lo que disminuye la necesidad de áreas de disposición y el impacto sobre el suelo. Aun en rocas de alta resistencia, la estabilidad en canteras depende principalmente de la caracterización geomecánica, ya que factores como las discontinuidades y el tamaño de bloque controlan el comportamiento del macizo, evidenciando la importancia de estos análisis para identificar zonas estables e inestables y garantizar un diseño seguro de taludes [17]. Asimismo, una mayor estabilidad de taludes contribuye a prevenir procesos de erosión y caída de rocas, reduciendo riesgos ambientales y de seguridad. Además, la geometría propuesta facilita la implementación de planes de cierre progresivo, permitiendo la revegetación de bancos y la recuperación del paisaje intervenido, aspectos clave en la minería sostenible.

En contraste con los resultados del yacimiento Polloc, el estudio de Bezie et al. (2024) [18] reporta condiciones más críticas de estabilidad en canteras con alta probabilidad de vuelco (42.68%) y factores de seguridad menores a 1 bajo cargas dinámicas, evidenciando inestabilidad; asimismo, demuestra que la reducción del ángulo de banco (90° a 65°–75°) mejora la estabilidad, aunque incrementa la pérdida de reservas y reduce la producción, lo cual coincide con el presente estudio, donde el ángulo de 75° representa un equilibrio entre estabilidad y aprovechamiento del recurso. De manera complementaria, análisis como el realizado por Campos et al. (2022) [19] evidencian que la estabilidad de taludes en canteras está fuertemente condicionada por la geometría y la orientación de las discontinuidades; estos resultados refuerzan que el diseño óptimo del talud, es una medida clave para mejorar la estabilidad de los macizos fracturados.

IV. CONCLUSIONES

El cartografiado geológico–geotécnico del yacimiento de calizas Polloc, realizado en seis estaciones geomecánicas mediante el registro de Rodríguez (2016), permitió identificar una litología homogénea correspondiente a calizas del Grupo

Pulluicana (Formación Yumagual), con un fracturamiento moderado y bajo grado de meteorización.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso, basada en los índices RQD, RMR89, GSI y la resistencia a la compresión uniaxial (RCU), determinó que la roca presenta una calidad predominantemente buena, con valores de RQD entre 68 y 79, RMR89 entre 60 y 70, GSI entre 65 y 75, y RCU entre 70 y 95 MPa.

A partir del procesamiento de datos en el software RocData se obtuvieron parámetros resistentes representativos del macizo rocoso, con valores de cohesión comprendidos entre 0.718 y 2.074 MPa y ángulos de fricción entre 45.22° y 49.32°, lo que confirma el carácter compacto y competente de la caliza del yacimiento Polloc.

El análisis cinemático realizado mediante el software DIPS evidenció bajos porcentajes críticos de rotura planar y en cuña, indicando condiciones favorables de estabilidad para el diseño de taludes y bancos de explotación en la cantera.

En función de las condiciones geomecánicas determinadas, se diseñó un método de explotación por bancos escalonados ascendentes, estableciendo como parámetros óptimos una altura de banco de 7 m, una anchura de banco de 6 m, un ángulo de banco de 75° y un ángulo de talud final de 42°, garantizando estabilidad geotécnica y seguridad operativa.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el comportamiento geomecánico del yacimiento de calizas Polloc es favorable para su explotación a cielo abierto, validando la hipótesis planteada y proporcionando una base técnica confiable para la planificación y desarrollo de la cantera.

Finalmente, el Diseño B no solo representa la alternativa más adecuada desde el punto de vista geomecánico, sino que también contribuye a una explotación más sostenible del yacimiento, al reducir la generación de material estéril, facilitar la rehabilitación progresiva del terreno y minimizar el impacto ambiental de la actividad minera.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Privada del Norte por darnos la Oportunidad de trabajar este paper y poder presentarlo para su publicación.

REFERENCIAS

- [1] Barragán, J. (2007). *Explotación a cielo abierto de materiales de construcción*. Ecuador: Taller de capacitación para administradores y trabajadores de canteras.
- [2] Herrera Herbert, J. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] Carlotto, V., & Peña, F. (2012). *Geología e Hidrogeología regional (1:50000) de la zona del proyecto Conga y alrededores*. Lima: INGEMMET.
- [4] DeMatteis, A. (2003). *Geología y Geotecnia*. Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
- [5] Gavilanes, H., & Andrade Haro, B. (2004). *Introducción a la Ingeniería de Túneles*. Quito: Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador.
- [6] Hoek, E., & Brown, E. (1997). *Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica*. Chile: CODELCO.
- [7] Marinos, P., Marinos, V., & Hoek, E. (2014). *El índice de resistencia geológica GSI*. Canadá.
- [8] Gutiérrez Arroyo, K. G. (2019). *Análisis y evaluación entre métodos de explotación en cantera de caliza UNACEM SAA*. UNMSM.
- [9] Ferrer Calderón, F. J. (2015). *Planeamiento de minado de largo plazo para proyecto minero no metálico*. PUCP.
- [10] Contento Franco, J. A., & Pinto Cervantes, I. D. (2014). *Diseño del método de explotación del yacimiento de caliza Mina La Esperanza*. UPTC.
- [11] Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. UPM.
- [12] Huamán Vera, J., & Quispe Santa Cruz, B. C. (2019). *Método de extracción por bancos descendentes*. UCV.
- [13] Tingo Campos, L. M. (2016). *Evaluación geomecánica de rocas calcáreas del yacimiento Llacchuas*. UNSCH.
- [14] Piérola Vera, D. (2017). *Optimización del plan de minado de cantera de caliza La Unión*. UNA Puno.
- [15] Ros Esteban, A. (2006). *Manual de anclajes para minería y obra civil*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [16] Reyes, L. 1980. *Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba*. Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- [17] Alogo-Nguema, Alfonso, Cartaya-Pire, Maday, Sargentón-Romero, Gilberto, Cuesta-Recio Armando. *Comportamiento estructural del macizo rocoso de la cantera Baney, Bioko Sur, Guinea Ecuatorial. Minería y Geología [en línea]*. 2022, 38(3), 266-276. ISSN: . Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223574524006>
- [18] Bezie, G., Chala, ET, Jilo, NZ et al. *Análisis de la estabilidad de taludes rocosos en una cantera de piedra caliza: un estudio de caso de una fábrica nacional de cemento en el este de Etiopía*. *Sci Rep* **14**, 18541 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69196-8>
- [19] Campos, F., Mora, R., Sequeira, J., & Garnier, M. (2021). *Aplicación de análisis de admisibilidad cinemática y equilibrio límite para optimizar la geometría de explotación de una cantera en el cantón de León Cortes, San José, Costa Rica*. *Revista geológica De América Central*, 66, 1–25. <https://doi.org/10.15517/rgac.v66i0.49786>