

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

Application of kinematic admissibility and limit equilibrium analysis to optimize the geometry of exploitation of a quarry in the canton of León Cortes, San José, Costa Rica

Fabián Campos*, Rolando Mora, José Sequeira y Maximiliano Garnier

Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela Centroamericana de Geología (ECG), Laboratorio de Geomecánica, San José, Costa Rica

*Autor para contacto: fab.camo@gmail.com

(Recibido: 21/07/2021; aceptado: 30/11/2021)

RESUMEN: Se estudia una cantera para establecer las orientaciones más favorables de los taludes para la extracción del material, asegurando la estabilidad de los mismos. Se ha realizado la caracterización geomecánica de los suelos de cobertura y el macizo rocoso del lugar, definiendo los parámetros físicos y mecánicos relevantes para cumplir con los objetivos del trabajo. Se han definido las orientaciones de las familias de discontinuidades principales, para ejecutar los análisis de admisibilidad cinemática y equilibrio límite que propicien el diseño de una geometría de taludes de explotación estable. Finalmente, se establecen conclusiones y recomendaciones para orientar una explotación segura del sitio.

Palabras clave: admisibilidad cinemática; macizos rocosos; estabilidad de taludes; explotación minera; gestión del riesgo.

ABSTRACT: This is a study to establish the most favorable orientations of the slopes for the extraction of the material and to ensure the stability of a quarry. It includes the geomechanical characterization of the covering soils and the rock mass of the site, defining the relevant physical and mechanical parameters to meet the objectives of the work. The definition of the orientations of the main discontinuities drives the kinematic admissibility and limit equilibrium analyzes for the design of a stable exploitation slope geometry. Finally, conclusions and recommendations to guide the safe operation of the site are drawn.

Keywords: kinematic admissibility; rock mass; slope stability; mining exploitation; risk management.



Introducción

La explotación de canteras en Costa Rica se ha realizado históricamente de forma artesanal, en donde la experiencia de los operarios es la que dicta las inclinaciones y las alturas de corte en los materiales, buscando maximizar el volumen de explotación, lo que conlleva en ocasiones a un diseño inseguro, fallas en los taludes y hasta pérdidas de vidas humanas.

Aplicando los principios de la mecánica de suelos y rocas, es posible caracterizar los materiales, modelar diferentes escenarios y comprender cuál sería la estabilidad del medio, lo cual permite optimizar el diseño de la cantera y garantizar la seguridad de la obra.

El presente estudio se ha ejecutado con el propósito primordial de establecer las direcciones más favorables para la extracción del material en una cantera y formular recomendaciones para asegurar la estabilidad de un tajo ubicado en el distrito de Llano Bonito, cantón de León Cortés, en la provincia de San José (Fig. 1).

Para definir la geometría recomendada para la explotación del tajo, en el campo se realizó una clasificación del macizo rocoso de acuerdo con la teoría de Hoek y Marinos (2000) y un levantamiento a detalle de las principales discontinuidades que afloran en las caras expuestas del macizo rocoso. Se realizaron además tres sondeos de penetración dinámica tipo DPM en la parte superior de la cantera, para definir el espesor de cobertura de suelos y se recolectaron dos muestras de suelo y tres muestras de roca para ensayos de laboratorio (Fig. 2).

Con las muestras de suelos se llevaron a cabo ensayos de granulometría, límites de Atterberg, peso unitario, contenido de humedad y gravedad específica; así como ensayos de resistencia mediante corte directo consolidado drenado. Las muestras de roca se analizaron con ensayos de carga puntual y de peso unitario. En la figura 3 se presenta la ubicación de los ensayos en el área de estudio y los sitios de toma de muestras de suelo y de roca para ensayos de laboratorio.

Los análisis de estabilidad se realizaron mediante los paquetes computacionales suministrados por Rocscience.

Alcances de la investigación

Esta investigación se enfoca en los aspectos geomecánicos del área de estudio, caracterizando los suelos y rocas, y analizando su estabilidad ante diferentes mecanismos de falla. De acuerdo a los resultados del análisis de estabilidad se establece la inclinación y las direcciones de corte del talud con las menores probabilidades de falla.

No es objetivo de esta investigación la viabilidad económica, ni el diseño de extracción de la cantera.

Caracterización de los materiales geológicos

En el área de la cantera los suelos se encuentran cubriendo al macizo rocoso, con los mayores espesores en la parte superior. El macizo se encuentra aflorando en cuatro sectores, con características estructurales bien diferenciadas entre sí, como es el caso del grado de fracturación y el número de familias de discontinuidades.

Caracterización de los suelos

Se recolectaron dos muestras de suelo (Fig. 3) para obtener sus propiedades físicas y mecánicas por medio de ensayos de laboratorio. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los suelos en la parte superior de la cantera corresponden a limos con arena (ML) de plasticidad baja, caracterizados por un alto contenido de partículas finas (70-78%), un 20% a 25% de arena y menos de 5% de grava. Los Límites de Atterberg indican un límite líquido de 40% y un límite plástico de 25% (Cuadro 1). Adicionalmente, se obtuvo un peso unitario promedio de 17 kN/m³, y se determinaron los parámetros de resistencia mediante ensayos de corte directo, resultando en una cohesión de 0 kPa al tratarse de un ensayo consolidado drenado (Cuadro 2) y un ángulo de fricción de 37,6° y 38,0° para las dos muestras de suelo debido al contenido de arena y grava en los suelos (Cuadro 3).

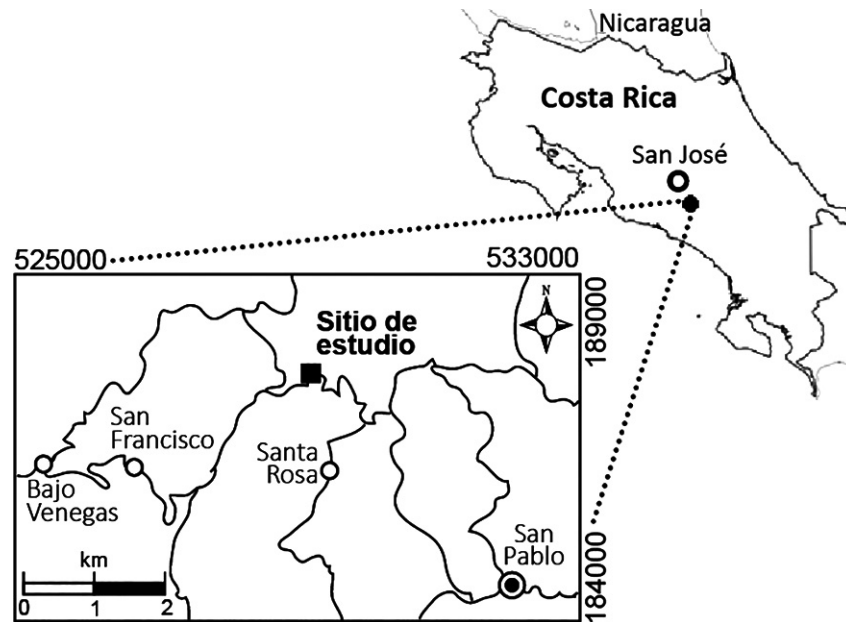


Fig. 1: Ubicación de la cantera en los alrededores de León Cortés.

Para la determinación de la estratigrafía en el sector superior de la cantera, se realizaron tres sondeos de penetración dinámica (Fig. 3), con los que fue posible establecer un espesor de 5,5 m de suelos sin consistencia a moderadamente consistentes y un halo de roca meteorizada muy consistente de aproximadamente 4,0 m de espesor antes de alcanzar la roca extremadamente consistente (Fig. 4). En el sector de pendiente moderada (MSG-1) se identificó la roca sana a 9,5 m de profundidad. En el sector del sondeo MSG-2, cerca de los afloramientos de roca, el espesor de materiales por encima del macizo rocoso es mucho menor, encontrándose la roca a una profundidad de 1,5 m.

Caracterización del macizo rocoso

El macizo rocoso de la cantera corresponde con rocas de la Formación Pacacua, la cual involucra una secuencia sedimentaria influenciada por vulcanismo. Litológicamente se trata de volcanoclastitas de granulometría diversa, caracterizadas por estratificaciones decimétricas hasta métricas de areniscas volcanoclastitas (finas, gruesas y guijarrosas), tobas, tobitas y brechas finas y gruesas (Denyer y Arias, 1991). El análisis petrográfico identifica a las rocas como areniscas rudíticas polimícticas volcanoclastitas (Fig. 5). La textura de la roca es clástica con predominio de litoclastos subangulosos de origen volcánico y granulometría de arena gruesa.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso se realizó empleando el Índice de Resistencia Geológica (GSI) de Hoek y Marinos (2000), el cual se basa en el estado de la superficie de las discontinuidades y la estructura del macizo rocoso; específicamente la cantidad de discontinuidades y su arreglo. Para la cantera se ha asignado una calificación GSI de 45, debido a la presencia de más de cuatro familias de discontinuidades que forman bloques angulares y con superficies de meteorización moderada (Fig. 6).

Las discontinuidades por su parte caracterizan por ser rugosas y moderadamente alteradas con rellenos blandos y con aberturas de entre 0,5 a 5 mm; sin evidencia de agua freática.

Para el análisis de la resistencia se recolectaron tres muestras de roca (Fig. 3) y mediante ensayos de carga puntual se logró determinar que la resistencia a la compresión uniaxial varía en el horizonte de meteorización de 40,9 MPa a 51,5 MPa (Cuadro 4). Las propiedades de resistencia a la compresión uniaxial caracterizan la roca meteorizada por lo se puede asignar una resistencia a la compresión uniaxial mayor o igual a 52 MPa para la roca sana.

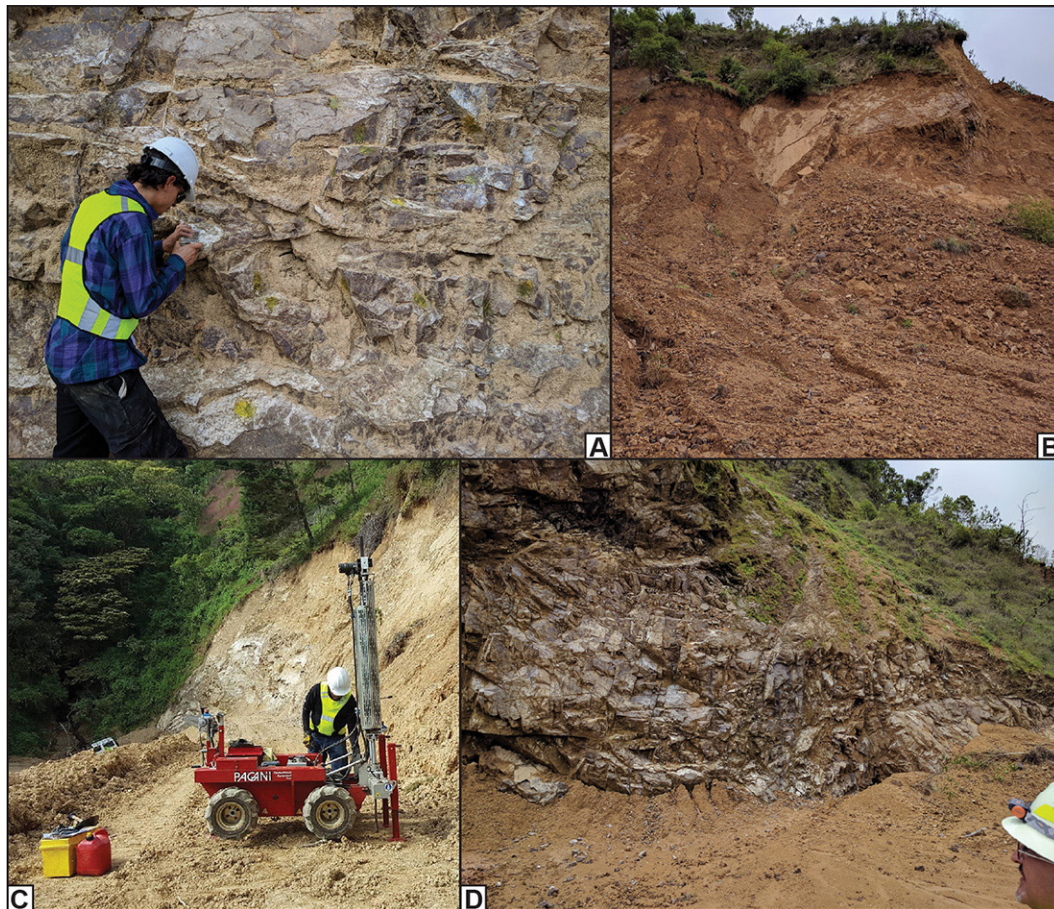


Fig. 2: Trabajos de campo realizados: (A) Levantamiento de las discontinuidades en el macizo rocoso. (B) Caracterización geomecánica del macizo rocoso. (C) Sondeos de penetración dinámica. (D) Inspección y estado actual de la cantera.

Adicionalmente, se realizaron ensayos de laboratorio para la determinación del peso unitario de las tres muestras de roca, los resultados indican en promedio un peso unitario de $25,04 \text{ kN/m}^3$ (Cuadro 5), sin considerar el resultado de la muestra M1B al presentar un resultado estadísticamente atípico.

La resistencia del macizo rocoso se determinó ajustando el criterio de Hoek y Brown (1980), a la envolvente de ruptura de Mohr-Coulomb. Para ello se utilizó la resistencia a la compresión uniaxial obtenida de los ensayos de carga puntual de 51

Cuadro 1

Clasificación de los suelos de cobertura.

Muestra	Grava [%]	Arena [%]	Limo [%]	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Índice de plasticidad (IP)	Clasificación SUCS
M-01	4,7	25,1	70,2	38,4	25,9	12,5	Limo con arena (ML), de plasticidad baja
M-02	0,3	20,8	78,9	40,7	25,8	14,9	Limo con arena (ML), de plasticidad baja

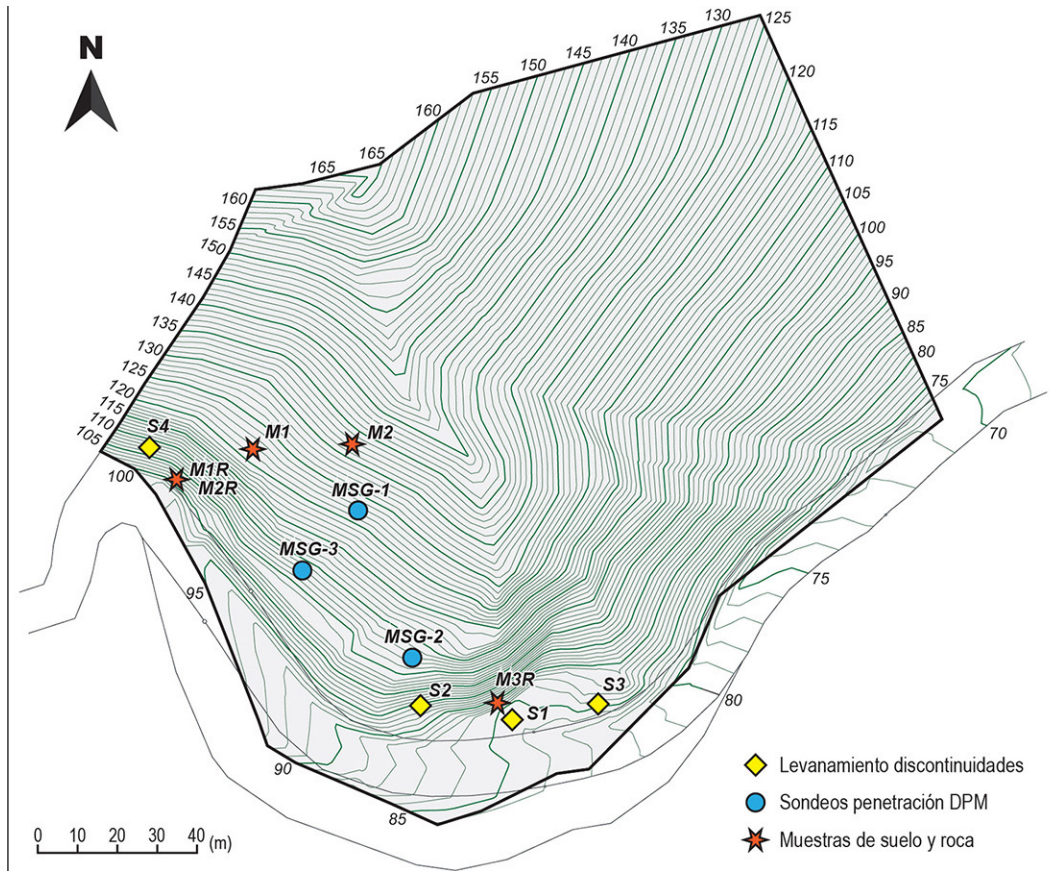


Fig. 3: Topografía de la cantera con la ubicación de los ensayos de campo y muestras de suelo y roca recolectadas para ensayos de laboratorio.

MPa, y la clasificación GSI realizada en el campo (GSI 45). Los parámetros de resistencia resultantes indican una cohesión de 0,33 MPa y un ángulo de fricción interna de 35,8° para el macizo rocoso.

Finalmente, se realizó el *tilt-test* para determinar el cono de fricción para el análisis de estabilidad, determinándose sobre las discontinuidades un ángulo de 34° para el movimiento de la roca.

Cuadro 2

Propiedades físicas de los suelos de cobertura.

Muestra	γ_h	γ_d	γ_{sat}	w	GS	n	Sr
	Peso unitario húmedo [kN/m ³]	Peso unitario seco [kN/m ³]	Peso unitario saturado [kN/m ³]	Contenido de humedad [%]	Gravedad específica	Porosidad [%]	Relación de saturación [%]
M-01	17,2	13,8	18,7	24,6	2,7	47,4	73,1
M-02	16,7	12,8	16,7	29,9	2,6	49,3	79,4

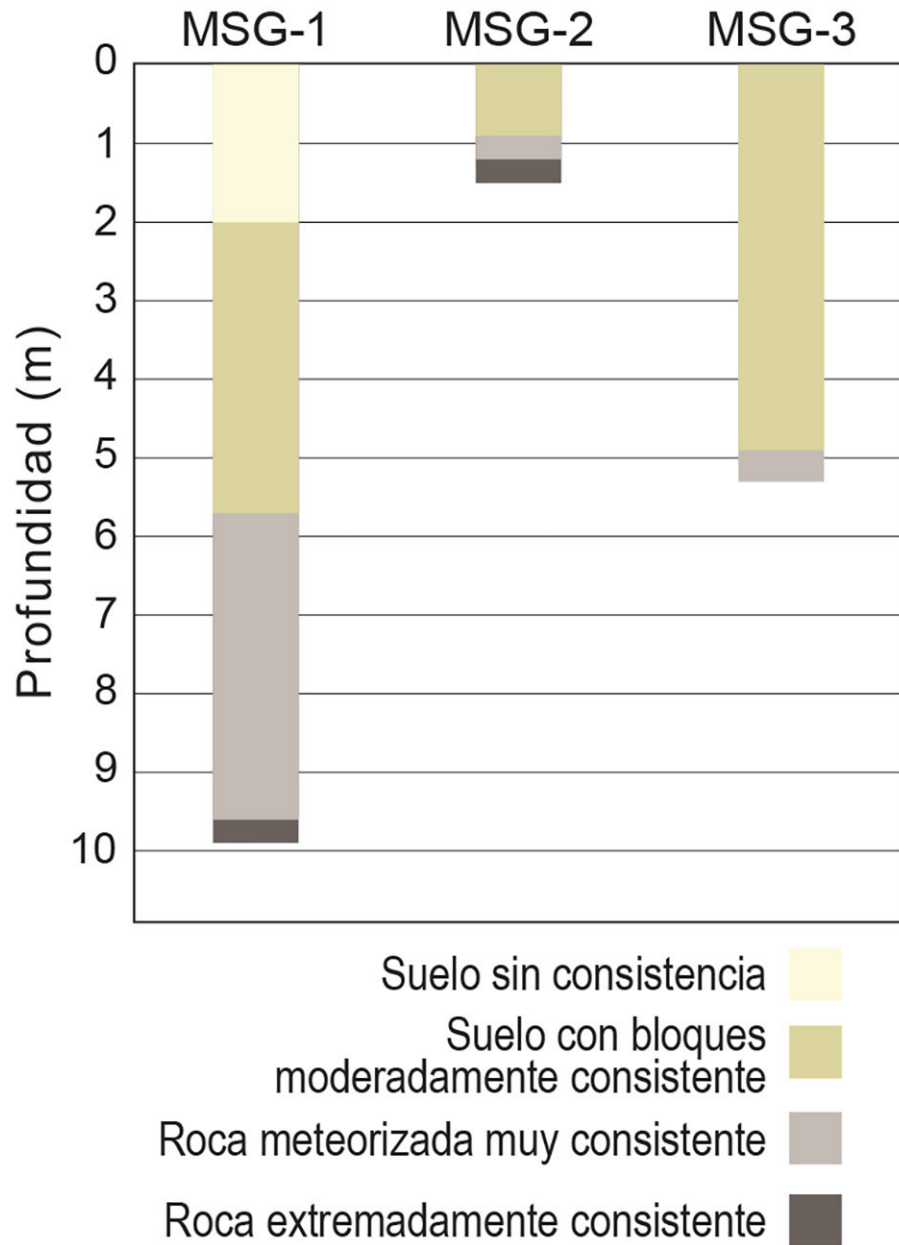


Fig. 4: Sondeos de penetración dinámica en el sector superior de la cantera.

Análisis de las discontinuidades del macizo rocoso

Para caracterizar las discontinuidades de acuerdo con la orientación de los frentes de trabajo en la cantera y las propiedades del macizo rocoso, se realizó un levantamiento de las discontinuidades en los afloramientos accesibles. Se identificaron cuatro sectores de interés (Fig. 3) en las que fue posible la recolección de datos, para un total de 170 registros (Fig. 7) los cuales se

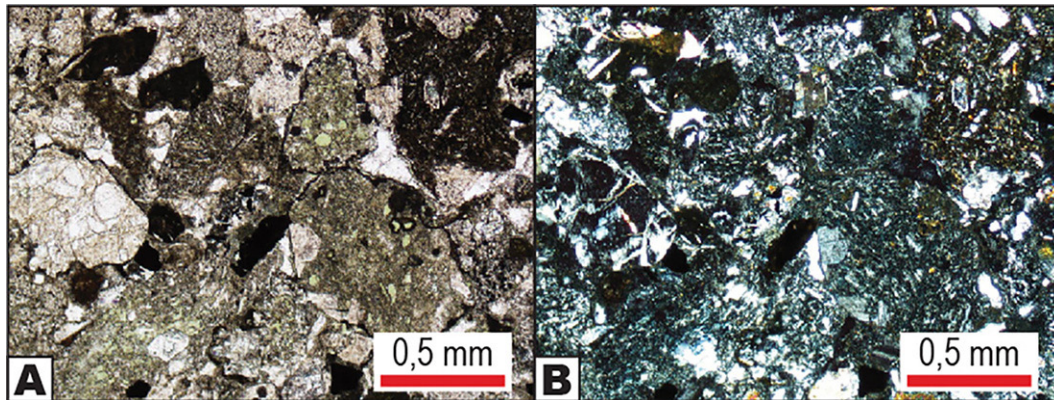


Fig. 5: Aspecto petrográfico general de la roca de la cantera con (A) nicols paralelos y (B) nicols cruzados.

presentan en el Cuadro 6. Una vez definidas las direcciones de las principales discontinuidades, se procedió a realizar un análisis de admisibilidad cinemática para analizar la probabilidad de ocurrencia de problemas de inestabilidad, considerando falla planar, por cuñas, volcamiento flexural y volcamiento directo como mecanismos de falla en el macizo rocoso.

Orientación de las discontinuidades

Con el análisis de cada uno de los sectores de afloramiento S1, S2, S3 y S4, se identificaron en la red estereográfica los planos de discontinuidad principales para el macizo rocoso (Fig. 8). El sector S1 es el que presenta mayor área de afloramiento, por lo que de acuerdo a las concentraciones de polos se lograron identificar tres planos principales: el principal con dirección de 170/54 y dos secundarios 51/62 y 355/66. En los sectores S2, S3 y S4 se identificaron dos planos principales por zona. En orden de importancia para cada sector los planos identificados son: sector S2 con 133/44 y 185/58, sector S3 con 353/70 y 179/46, y sector S4 con los planos 360/75 y 177/58. En el Cuadro 7 se resumen los planos principales y secundarios para las cuatro zonas de afloramiento investigadas en la cantera.

Cuadro 3

Propiedades mecánicas de los suelos de cobertura.

Muestra	c' Cohesión efectiva [kPa]	φ' Ángulo efectivo de fricción interna [Grad.]
M-01	0,0	37,6
M-02	0,0	38,0

Cuadro 4

Resumen de los resultados del ensayo de carga puntual.

Muestra	M1	M2	M3
Carga para un diámetro de 50 mm [kN]	4,7	4,4	5,6
Índice de resistencia a la carga puntual [MPa]	1,9	1,8	2,2
Resistencia a la compresión uniaxial [MPa]	42,8	40,9	51,5

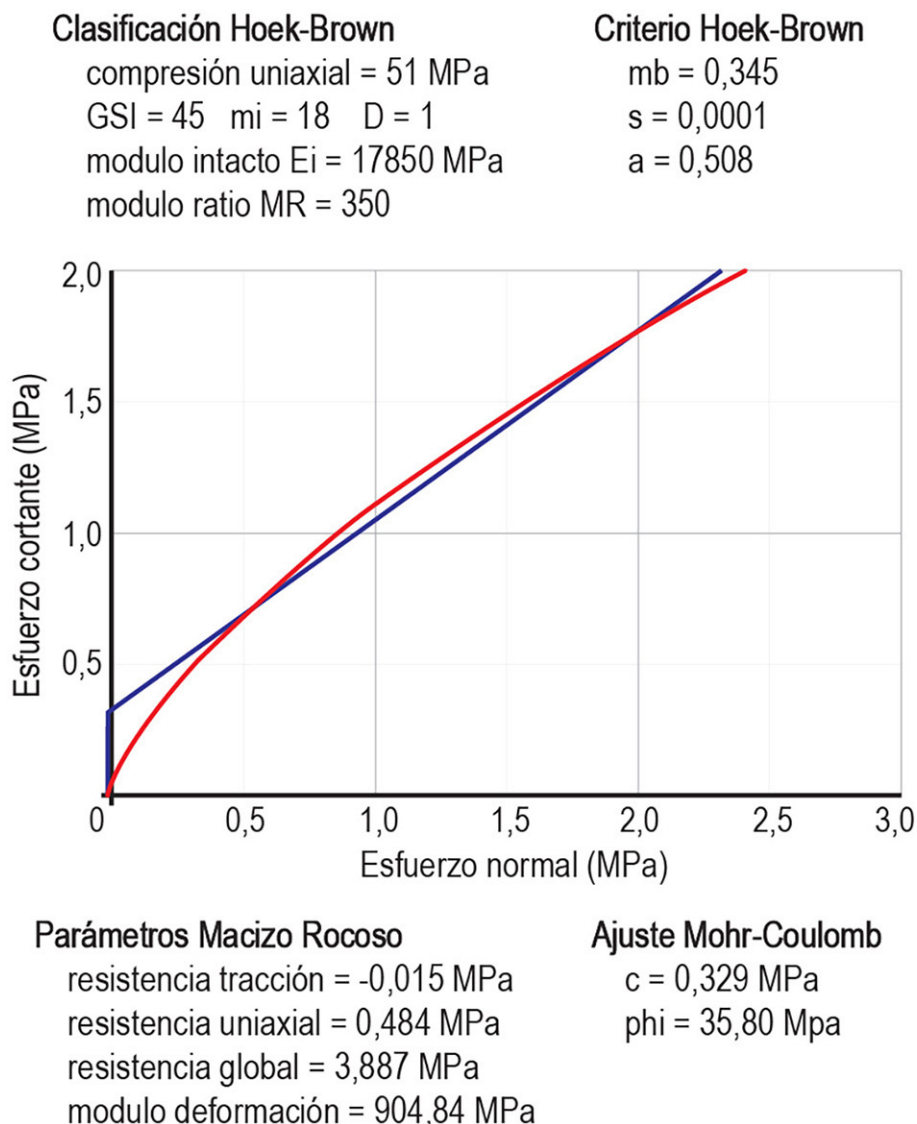


Fig. 6: Clasificación de Hoek-Brown con el ajuste de Mohr-Coulomb para el macizo rocoso fracturado.

Si se agrupan los resultados de los cuatro sectores resulta sencillo identificar que existen dos planos que se repiten con mayor frecuencia; así como dos planos que se podrían llamar secundarios y que aparecen individualmente de acuerdo con el sector que se considere (Fig. 9).

El primero de los planos principales que se repite en los cuatro sectores tiene una dirección de buzamiento aproximadamente al sur y un ángulo de buzamiento alrededor de 50° y se representa con el color verde en la figura. El segundo plano, de color azul, buza aproximadamente al norte con una inclinación alrededor de 70° . Además, aparecen dos planos secundarios: el primero de color violeta con dirección de buzamiento de $S47^\circ E$ y una inclinación de 44° , y el segundo de color celeste con una dirección de buzamiento de $N51^\circ E$ y una inclinación de 62° . Combinando los planos de discontinuidad de los cuatro sectores, se obtiene una concentración de polos como la que se presenta en la figura 10; para los cuales se identifican únicamente dos grupos que corresponden a los planos de discontinuidad con direcciones: $161/47$ y $355/70$.

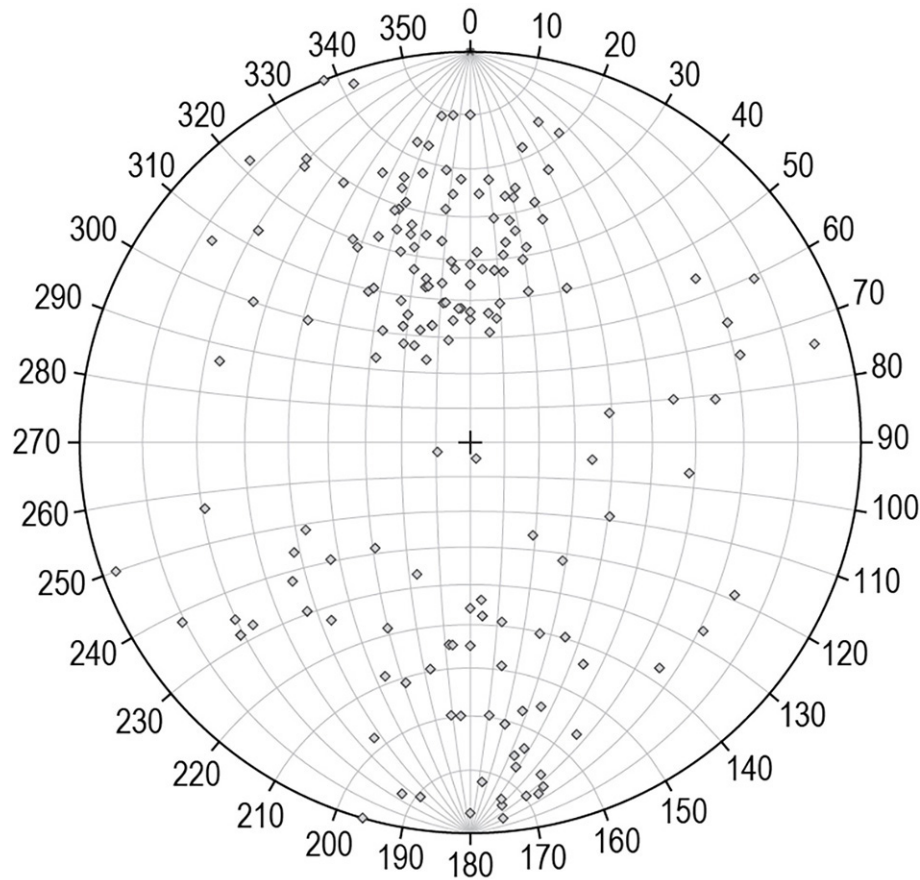


Fig. 7: Polos de los planos de discontinuidad identificados en el campo.

Análisis de admisibilidad cinemática

Utilizando el levantamiento de discontinuidades descrito anteriormente, se estudió la posibilidad de desprendimientos por superficies planares, cuñas, así como volcamiento de bloques de forma directa o ruptura flexural (Fig. 11).

Con el objetivo de maximizar el volumen de explotación, el análisis considera como punto de partida taludes de 60° de buzamiento (inclinación de la cara del talud) en todas las 360° direcciones posibles para la cara del talud en intervalos de 5°. El cono de fricción se definió en 34° de acuerdo al ensayo de *tilt-test*.

A modo de ejemplo se presenta el análisis cinemático de los cuatro tipos de desprendimientos estudiados para el escenario de un corte en el talud cuya inclinación tiene una dirección de 155° (Fig. 12). Se debe considerar además que las direcciones entre 270° a 90° se consideran inviables para el diseño debido a la orientación de la cantera con respecto a la carretera.

Cuadro 5

Resumen de los resultados de peso unitario en las rocas de la cantera.

Muestra	M1A	M1B	M2A	M2B	M3A	M3B
Peso unitario [kN/m ³]	25,2	18,5	25,0	24,5	25,5	25,1

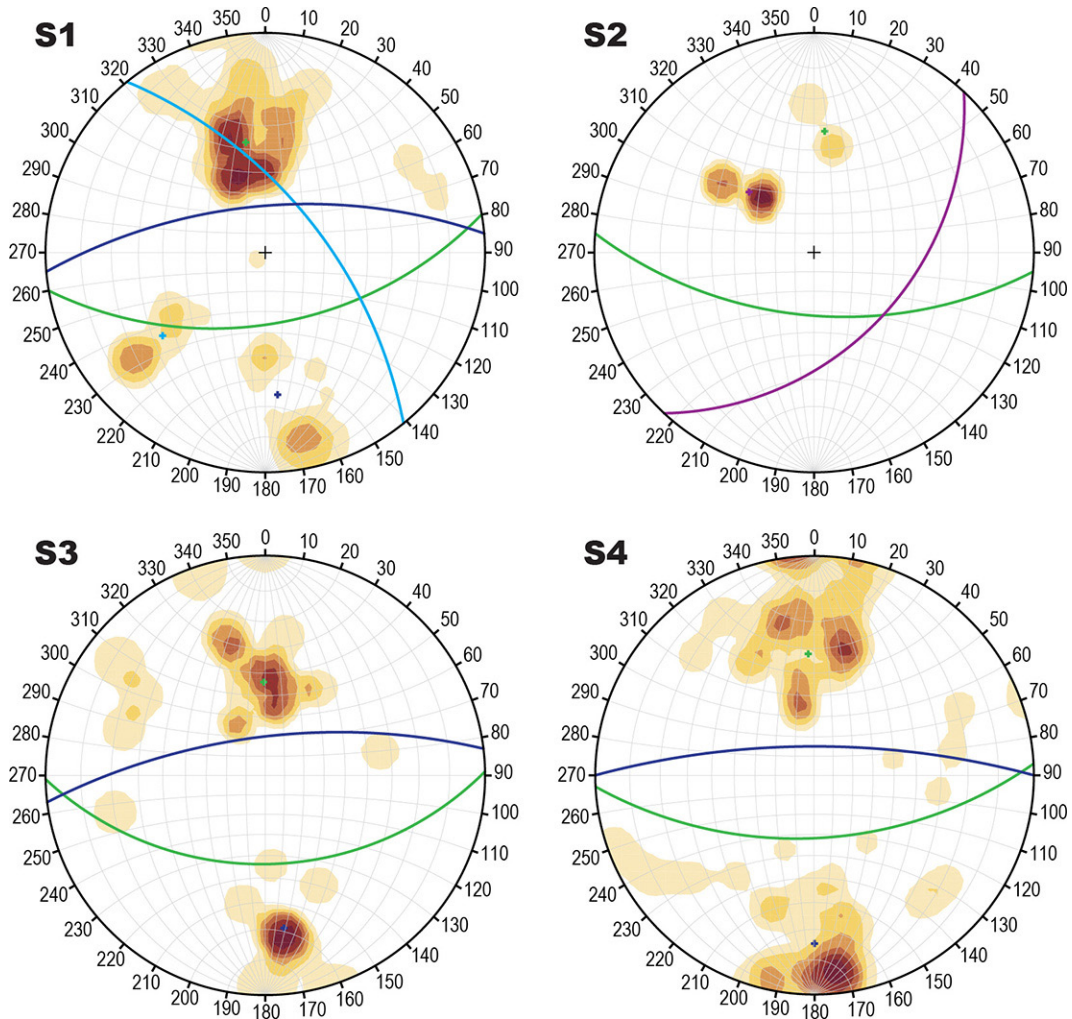


Fig. 8: Concentraciones de polos y discontinuidades principales para las zonas S1, S2, S3 y S4.

Superficie de desprendimiento planar

Para que se dé una falla planar se deben cumplir las siguientes condiciones en el talud: El buzamiento del talud debe ser mayor que el buzamiento de la discontinuidad, la inclinación de la superficie de falla debe ser mayor que el ángulo de fricción interna a lo largo de la discontinuidad y la dirección del talud (dirección de buzamiento del talud) debe ser quasi-paralela respecto a la dirección de buzamiento de la discontinuidad con un rango de variación de $\pm 20^\circ$.

La zona con orientaciones de la cara del talud entre 110° y 195° presenta de moderada a alta probabilidad de ocurrencia de fallas, debido a la congruencia entre la dirección de corte del talud y de las discontinuidades. Para obtener una baja a muy baja probabilidad de falla son viables únicamente las direcciones de corte 195° a 270° y 90° a 110° (Fig. 13).

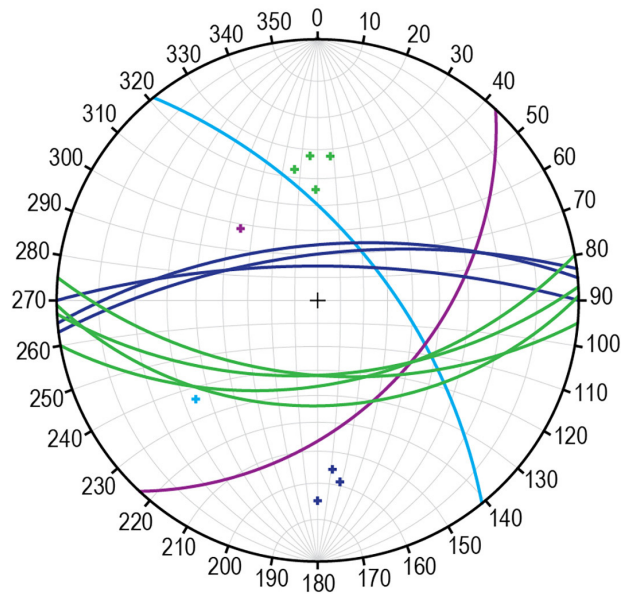


Fig. 9: Planos de discontinuidades principales y secundarias en la red estereográfica de las cuatro zonas de estudio.

Cuadro 6

Resumen de las orientaciones de las discontinuidades levantadas en el campo.

Ángulo de buzamiento y dirección de buzamiento							
60/161	44/180	32/326	52/190	68/108	65/15	50/174	58/334
60/165	55/0	55/164	68/178	77/350	86/355	45/170	44/356
79/149	65/165	34/146	50/212	67/123	60/150	50/148	32/150
40/169	73/154	75/50	48/188	47/165	30/168	48/188	68/165
45/164	62/44	35/156	61/10	65/260	88/355	52/196	36/192
5/340	35/180	80/175	45/201	48/191	80/192	38/150	32/190
44/154	80/240	55/24	64/163	70/349	65/195	67/190	45/165
50/162	55/160	60/52	88/162	70/345	65/20	50/350	85/11
71/234	35/278	76/300	70/356	80/352	72/162	55/190	85/8
51/62	40/42	72/252	65/188	59/278	58/192	37/188	62/150
56/58	85/142	85/254	80/128	90/16	40/22	75/50	70/170
10/74	55/6	75/50	52/182	48/175	72/50	78/352	72/245
35/162	48/356	74/53	87/0	65/190	82/358	62/174	82/58
65/176	38/176	58/164	49/180	80/150	75/309	44/298	60/38
80/177	40/192	50/50	27/152	40/170	60/352	60/156	35/172
40/154	60/190	55/340	57/168	40/258	62/198	55/5	85/355
75/172	79/196	46/0	37/180	75/135	65/182	38/175	42/322
60/186	77/18	40/154	56/258	70/2	85/349	77/340	55/172
72/196	70/166	85/351	70/76	74/320	75/190	90/158	70/175
48/184	68/184	84/348	72/353	55/196	64/162	65/333	76/170
50/146	70/4	82/348	72/353	88/70	80/180	55/127	35/162
36/132	40/142						

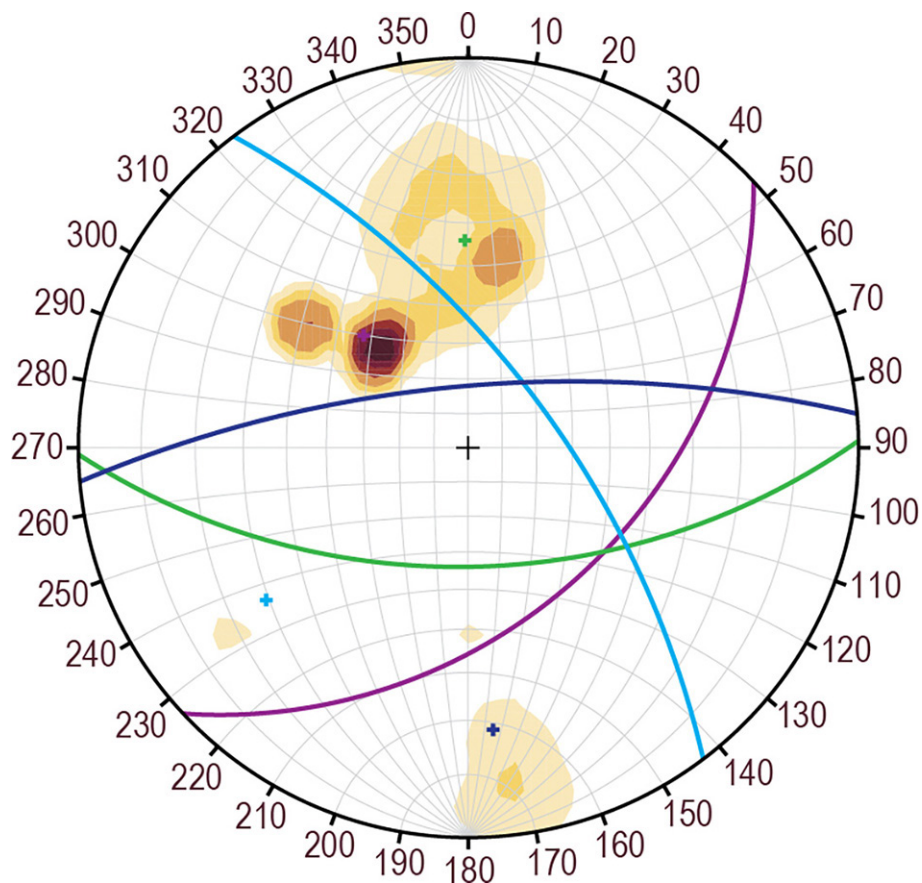


Fig. 10: Concentración de polos y discontinuidades principales para la totalidad de polos.

Cuadro 7

Planos principales de las cuatro zonas de estudio en la cantera.

Zona	Plano	Dirección de buzamiento		Ángulo de buzamiento
S1	Principal	S10°E	170°	54°
S1	Secundario	N51°E	51°	62°
S1	Secundario	N05°W	355°	66°
S2	Principal	S47°E	133°	44°
S2	Secundario	S05°W	185°	58°
S3	Principal	N07°W	353°	70°
S3	Secundario	S01°E	179°	46°
S4	Principal	Nf	360°	75°
S4	Secundario	S03°E	177°	58°

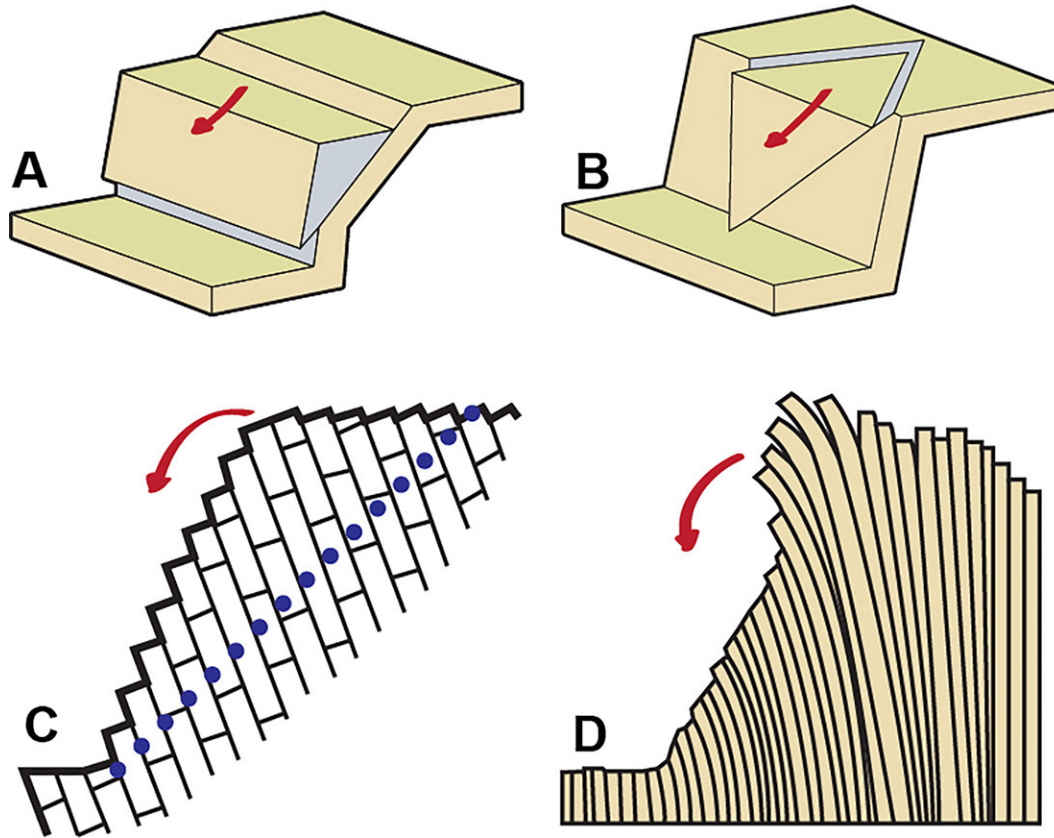


Fig. 11: Mecanismos de desprendimiento del análisis cinemático: (A) superficie planar, (B) Cuñas, (C) volcamiento directo y (D) volcamiento flexural.

Desprendimiento de cuñas

Los desprendimientos en cuñas son de los más comunes en un talud con múltiples familias de discontinuidades expuestas. Para que se produzca una falla por cuña se debe cumplir que: Los planos de discontinuidad afloren en la cara del talud, debe existir despegue y la dirección de buzamiento del talud debe ser mayor que el buzamiento de la línea de intersección, que a su vez debe ser mayor que el ángulo de fricción interna de la roca. La tolerancia en la dirección de desprendimiento de la cuña respecto a la dirección de inclinación es de 20°.

Cuadro 8

Resumen de las intersecciones de acuerdo a los planos principales.

	1	2	3	4	5	6
Dirección de los planos principales	43/137	43/137	43/137	56/179	56/179	66/53
(Buz / Dir Buz)	56/179	66/53	72/355	66/53	72/355	72/355
Intersección (Dir / Buz)	127/42	119/41	076/24	122/38	266/04	039/65

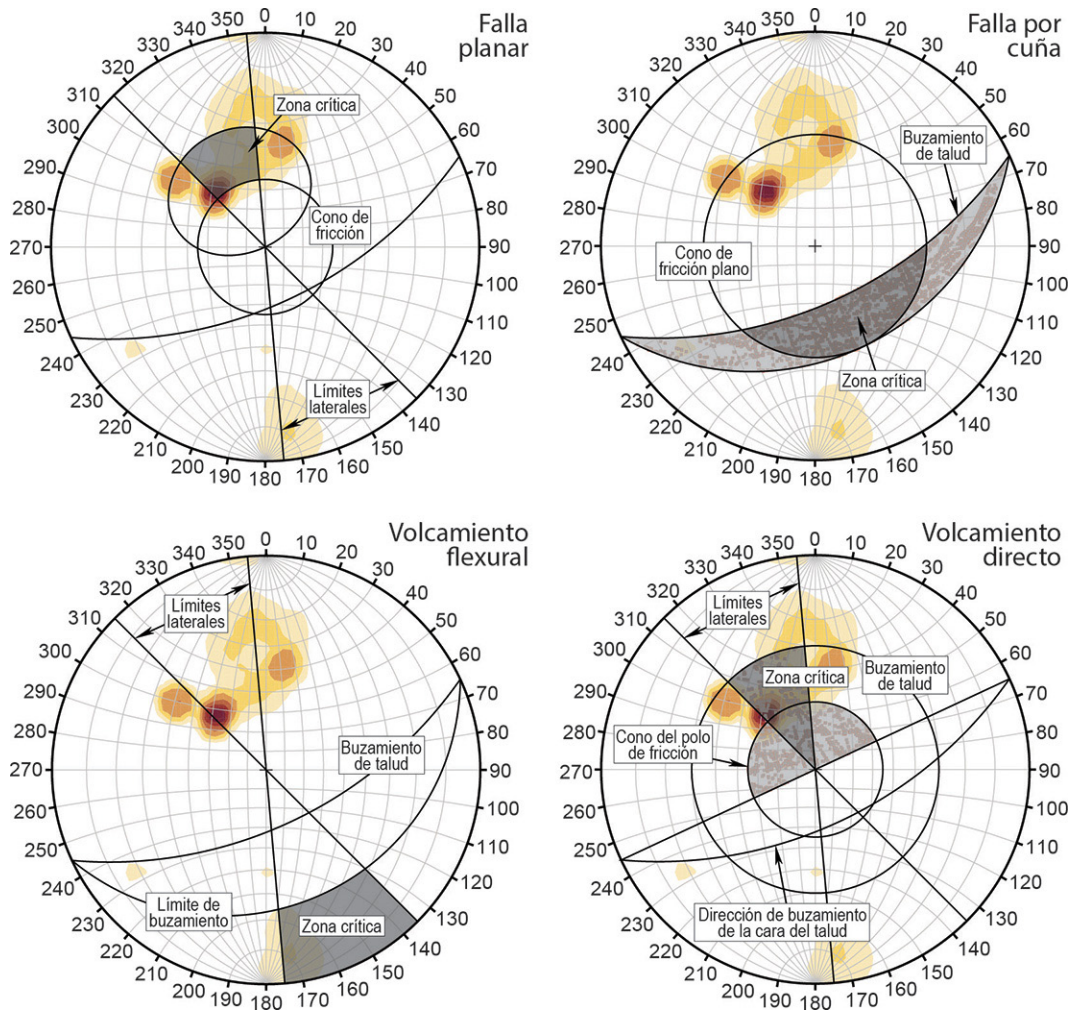


Fig. 12: Análisis cinemático por falla planar, falla por cuña y volcamiento flexural y directo en un talud con dirección de buzamiento de 155° y 60° de inclinación.

Los resultados indican que la falla por cuña es la que presenta mayores probabilidades de ocurrencia, con alta y moderada probabilidad al cortar el talud con dirección de buzamiento entre 065° y 215°, y con baja probabilidad entre 215° y 255° (Fig. 13), abarcando casi por completo las orientaciones viables de diseño para los taludes de la cantera de acuerdo a la orientación de la misma con la carretera.

Cuadro 9

Resumen de los parámetros de resistencia para el análisis de estabilidad.

Material	Peso unitario [kN/m ³]	Cohesión [kPa]	Ángulo de fricción interna [grados]
Suelos arrastrados y acumulados	17,2	0,0	30,1
Roca meteorizada	24,0	340	36,4
Roca sana	25,0	375	38,2

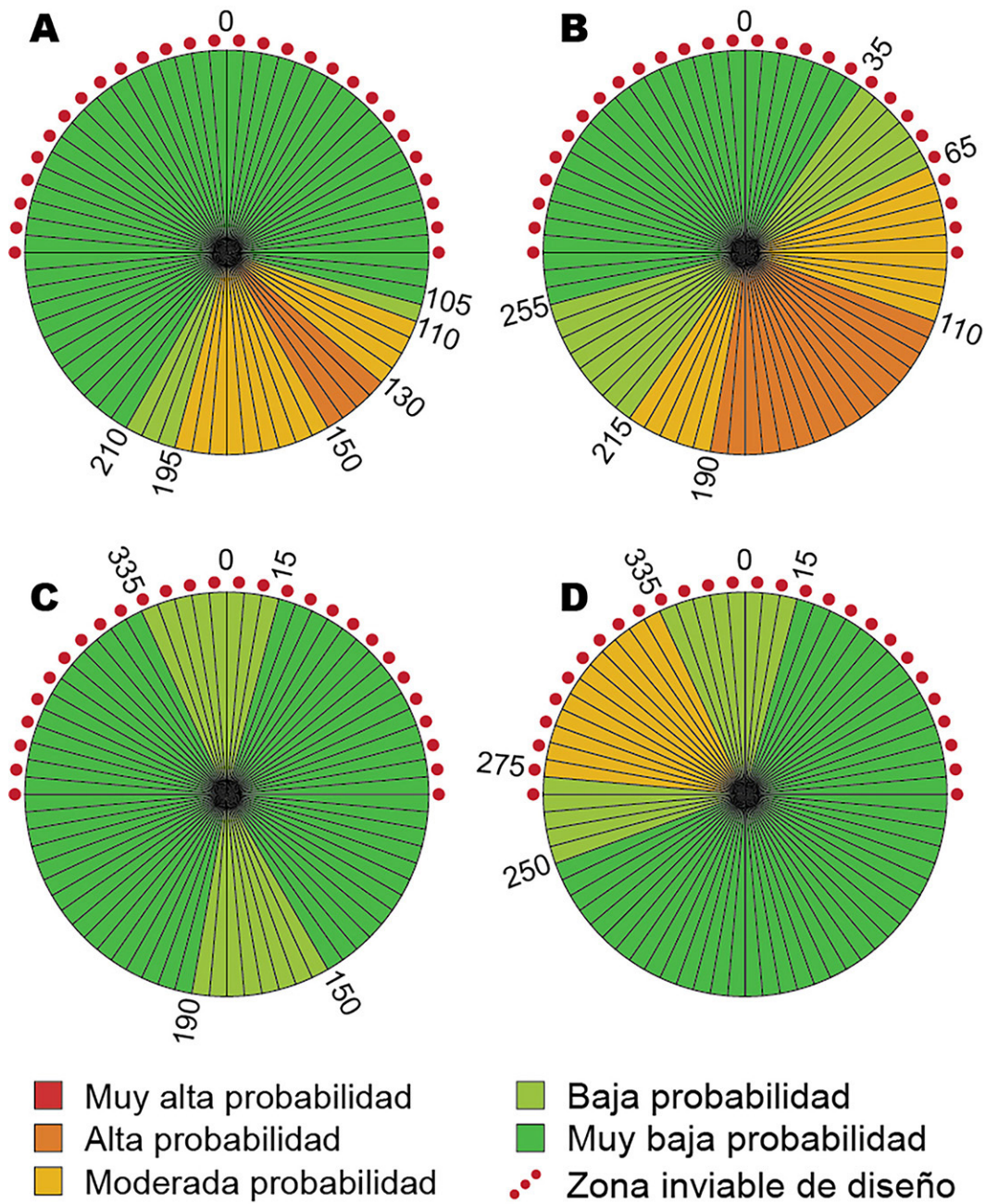


Fig. 13: Probabilidad de ocurrencia de falla en un talud con dirección de buzamiento de 155° y 60° de inclinación para (A) falla planar, (B) falla por cuña, (C) volcamiento flexural y (D) volcamiento directo.

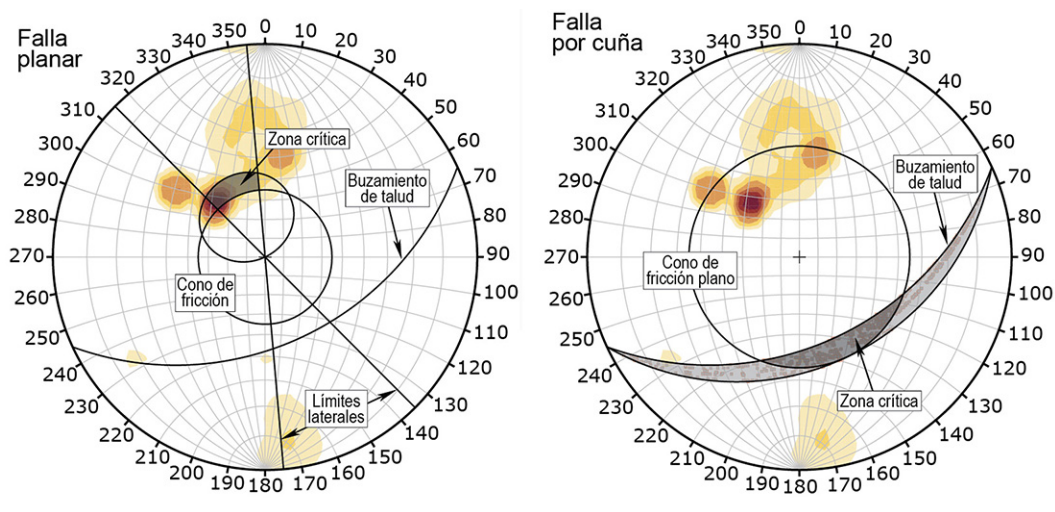


Fig. 14: Análisis cinemático por falla planar, falla por cuña en un talud con dirección de buzamiento de 155° y 45° de inclinación.

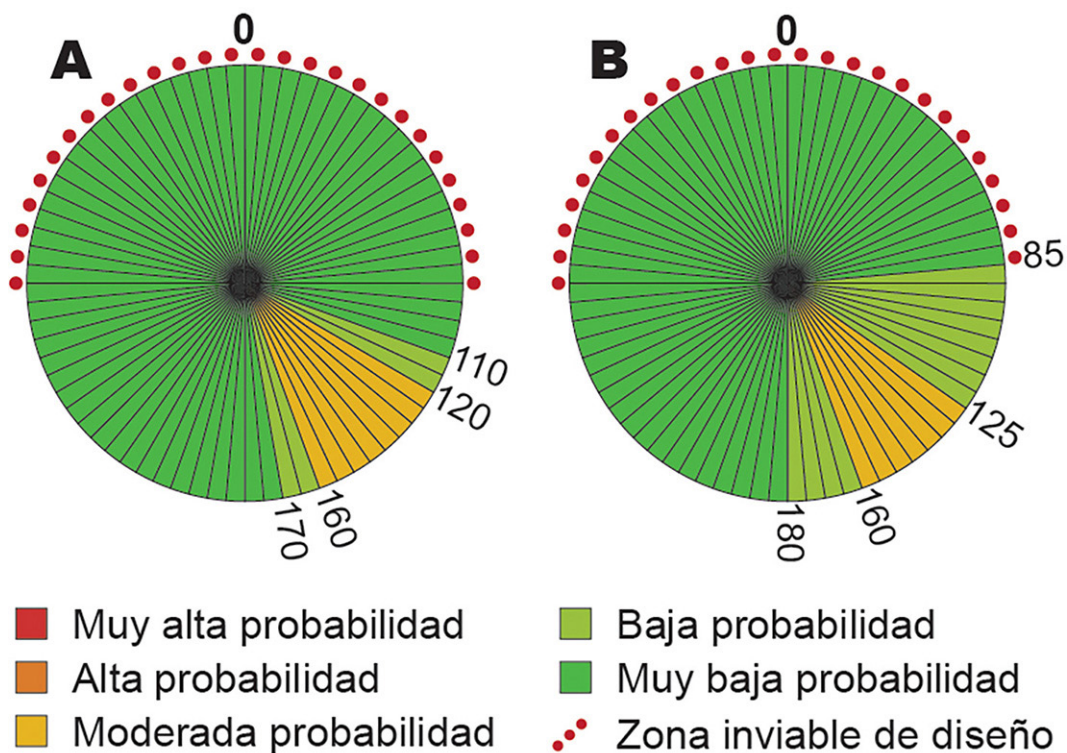


Fig. 15: Probabilidad de ocurrencia de falla en un talud con dirección de buzamiento de 155° y 45° de inclinación para (A) falla planar y (B) falla por cuña.

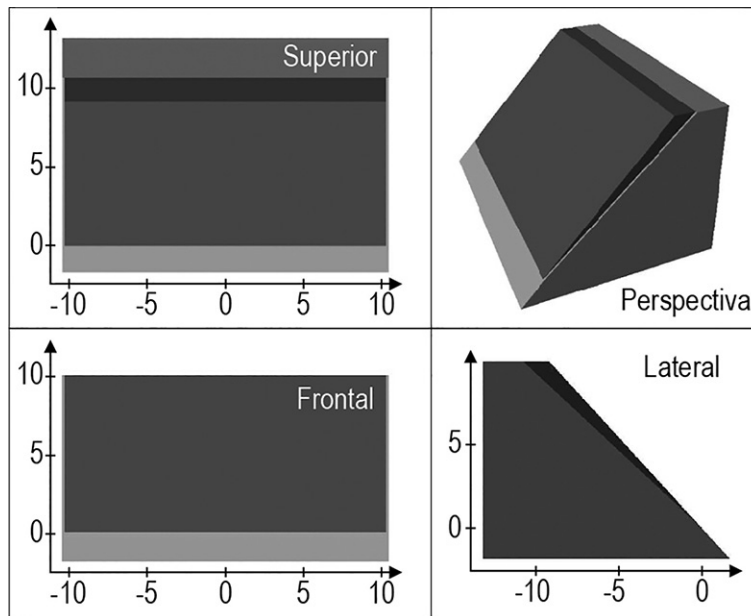


Fig. 16: Modelo para el análisis de estabilidad de una falla por cuña en un talud de 45° con una discontinuidad con buzamiento y dirección de buzamiento de 43/137.

Superficies de desprendimiento por volcamiento

La inestabilidad por volcamiento puede presentarse de forma directa o de forma flexural (Fig. 11). Para que este ocurra, deben cumplirse las siguientes condiciones: La inclinación del talud e inclinación de los estratos debe ser mayor a 65° , la estratificación debe tener un buzamiento contrario a la inclinación del talud, pero con rumbos paralelos o subparalelos en una tolerancia de 30° y para que se produzca el fallamiento, la suma del ángulo complementario al buzamiento de las discontinuidades y el ángulo de rozamiento, debe ser inferior al ángulo de buzamiento (inclinación) del corte del talud.

Los resultados para falla por volcamiento flexural indican que en términos generales no existen grandes problemas para la zona viable de diseño. La mayor probabilidad de ocurrencia es baja (6,25% - 12,5%) para las direcciones de la cara del talud que van de 150° a 190° (Fig. 13).

Para desprendimientos por volcamiento directo la mayor problemática se presenta entre las direcciones 260° y los 005° , donde la probabilidad de ocurrencia es moderada (12,5% - 25%); con la ventaja que dicha zona de se encuentra casi por completo en el sector inviable. Entre 240° y 260° la probabilidad de ocurrencia es baja, y entre 260° y 270° moderada. Las restantes direcciones viables de diseño presentan muy baja probabilidad (0% - 6,25%) de ocurrencia de falla (Fig. 13).

Modificación de la geometría de los taludes para alcanzar la estabilidad

Del primer análisis resulta evidente las limitaciones en las direcciones de diseño de los taludes de la cantera al modelar con una inclinación de la cara del talud de 60° . Los principales problemas se identificaron en las fallas planar y por cuña (Fig. 13). Para la falla planar, aceptando probabilidades de ocurrencia $\leq 12,5\%$, se deben descartar las direcciones de talud cuya cara tenga una dirección de entre los 110° y los 195° . En la falla por el mecanismo de formación de cuñas, el escenario es aún más complejo, restringiendo por completo las direcciones viables de la cara del talud desde los 90° hasta los 215° .

La combinación de estos dos escenarios restringe extremadamente las opciones de corte para las caras del talud. Evidencia de ello es la imposibilidad de diseñar taludes cuya cara tenga una dirección de inclinación entre los 90° y 120° , debido a la alta probabilidad de ocurrencia de rupturas.

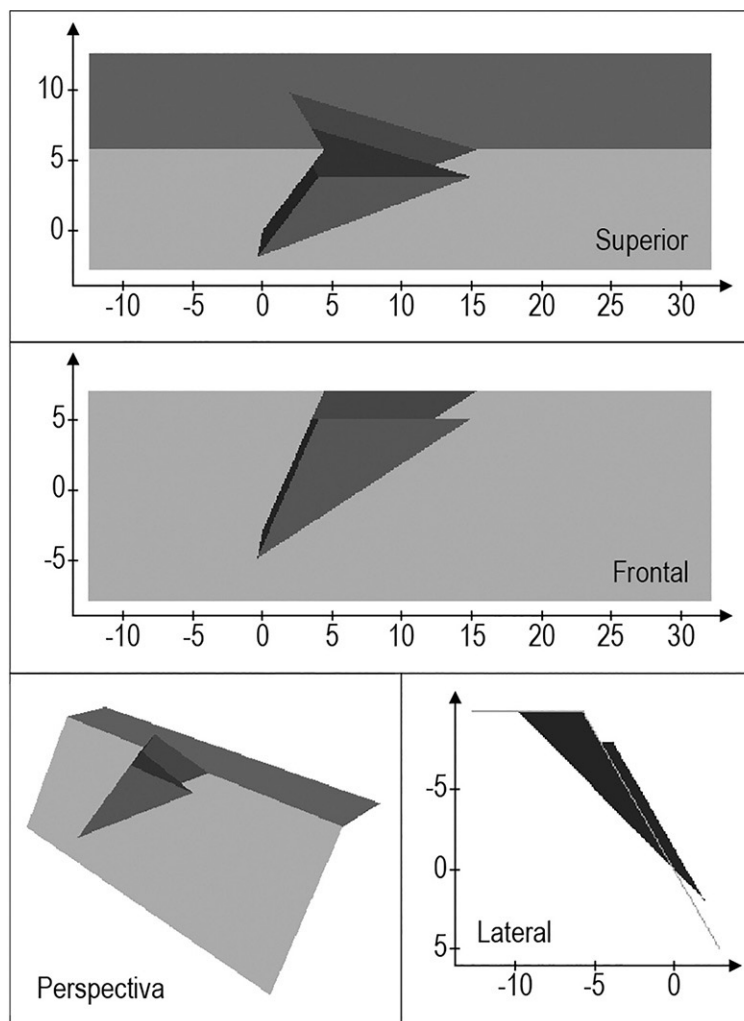


Fig. 17: Modelo para el análisis de estabilidad de una falla por cuña en un talud de 45° con una discontinuidad con buzamiento y dirección de buzamiento de 43/137.

Análisis cinemático con taludes de 45° de inclinación

Con el objetivo de solventar las limitaciones en la geometría para el diseño de los taludes de la cantera de acuerdo a los resultados del análisis cinemático con taludes de 60° , se modeló la probabilidad de ocurrencia de falla planar y falla por cuña para taludes cuya inclinación máxima sea de 45° .

En la figura 14 se presenta a modo de ejemplo el resultado del análisis cinemático para falla planar y falla por cuña en un talud cuya inclinación disminuyó a 45° , y cuya cara del talud tiene una dirección de 155° .

En los nuevos modelos se puede observar como la disminución del ángulo de inclinación de corte del talud provoca una disminución de la zona crítica alrededor de la mayor concentración de polos. Nuevamente se realizó el análisis para todos los 365° posibles de dirección de inclinación de la cara del talud, en intervalos de 5° .

Para fallas planares bajo estas condiciones todas las direcciones de probabilidad de ocurrencia alta desaparecen y las direcciones con probabilidad moderada se restringen al rango entre 120° y 160° (Fig. 15).

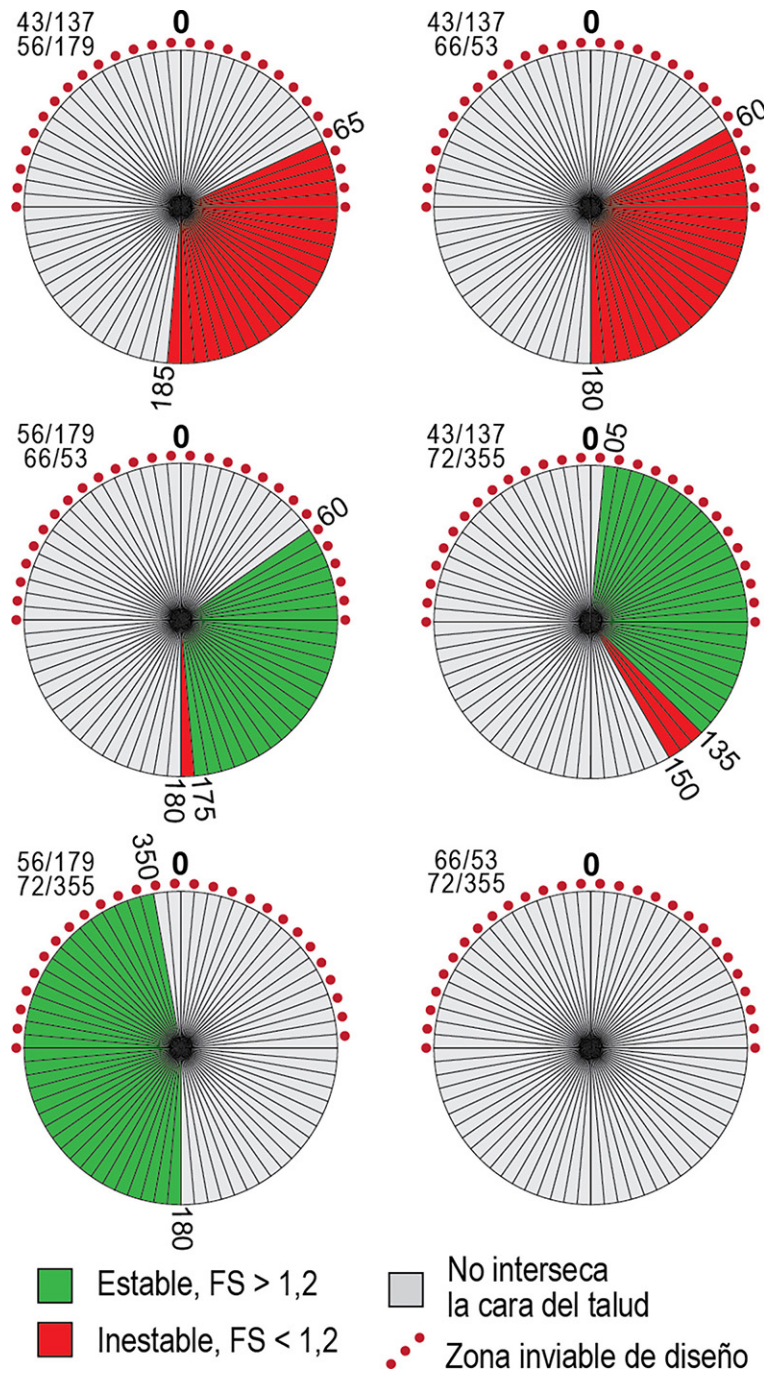


Fig. 18: Resultados del análisis de estabilidad en fallas por cuña para las seis intersecciones de planos en un talud de 60° de inclinación en la cantera.

En el caso de las cuñas se ha eliminado por completo la alta probabilidad de ocurrencia de falla y se disminuyó la probabilidad del sector entre 85° y 125°, por debajo de 12,5% (Fig. 15); lo que permite generar un mejor diseño de la explotación de la cantera, con direcciones de corte que mantienen la baja probabilidad de ocurrencia de cuñas inestables.

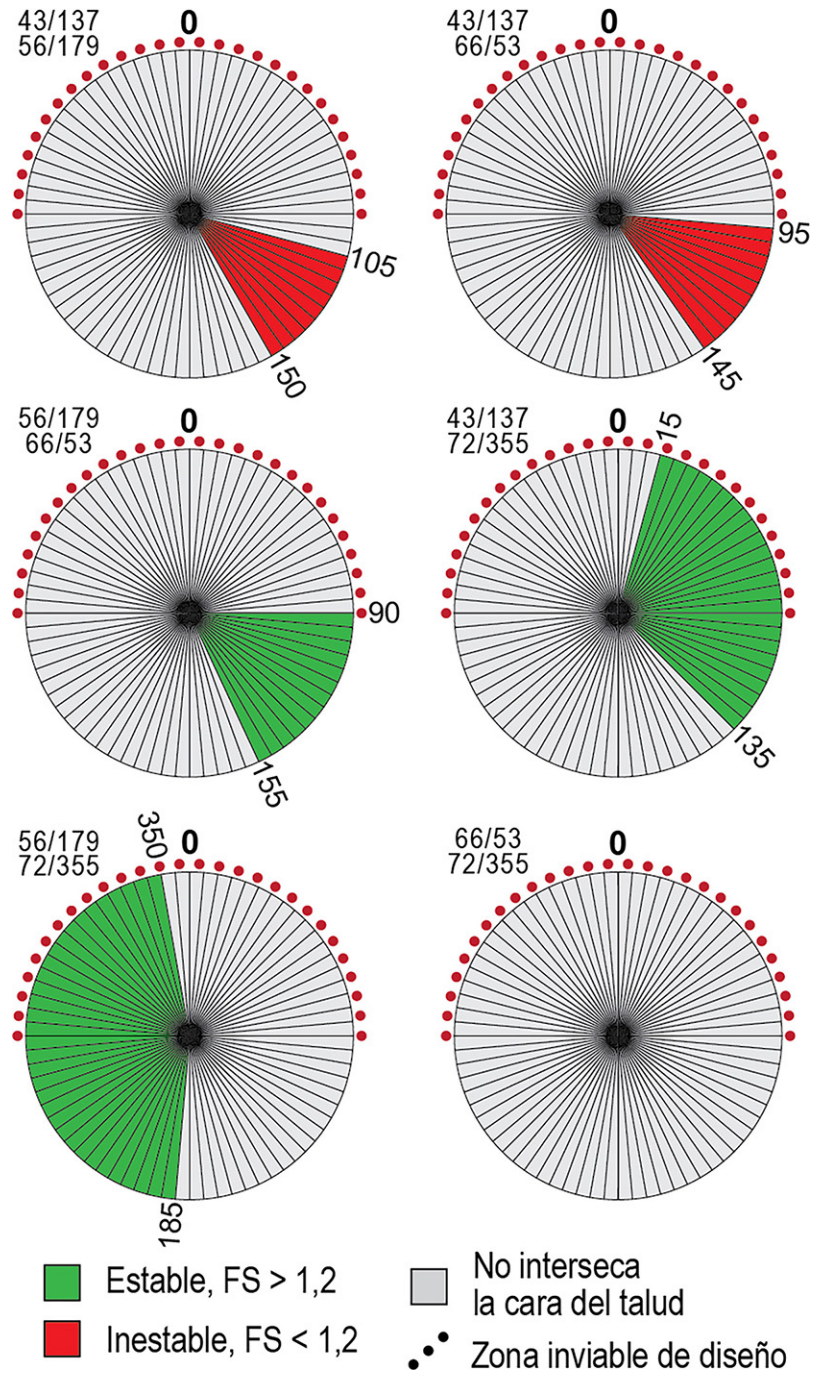


Fig. 19: Resultados del análisis de estabilidad en fallas por cuña para las seis intersecciones de planos en un talud de 45° de inclinación en la cantera.

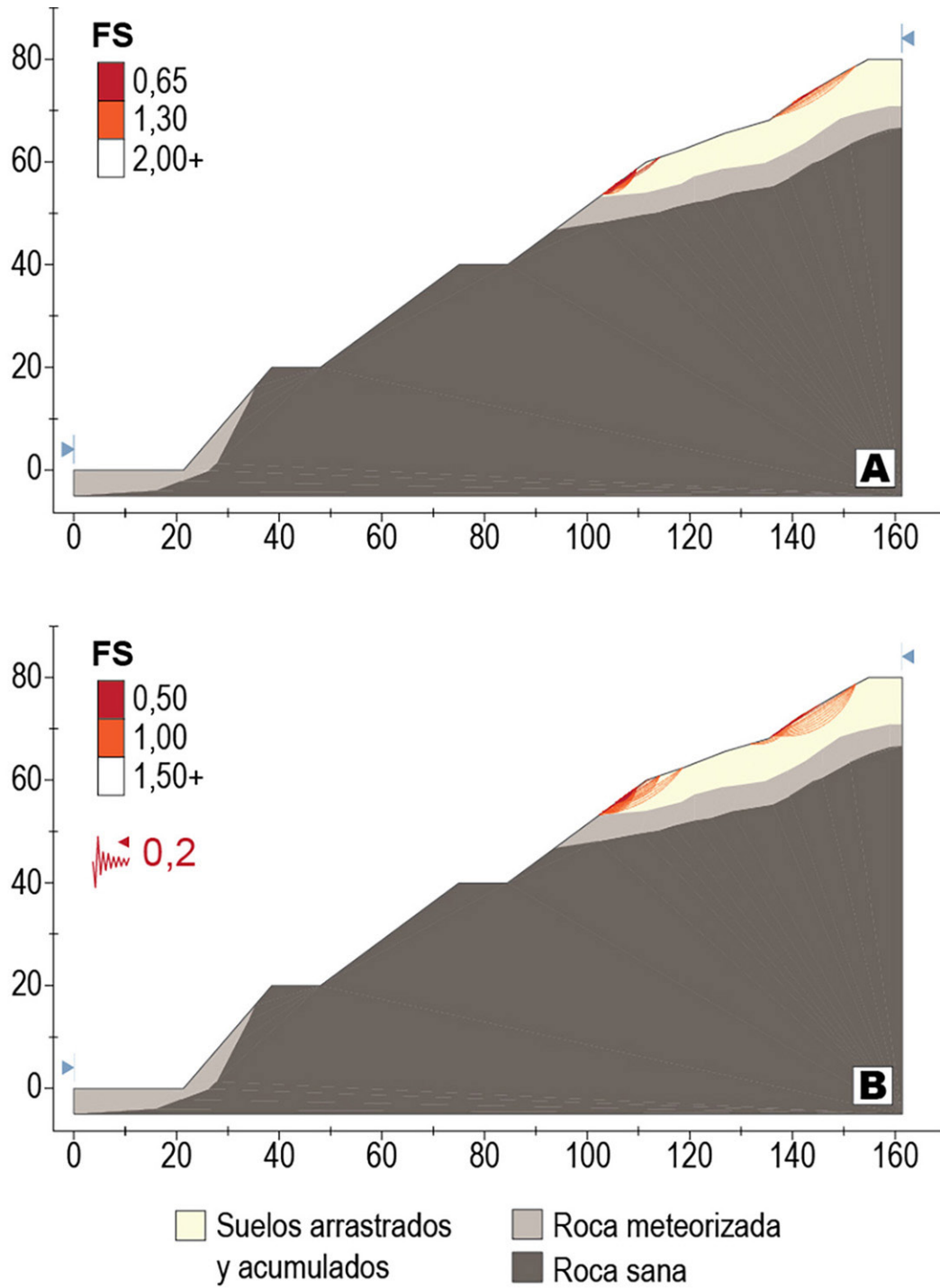


Fig. 20: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas (A) y pseudoestáticas (B) para el modelo geotécnico del talud de corte recomendado en cantera.

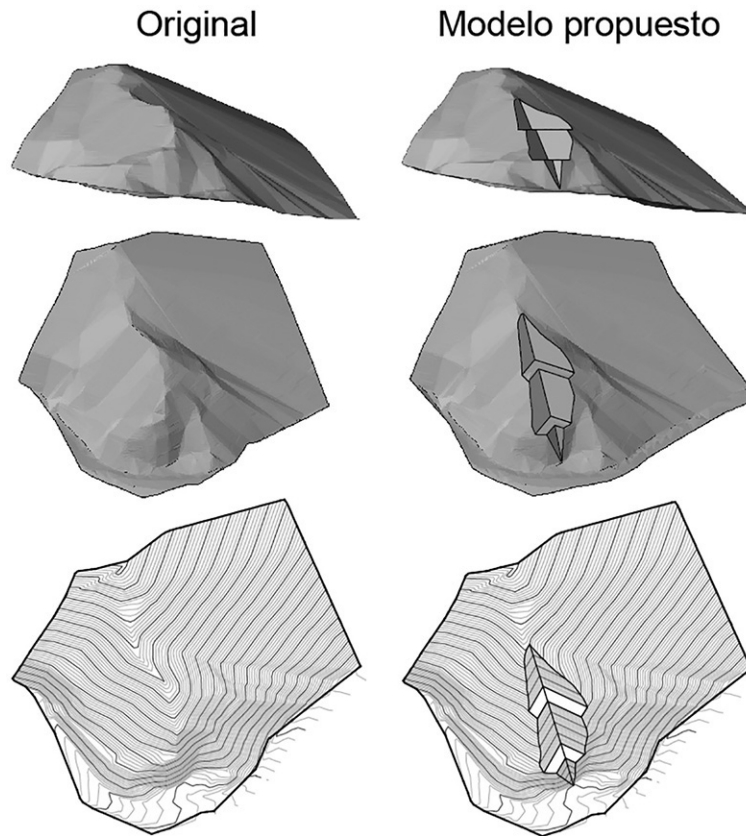


Fig. 21: Modelo conceptual del modelo de explotación propuesto.

Análisis de estabilidad

Debido a la alta probabilidad de falla del talud por los mecanismos de falla planar y cuña identificados en el análisis de admisibilidad cinemática, se realizó un análisis determinístico que permitiera identificar el factor de seguridad en caso de que dichas rupturas afloren en la cara del talud. De acuerdo al Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (2015), para una obra con bajo riesgo de daños económicos y ambientales y bajo riesgo de pérdida de vidas como es esta cantera, se debe cumplir con un factor de seguridad $FS \geq 1,2$ en condiciones estáticas y $FS \geq 1,0$ en condiciones pseudoestáticas. Para el análisis de la estabilidad de las fallas planares y de las cuñas se utilizaron los planos principales que se identificaron con el levantamiento de campo.

Todas las geometrías modeladas contemplan anchos de berma de 5 m de acuerdo al interés del desarrollador de la cantera.

Análisis de la estabilidad de la falla planar

Una de las condiciones principales para que se genera una falla planar es que la inclinación de la discontinuidad sea menor que la inclinación de la cara del talud. Para un talud de 60° solo cumplen la condición el plano principal 1 y el plano principal 2. Para un talud de 45° de inclinación, solo el plano principal 1 tiene una inclinación menor que la de la cara del talud.

El análisis se realizó modelando geometrías del talud cuya inclinación varía entre 44° y 65° , con alturas de 10 m, para determinar la inclinación del talud más óptima y que cumpla con el factor de seguridad $FS \geq 1,2$.

Para optimizar la inclinación se realizó el análisis de estabilidad del talud para una falla planar generada por la discontinuidad con dirección 43/137 correspondiente con el plano principal 1 (Fig. 16). Los resultados indican que para cumplir con el factor de seguridad, la inclinación máxima del talud que se debe cumplir es de $47,5^\circ$. Dicha inclinación resulta en un FS de 1,22 y generaría un plano de $7,8 \text{ m}^3/\text{m}$.

Análisis de la estabilidad de la falla por cuña

En el caso de la falla por cuña, de acuerdo con lo expresado anteriormente, para que se genere el desprendimiento, uno de los requisitos principales que se debe cumplir es que la intersección de dos planos aflore en la cara del talud.

Para este análisis de estabilidad se utilizaron los cuatro planos principales identificados con el levantamiento de discontinuidades en el campo (Fig. 9 y 10). La combinación de los cuatro planos genera en total seis intersecciones que se resumen en el Cuadro 8.

A partir de las seis intersecciones se realizó el análisis de estabilidad de las fallas por cuña posibles para los 360° de dirección de buzamiento de la cara del talud, en intervalos de 5° . Un ejemplo del análisis se presenta la figura 17 para la cuña que se produciría en un talud de 60° con dirección de buzamiento de 120° , y la intersección de los planos 43/137 y 56/179. El resultado del análisis indica que la cuña es inestable, con un factor de seguridad FS de 0,87, generando el movimiento de 181,8 toneladas (73 m^3) en dirección 131° .

Para el talud de 60° de inclinación y 10 m de altura (Fig. 18), cuatro de las seis intersecciones presentan inestabilidades ($\text{FS} < 1,2$); de las cuales las intersecciones de los planos 43/137 con 56/179 (127/42) y 43/137 con 66/053 (119/41) son las más significativas por el gran rango de direcciones de la cara del talud para la que se identificaron inestabilidades.

Son inestables por falla por cuña en un talud de 60° de inclinación, los cortes del talud cuya cara tenga una dirección de buzamiento entre los 60° y los 185° . Son estables en el mismo escenario los taludes con dirección de buzamiento entre 185° y 350° . Las direcciones restantes no presentan resultados debido a que las intersecciones de plano no afloran en la cara del talud.

Los resultados del análisis para un talud de 45° de inclinación y 10 m de altura (Fig. 19) indican que dos de las seis intersecciones no cumplen con los requisitos de estabilidad ($\text{FS} > 1,2$). Son por lo tanto inestables la intersección de los planos 43/137 con 56/179 (127/42) y 43/137 con 66/053 (119/41); mismos con problemas en los taludes de 60° .

Dichas intersecciones inestables son congruentes con las del talud de 60° . En los resultados (Fig. 18 y 19) se observa como el rango de direcciones inestables disminuye, pero no desaparece. Para un talud de 45° de inclinación, los cortes al talud con dirección de buzamiento de 95° a 150° son inestables. Son estables las direcciones entre 15° - 95° y 185° - 350° . Las direcciones restantes no presentan intersección con la cara del talud en ninguna de las seis intersecciones.

Análisis de la estabilidad global de los taludes de la cantera

Finalmente se realizó el análisis de la estabilidad general del talud, enfocándose en la geometría de los taludes de 45° de inclinación y hasta 20 m de altura entre bancos para las direcciones de corte recomendadas y sin intervenir los suelos de la parte superior del tajo. Las propiedades de resistencia de los materiales del modelo se resumen en el Cuadro 9.

En la figuras 20 se presentan los resultados del análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas para el diseño de corte recomendado en los taludes de la cantera. En el escenario pseudoestático se modelo una aceleración sísmica horizontal de 0,2 g de acuerdo al Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica (2015).

Los resultados cumplen con el factor de seguridad requerido de 1,2 para condiciones estáticas y 1,0 en condiciones pseudoestáticas para los taludes en el macizo rocoso. Para la parte superior se identificaron inestabilidades superficiales que son congruentes con las observaciones de campo.

Diseño recomendado de los taludes

Analizando los resultados del análisis cinemático de las discontinuidades, el análisis de estabilidad de las fallas planares y por cuña, y el análisis global de estabilidad del talud; así como los resultados de los sondeos de penetración dinámica y ensayos de laboratorio en suelo y rocas se ha podido llegar a las siguientes recomendaciones para la geometría de los taludes.

Dirección de corte de los taludes

Las direcciones que permiten cortar el talud con baja probabilidad de ocurrencia de falla, varían entre 160° hasta 105° para la dirección de buzamiento de la cara del talud, siempre y cuando se trabaje con 45° de inclinación de taludes. Al aumentar la inclinación de los taludes, aumenta también el rango de direcciones con moderada y alta probabilidad de ocurrencia de fallas, de acuerdo a los resultados de los análisis realizados. No se recomienda cortar el talud en las direcciones entre los 105° a los 160° (en general SE) debido al aumento en la probabilidad de ocurrencia de planos de ruptura y la disminución del factor de seguridad de los desprendimientos. Puntualmente, se recomienda para alcanzar la estabilidad realizar cortes con direcciones de buzamiento (inclinación) de 210° y 105° .

Inclinación y altura de los taludes

Para el diseño del sistema de bancos se recomienda una altura de talud de 10 m y un ancho de los bancos de 5 m. La inclinación del talud recomendada es de 45° , para minimizar los problemas de estabilidad en las fallas por cuña y eliminar los problemas con fallas planares; además de que permite un rango de direcciones de diseño más amplio para las caras del talud.

La altura de los taludes puede aumentar hasta 20 m en la roca sin afectar la aparición de nuevas superficies de ruptura y sin disminuir el factor de seguridad de las superficies planares, las cuñas de ruptura o la ruptura circular general del talud.

No se recomienda aumentar la inclinación del talud por encima de los 45° debido al aumento en la aparición de planos de inestabilidad. Un aumento de la inclinación en más de 45° invalida las direcciones de corte de 210° y 105° recomendadas para alcanzar la estabilidad.

Volumen de corte

Siguiendo las recomendaciones descritas se realizó el cálculo del volumen para taludes de corte con dirección de buzamiento (inclinación) de 210° y 105° , con una inclinación de 45° y alturas de 20 m con bancos de 5 m de ancho. La intersección de superficies permite estimar un volumen de roca extraíble de aproximadamente $10,000 \text{ m}^3$ (Fig. 21). Esta geometría busca minimizar la desestabilización de los suelos de la parte alta de la cantera y minimizar el riesgo por desprendimientos hacia la vía de comunicación.

Conclusiones

El sitio estudiado está compuesto en la parte superior por suelos arrastrados y acumulados, y un macizo rocoso altamente fracturado que corresponde con una secuencia sedimentaria afectada por vulcanismo de la Formación Pacacua. Los suelos son limos con arena de baja plasticidad, que en promedio presentan un peso unitario de 17 kN/m^3 , y una resistencia al corte con una cohesión efectiva de 0 kPa y un ángulo de fricción efectivo de 38° . Se identificaron en el campo mediante ensayos de penetración dinámica, espesores de suelo de hasta 6 m de profundidad, y un halo de meteorización sobre el macizo rocoso de entre 4–5 m.

La clasificación geomecánica de acuerdo al criterio de Hoek-Brown indica que el macizo tiene un GSI de 45 en su frente meteorizado, y una resistencia a la compresión uniaxial máxima de 51,5 MPa. La resistencia está caracterizada por una cohesión de 345 kPa y un ángulo de fricción interna de aproximadamente 36°. El macizo rocoso presenta al menos cuatro familias de discontinuidades principales con direcciones (buzamiento/dirección de buzamiento) de 43/137, 56/179, 66/53 y 72/355. El cono de fricción con el que se caracterizaron las discontinuidades de acuerdo a ensayos de *tilt-test* es de 34°.

El análisis cinemático para rupturas planares, en cuña y volcamiento flexural y directo, con taludes de 60° restringe extremadamente el diseño de los taludes de corte; permitiendo únicamente un rango de diseño que no es viable para la obra. Una modificación de la geometría a taludes de 45° de inclinación disminuye significativamente la probabilidad de aparición de superficies de ruptura; lo que permite trabajar con un rango más amplio de direcciones de corte para el talud, y mantener la probabilidad de ocurrencia de planos de ruptura por debajo de 12,5% (baja probabilidad).

El análisis de estabilidad para las superficies de falla planar indica que la estabilidad se alcanza al disminuir la inclinación de la cara del talud hasta 47,5°, de forma que se obtiene un factor de seguridad de 1,22. El análisis de estabilidad de las fallas por cuña indica que para una inclinación de 45° en la cara del talud, las direcciones de corte que cumplen con el factor de seguridad de 1,2 son de 150° a 105° (dirección de inclinación del talud).

El análisis de estabilidad para rupturas circulares en la totalidad del talud, en condiciones estáticas y pseudoestáticas, indica que los taludes de 45° de inclinación en el macizo rocoso son estables con alturas de hasta 20 m y bermas de 5 m de ancho. Los suelos en la parte superior presentan inestabilidades superficiales, congruentes con las observadas en el campo.

De acuerdo a los resultados que se presentan, es posible recomendar una dirección de corte de 210° y 105° para taludes de 45° de inclinación y hasta 20 m de altura con bancos de 5 m de ancho. Dicha geometría permite una explotación de aproximadamente 10,000 m³, sin desestabilizar los suelos en la parte alta de la cantera.

No se recomienda utilizar ángulos de inclinación mayores a 45° debido al incremento en la probabilidad de aparición de planos de ruptura y a la disminución en el factor de seguridad para dichos planos.

Referencias bibliográficas

- Asociación Costarricense de Geotecnia. (2015). *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.
- Denyer, P., y Arias, O. (1990). Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 12(1), 1-59.
- González de Vallejo, L. L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Hoek, E., y Brown, E. T. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106(GT9), 1013-1035.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., y Corkum, B. (2002). Hoek – Brown Failure Criterion, 2002 Edition. *Proceedings NARMS-TAC Conference Toronto*, 200(1), 267-273.
- Hoek, E., y Marinos. (2000). GIS: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. *Proceedings GeoEng2000 Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, 1422-1442.
- Labuz, J. F., y Zang, A. (2012). Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 975-979.