

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE  
EXPLOTACIÓN EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC –  
CUMBE CHONTABAMBA – BAMBAMARCA - HUALGAYOC**

**Para Optar el Título Profesional de:  
INGENIERO DE MINAS**

**Autor:**

**Bachiller: Castrejón Mendoza Kenneth**

**Asesor**

**MCs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino**

**Cajamarca – Perú**



**2026**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** KENNETH CASTREJÓN MENDOZA  
**DNI:** 71928291  
**Escuela Profesional:** INGENIERÍA DE MINAS
- Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino  
**Facultad:** Ingeniería
- Grado académico o título profesional**  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
- Tipo de Investigación:**  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**  
CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC – CUMBE CHONTABAMBA – BAMBAMARCA – HUALGAYOC  
**Fecha de evaluación:** 26/02/2026
- Software antiplagio:**       TURNITIN       URKUND (ORIGINAL) (\*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 5%
- Código Documento:** Oide:3117: 561311579
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 27/02/2026

 <hr/> <p><b>FIRMA DEL ASESOR</b> <i>Roberto Severino Gonzales Yana</i> <b>DNI: 29441681</b></p>	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 27.02/2026 17:24:57-0500</p> <hr/> <p><b>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</b></p>
--	--

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



# Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



## SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

### ACTA N° 0133-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que, a los **doce días del mes de marzo de 2026**, siendo las siete horas (07:00 a.m.) en Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal : M.Cs. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque.  
Secretaria : M.Cs. Ing. Zoraida Elizabeth Ramirez de la Cruz.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC - CUMBE CHONTABAMBA - BAMBAMARCA - HUALGAYOC**, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas **KENNETH CASTREJÓN MENDOZA**, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : ..... <sup>5</sup> ..... PTS.  
EVALUACIÓN PÚBLICA : ..... <sup>9</sup> ..... PTS.  
EVALUACIÓN FINAL : ..... <sup>14</sup> ..... PTS. *Latoru* (En letras)

En consecuencia, se lo declara *Aprobado* con el calificativo de *Latoru* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *8:00 am* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Presidente

M.Cs. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque.  
Vocal

M.Cs. Ing. Zoraida Elizabeth Ramirez de la Cruz.  
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Asesor

## **AGRADECIMIENTO**

Primero, al padre todo poderoso Dios de los cielos por siempre estar a mi lado y acompañarme en cada momento de superación y logro; y darme el privilegio de ingresar a la Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de Ingeniería – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas. Por consiguiente, también dedico estas palabras a los profesores por ser parte de la enseñanza profesional en cada momento de formación: Ética y profesional.

Asimismo, mis más sinceras palabras al asesor M. Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, ser parte de la realización de la tesis en todo momento para obtener mi título profesional.

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a mi familia, pilar fundamental en mi vida, por su amor, paciencia y motivación permanente. A mis padres, por enseñarme el valor del sacrificio y la importancia de nunca rendirse. Y a todas las personas que me acompañaron en este camino académico, gracias por creer en mí y por ser parte de esta etapa tan importante.

Esta tesis es el reflejo de su apoyo y de mi determinación.

## ÍNDICE

	PÁG.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	vi
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE PLANOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
2.1.1 INTERNACIONALES.....	4
2.1.2 NACIONALES .....	7
2.1.3 LOCALES.....	10
2.2 BASES TEÓRICAS .....	13
2.2.1 CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS .....	13
2.2.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN.....	18
2.2.3 PARÁMETROS DE DISEÑO DE TALUDES.....	19
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	21
CAPÍTULO III.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
3.1 UBICACIÓN.....	23
3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	23
3.1.2 ACCESIBILIDAD .....	24
3.1.3 CLIMA Y VEGETACIÓN.....	25
3.2 PROCEDIMIENTOS .....	27
3.2.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.2.1.1 TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	30
3.2.1.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	31
3.2.1.3 MUESTRA .....	31

3.2.1.4	UNIDAD DE ANÁLISIS.....	31
3.2.2	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	32
3.2.3	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	33
3.2.4	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	34
3.2.5	ETAPAS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	34
3.2.6	EQUIPOS. MATERIALES Y SOPORTE TECNICO .....	36
3.3	GEOLOGÍA.....	37
3.3.1	GEOMORFOLOGÍA .....	37
3.3.2	GEOLOGÍA LOCAL .....	39
3.3.3	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	41
3.3.4	CÁLCULO DE RESERVAS Y OPERACIONAL.....	43
3.3.5	PERFORACIÓN Y VOLADURA .....	45
3.3.6	CAPACIDAD DE MAQUINARIA.....	46
3.4	CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO .....	47
3.5	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL ROCOSO.....	49
3.5.1	ESTACION GEOMECÁNICA 01.....	54
3.5.2	ESTACIÓN GEOMECÁNICA 02.....	59
3.5.3	ESTACIÓN GEOMECÁNICA 03.....	63
3.5.4	ESTACIÓN GEOMECÁNICA 04.....	67
3.6	REDISEÑO GOEMÉTRICO .....	71
3.7	OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN BASADO EN CRITERIOS GEOMECÁNICOS.....	72
3.7.1	FUNDAMENTACIÓN GEOMECÁNICA DEL DISEÑO OPTIMIZADO .....	72
3.7.2	OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL BANCO .....	73
3.7.3	CONFIGURACIÓN GLOBAL DEL TAJO .....	74
3.7.4	EVALUACIÓN TÉCNICO – OPERATIVA DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN.....	75
3.7.4.1	OPTIMIZACIÓN EN PERFORACIÓN Y VOLADURA.....	75
3.7.4.2	OPTIMIZACIÓN DE CARGUÍO .....	75
3.7.4.3	OPTIMIZACIÓN DE ACARREO .....	76
3.7.5	OPTIMIZACIÓN PRODUCTIVA FUNDAMENTEADA TÉCNICAMENTE .....	76
3.7.6	IMPACTO ECONÓMICO ESTIMADO DE LA OPTIMIZACIÓN .....	77
	CAPITULO IV .....	78
	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78

<b>4.1</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1.1</b>	<b>RESULTADOS DEL CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO .....</b>	<b>78</b>
<b>4.1.2</b>	<b>RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1.3</b>	<b>RESULTADOS DEL REDISEÑO GEOMÉTRICO.....</b>	<b>80</b>
<b>4.1.4</b>	<b>RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN BASADO EN CRITERIOS GEOMECÁNICOS .....</b>	<b>83</b>
<b>4.2</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>
<b>4.3</b>	<b>CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....</b>	<b>87</b>
	<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>89</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>92</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>98</b>
	<b>AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA .....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>100</b>
	<b>REGISTROS GEOMECÁNICOS .....</b>	<b>100</b>
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>105</b>
	<b>PLANOS TEMÁTICOS .....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO D .....</b>	<b>114</b>
	<b>REDISEÑO DE LA CANTERA DE EXPLOTACIÓN.....</b>	<b>114</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

WGS-84	:	Sistema Geodésico Mundial 1984.
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
GPS	:	Sistema de posicionamiento global.
UNC	:	Universidad Nacional de Cajamarca.
INGEMMET	:	Instituto geológico minero y metalúrgico del Perú.
Geocatmin	:	Sistema de información geológico y catastro minero.
SEGEMAR	:	Servicio Geológico Minero Argentino.
IGRN	:	Instituto geología y recursos minerales.
ASOBANCA	:	Asociación de bancos del Ecuador
OSINERGMIN	:	Organismo supervisor de la inversión en energía y minería.
SENAMHI	:	Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú.
MDGD	:	Dirección general de desarrollo minero
INACAP	:	Instituto Nacional de Capacitación Profesional.
ArcGis	:	Sistema de información geográfica.
AutoCAD	:	Diseño asistido por computadora.
AIME	:	Asociación de ingenieros de minas del Ecuador
SL	:	Sociedad limitada.
E.I.R.L.	:	Empresa individual de responsabilidad limitada.
S.R.L.	:	Sociedad de responsabilidad limitada.
S.A.A.	:	Sociedad anónima abierta.
S.A.C.	:	Sociedad anónima cerrada.
UNACEM	:	Unión andina de cementos.
bh – MBT	:	Bosque húmedo – Montano Bajo Tropical
S.S.H.H.	:	Servicios higiénicos.
ISSN	:	Número internacional normalizado de publicaciones seriadas.
USA	:	Estados Unidos.
POCLAIN	:	Clase de excavadora.
SASPlanet	:	SAS.Planeta.
et al.,	:	Y otros.
M.Cs.	:	Maestro en ciencias.
Ing.	:	Ingeniero.
M-C	:	Morh-Coulomb.
H-B	:	Hoek-Brown.
$\sigma_c$	:	Resistencia a la compresión uniaxial.
$\sigma_{3m\acute{a}x}$	:	Tensión de confinamiento.
$\sigma'_t$	:	Resistencia a la tracción
$\sigma'_{ct}$	:	Resistencia global.
$\sigma_1$	:	Esfuerzo principal mayor.
$\sigma_2$	:	Esfuerzo principal intermedio.
$\sigma_3$	:	Esfuerzo principal menor.

T	:	Esfuerzo de corte.
$\sigma_n$	:	Esfuerzo normal.
$\sigma'_{cm}$	:	Resistencia del macizo rocoso.
$\sigma_0$	:	Esfuerzo vertical.
$m_i$	:	Constante de Hoek & Brown.
$m_b$	:	Constante de Hoek & Brown.
$s, a$	:	Constantes de Hoek & Brown.
c	:	Cohesión.
$\varphi$	:	Ángulo de fricción.
$E_i$	:	Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
$E_m$	:	Módulo de deformación.
MR	:	Relación del módulo.
D	:	Factor de disturbancia.
@	:	Cada
RQD	:	Índice de calidad de roca.
RMR	:	Valoración de la masa rocosa.
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica.
L	:	Longitud o profundidad de taladro.
SP	:	Sobre perforación.
T	:	Profundidad de taco.
H	:	Altura de banco.
B	:	Burden.
E	:	Espaciamiento.
V <sub>rt</sub>	:	Volumen removido por talado
T <sub>nr</sub>	:	Toneladas removidas.
KW	:	Kilovatio
V	:	Voltaje.
$\Psi_T$	:	Buzamiento del talud.
$\Psi_{TFINAL}$	:	Buzamiento del talud final.
Nb	:	Numero de bancos.
Q	:	Quebradura.
A	:	Ancho de rampa.
H	:	Altura de talud
$\alpha_b$	:	Ángulo de talud.
$\alpha_r$	:	Ángulo interrampa.
b	:	Ancho de berma.
hb	:	Altura de banco.
br	:	Ancho de rampa.
qb	:	Ancho de quebradura.
$\alpha_0$	:	Ángulo global.
hr	:	Altura de interrampa.
h0	:	Altura global.
8:2	:	Sección de corte.
I, II	:	Clase o tipo de roca.
R2, R3	:	Grado de estimación de roca.
2ed	:	Segunda edición.

Vol1	:	Volumen de editorial.
λ	:	Landa.
L	:	Longitud.
D-1	:	Número de junta.
E	:	Estrato.
T	:	Talud.
15-f	:	Cuadrángulo geológico.
Ks-ca	:	Formación Cajamarca.
Az.	:	Azimut.
Bz.	:	Buzamiento.
Esc.	:	Escala.
\$	:	Dólares.
FS	:	Factor de seguridad.
D	:	Dip.
DD	:	Dip direction.
%PF	:	Probabilidad de fallamiento.
CaCO <sub>3</sub>	:	Carbonata de calcio.
CaO	:	Óxido de calcio.
Pág.	:	Página.
N°	:	Número.
MPa	:	Mega pascales.
N	:	Newton.
h.	:	Hora
min.	:	Minuto
Kg.	:	Kilogramos.
Ma.	:	Millones de años
J1	:	Junta.
gr	:	Gramos.
TM	:	Toneladas métricas.
HP	:	Caballos fuerza.
Rpm	:	Revoluciones por minuto.
Km.	:	Kilómetro.
Pulg.	:	Pulgadas.
m.	:	Metro.
cm.	:	Centímetro.
mm.	:	Milímetro.
Ha.	:	Hectárea.
m <sup>2</sup> .	:	Metros cuadrados.
m <sup>3</sup> .	:	Metros cúbicos.
Mm <sup>3</sup> .	:	Milones de metros cúbicos.
±	:	Mas o menos.
cm <sup>3</sup> .	:	Centímetros cúbicos.
cm <sup>2</sup> .	:	Centímetros cuadrados.
Km <sup>2</sup> .	:	Kilómetros cuadrados.
s	:	Segundo.
%	:	Porcentaje.
°	:	Grado.

>	:	Mayor.
<	:	Menor.
≥	:	Mayor igual.
EG-01.	:	Estación geomecánica.
msnm.	:	Metros sobre el nivel del mar.
°C	:	Temperatura.
N	:	Norte.
S	:	Sur.
E	:	Este.
W	:	Oeste.

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1. Índice de calidad de roca (RQD) de Deere et al., 1967. Fuente: Gavilanes y Andrade, 2004.	14
Cuadro 2.2. Clasificación Geomecánica de Bieniawski RMR89. Fuente: González, 2002	15
Cuadro 2.3. Calidad del macizo rocoso en relación al Índice RMR. Fuente: González, 2002.	16
Cuadro 2.4. Índice Geológico de Resistencia (GSI). Fuente: Hoek, 2002.	18
Cuadro 3.1. Coordenadas de tajo - Calera Bambamarca S.A.C., delimitada por poligonal cerrada.	23
Cuadro 3.2. Ruta de accesibilidad desde: Cajamarca a Hualgayoc.	25
Cuadro 3.3. Tipo, nivel, diseño y método de investigación.	30
Cuadro 3.4. Identificación de variables.	32
Cuadro 3.5. Reporte geomecánico de la calidad de roca del tajo de producción calera Bambamarca S.A.C.	51
Cuadro 3.6. Constantes elásticas del macizo rocoso del tajo calera Bambamarca S.A.C	52
Cuadro 3.7. Porcentaje de probabilidad de fallamiento planar del macizo rocoso del tajo de la empresa calera Bambamarca S.A.C	53
Cuadro 3.8. Porcentaje de probabilidad de fallamiento por cuña del macizo rocoso del tajo de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.	54
Cuadro 3.9. Porcentaje de probabilidad de fallamiento por vuelco del macizo rocoso del tajo de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.	54
Cuadro 4.1. Sistema de discontinuidades identificados en la Calera Bambamarca S.A.C	78
Cuadro 4.2. Probabilidad de ruptura de las estaciones de la cantera Bambamarca S.A.C	79
Cuadro 4.3. Parámetros del talud original de la cantera calera Calera Bambamarca S.A.C	80
Cuadro 4.4. Parámetros del talud optimizado de la cantera calera Bambamarca S.A.C	81
Cuadro 5.1. Registro Geomecánico EG-01	117
Cuadro 5.2. Registro Geomecánico EG-02	118
Cuadro 5.3. Registro Geomecánico EG-03	119
Cuadro 5.4. Registro Geomecánico EG-04	120

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Hoek-Brown sistema de clasificación de la masa rocosa, 2000. Fuente: Marinós y Hoek (2000).	17
Figura 2.2. A. Tajo abierto, B. Fosa abierta, C. Explotación en tiras y D. explotación combinada. Fuente: Piña, 2006.	19
Figura 2.3. Terminología de la cara libre del tajo. Fuente: Read y Stacey (2006).	20
Figura 3.1. Ruta de recorrido desde la ciudad: Cajamarca a Calera Bambamarca S.A.C. Fuente: Google Mapas, 2025.	24
Figura 3.2. Ingreso a las instalaciones de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.	25
Figura 3.3. Variograma de temperatura: Máxima (línea roja) y mínima (línea azul), con bandas percentiles: 25° a 75°, y 10° a 90° líneas punteadas temperaturas promedio. Fuente: Weather spark, 2025.	26
Figura 3.4. Variograma del porcentaje nubosidad de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes. Fuente: Weather spark, 2025.	27
Figura 3.5. Estalagmitas de longitud 0.30 m. formada por disolución de la roca carbonatada formada en una oquedad del macizo rocoso.	38
Figura 3.6. Estructuras de aragonito en forma de pilares verticales, dentro de una cavidad de longitud 0.25 m. y altura 0.10 m.	39
Figura 3.7. Falla normal sinistral de apertura 0.20 m. a 0.40 m., con Az/Bz = N224°/74°NW, ubicada al sur del tajo.	42
Figura 3.8. Falla inversa dextral con estrías: 1 mm. a 2.5 mm. y acanaladuras 0.10 m. a 0.15 m.; con orientación del plano de falla Az/Bz = N51°/76°SE.	43
Figura 3.9. Canteras de la calera Bambamarca S.A.C., constituido por estratos de caliza de la Formación Cajamarca, con patinas de óxidos en la superficie de la roca.	44
Figura 3.10. Visualización de las aureolas radiales desde: 0.50 m. a 0.65 m. por la detonación de explosivos, para la fragmentación de la roca caliza.	46
Figura 3.11. Estratos subhorizontales de roca de la Formación Cajamarca, cubiertos por Depósitos	48

	Deluviales de espesor 1.50 m.	
Figura 3.12.	Depósito Deluvial, constituido por materiales arcillo limo gravoso ubicado en el ingreso de las instalaciones mineras, cubriendo a los estratos de roca caliza.	48
Figura 3.13.	Estación geomecánica EG-01 compuesto de roca caliza de calidad regular, con $\sigma_{ci} = 150$ MPa., ubicado en la segunda banqueta del flanco izquierdo del tajo producción.	49
Figura 3.14.	Estación geomecánica EG-02 compuesto de roca caliza de calidad buena, con $\sigma_{ci} = 175$ MPa., ubicado en la segunda banqueta del centro del tajo producción.	50
Figura 3.15.	Estación geomecánica EG-03 compuesto de roca caliza de calidad buena, con $\sigma_{ci} = 167$ MPa., ubicado en la segunda banqueta del flanco derecho del tajo producción.	50
Figura 3.16.	Estación geomecánica EG-04 compuesto de roca caliza de calidad buena, con $\sigma_{ci} = 182$ MPa., ubicado en la primera banqueta del flanco izquierdo del tajo producción.	51
Figura 3.17.	Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-01.	55
Figura 3.18.	Probabilidad de ruptura planar con 26.67%, formando por las juntas: D-1 y D-2, constituido por 12 planos críticos del total de 45, EG-01	56
Figura 3.19.	Probabilidad de ruptura por cuña con 28.92%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-01.	57
Figura 3.20.	Probabilidad de ruptura por vuelco con 00.00%, no formando planos críticos, constituido por 0.0 planos críticos del total de 45, EG-01.	58
Figura 3.21.	Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-02.	59
Figura 3.22.	Probabilidad de ruptura planar con 15.56%, formando por la junta D-2, constituido por 7 planos críticos del total de 45, EG-02.	60
Figura 3.23.	Probabilidad de ruptura por cuña con 15.35%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-02.	61
Figura 3.24.	Probabilidad de ruptura por vuelco con 00.00%, no formando planos críticos, constituido por 0.0 planos críticos del total de 45, EG-02.	62

Figura 3.25. Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-03.	63
Figura 3.26. Probabilidad de ruptura planar con 12.20%, formando por la junta D-2, constituido por 5 planos críticos del total de 45, EG-03.	64
Figura 3.27. Probabilidad de ruptura por cuña con 30.24%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-03.	65
Figura 3.28. Probabilidad de ruptura por vuelco con 00.00%, no formando planos críticos, constituido por 0.0 planos críticos del total de 45, EG-03.	66
Figura 3.29. Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-04.	67
Figura 3.30. Probabilidad de ruptura planar con 26.83%, formando por la junta D-1, constituido por 11 planos críticos del total de 45, EG-04.	68
Figura 3.31. Probabilidad de ruptura por cuña con 6.34%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-04	69
Figura 3.32. Probabilidad de ruptura por vuelco con 34.15%, formando por la junta D-2, constituido por 14 planos críticos del total de 45, EG-04.	70
Figura 3.33. Parámetros de rediseño del tajo para optimizar el método de explotación en la Calera Bambamarca S.A.C.	71
Figura 3.34. Tajo de explotación de la Calera Bambamarca S.A.C., ubicado en la parte superior de las instalaciones mineras	72

## LISTA DE PLANOS

		Pág.
PLANO 01	: SATELITAL SASPLANET – BING MAPS	106
PLANO 02	: UBICACIÓN	107
PLANO 03	: SUPERPOSICIÓN DE PROPIEDADES	108
PLANO 04	: DELIMITACIÓN DE OPERACIONES MINERAS	109
PLANO 05	: GEOLOGIA REGIONAL	110
PLANO 06	: GEOLÓGICO LOCAL	111
PLANO 07	: GEOMECÁNICO	112
PLANO 08	: CINEMÁTICA DE PROBABILIDAD DE FALLAMIENTO	113
PLANO 09	: DISEÑO DEL TAJO DE EXPLOTACIÓN	115

## RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la cantera Calera Bambamarca S.A.C., ubicada en el centro poblado Cumbe Chontabamba, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, donde se explota caliza para la producción de cal. El objetivo fue realizar el cartografiado geológico, caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso y optimizar el método de explotación mediante un rediseño geométrico sustentado en criterios geomecánicos. La metodología incluyó reconocimiento de campo y levantamiento geológico–estructural, medición de discontinuidades (orientación, espaciamiento, persistencia, apertura y relleno), evaluación geomecánica mediante los índices RQD, RMR y GSI, determinación de parámetros resistentes aplicando el criterio de Hoek–Brown con conversión a Mohr–Coulomb, y análisis cinemático con el software DIPS para identificar mecanismos de falla planar, por cuña y por vuelco. Con base en estos resultados, se desarrolló la optimización del método de explotación mediante rediseño geométrico y evaluación técnico–operativa del sistema productivo. Los resultados establecieron que la cantera se emplaza en la Formación Cajamarca, con bancos de caliza de 0.20 a 0.40 m y orientación promedio  $N283^{\circ}/41^{\circ}NE$ . El macizo presenta calidad entre regular y buena (RQD: 58.20–91.12 %; RMR: 53–87; GSI: 48–83). El análisis cinemático evidenció probabilidades de falla de hasta 34.15 % en sectores críticos del diseño original. El rediseño propuesto (bancos de 10 m, ángulo individual de  $71^{\circ}$ , ángulo global de  $54^{\circ}$  y bermas de 3.50 m) permitió reducir el esfuerzo vertical inducido en aproximadamente 60 % y disminuir la probabilidad de inestabilidad. Asimismo, la optimización técnico–operativa proyecta un incremento de eficiencia del 8 %, elevando la producción anual de 40,500 TM a 43,740 TM, con un impacto económico estimado de 388,800 USD anuales. Se concluye que la caracterización geomecánica constituye la base para mejorar simultáneamente la estabilidad, seguridad y eficiencia productiva del sistema de explotación.

**Palabras clave:** Formación Cajamarca, caliza, geomecánica, discontinuidades, estabilidad de taludes, optimización minera, minería no metálica.

## ABSTRACT

This research was conducted at the Calera Bambamarca S.A.C. quarry, located in Cumbe Chontabamba, Bambamarca district, Hualgayoc province, where limestone is extracted for lime production. The objective of the study was to perform geological mapping, geomechanically characterize the rock mass, and optimize the mining method through a geometrical redesign based on geomechanical criteria. The methodology included field reconnaissance and geological–structural mapping, measurement of discontinuities (orientation, spacing, persistence, aperture, and infill), geomechanical evaluation using the RQD, RMR, and GSI indices, determination of equivalent strength parameters applying the Hoek–Brown failure criterion with conversion to Mohr–Coulomb parameters, and kinematic stability analysis using DIPS software to identify potential planar, wedge, and toppling failure mechanisms. Based on these results, an optimization stage of the mining method was developed through slope geometric redesign and technical–operational evaluation of the production system. Results established that the quarry is located within the Cajamarca Formation, composed of limestone beds ranging from 0.20 to 0.40 m in thickness, with an average structural orientation of N283°/41°NE. The rock mass quality varies from fair to good (RQD: 58.20–91.12%; RMR: 53–87; GSI: 48–83). The kinematic analysis identified failure probabilities of up to 34.15% in critical sectors of the original design. The proposed redesign (10 m bench height, 71° individual slope angle, 54° overall slope angle, and 3.50 m berm width) reduced the induced vertical stress by approximately 60% and decreased the probability of structural instability. Additionally, the technical–operational optimization projects an 8% efficiency increase, raising annual production from 40,500 tons to 43,740 tons, with an estimated economic impact of USD 388,800 per year. It is concluded that geomechanical characterization constitutes the fundamental basis for simultaneously improving slope stability, operational safety, and production efficiency in the mining system.

**Keywords:** Cajamarca Formation, limestone, geomechanics, discontinuities, slope stability, mining optimization, non-metallic mining.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

El frente de explotación de roca caliza de la empresa Calera Bambamarca S.A.C. se ubica en el centro poblado Cumbe Chontabamba, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, al norte del departamento de Cajamarca. La cantera está constituida por roca caliza de color gris azulado, con vetas de espesores entre 0,20 m y 0,30 m, de persistencia mayor a 15 m y orientación estructural subhorizontal a moderada. En el macizo rocoso se reconocen tres mecanismos principales de falla: planar, en cuña y por vuelco, los cuales favorecen el colapso de los taludes, intensificado por el uso continuo de perforación y voladura. Actualmente, la empresa produce en promedio 200 toneladas métricas por día con un 93 % de pureza, mediante un método de explotación a cielo abierto, utilizando bancos de 6 a 8 m de altura, complementado con procesos de seleccionamiento gravitatorio para alimentar los hornos de calcinación. Sin embargo, el diseño actual de la explotación presenta deficiencias que afectan tanto la seguridad como la eficiencia operativa, evidenciándose además la presencia de depósitos antrópicos gravo-limosos a limo-arcillosos que dificultan el proceso de selección del material. Las instalaciones de explotación y beneficio, emplazadas en la concesión MC POLCY N5, se encuentran sobre unidades geomorfológicas como lomadas, laderas y escarpas, con buzamientos que varían entre 15° y 85°, formando farallones verticales constituidos por roca de calidad geomecánica buena a muy buena.

En este contexto surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye la caracterización geomecánica en la optimización del método de explotación en la empresa Calera Bambamarca S.A.C.? Frente a ello, se plantea como hipótesis que:

La caracterización geomecánica del macizo rocoso en la cantera de la empresa Calera Bambamarca SAC., mediante la evaluación de parámetros litológicos, estructurales y de resistencia constituirá la base para proponer un rediseño geométrico del método de explotación a cielo abierto, sustentado en criterios geomecánicos que permitan mejorar la estabilidad de taludes, minimizar los riesgos de desprendimiento y aumentar la eficiencia operativa de la cantera.

El desarrollo de la presente investigación se sustenta en la necesidad de reducir las condiciones de incertidumbre e inseguridad reportadas por los trabajadores, quienes laboran actualmente en taludes con alturas que varían entre 15 y 20 m y buzamientos de 80° a 90°, configurándose un solo frente vertical donde se originan caídas esporádicas de rocas que afectan las zonas bajas del frente de explotación. En ese sentido, la importancia de este estudio radica en que permitirá optimizar el método de explotación mediante una adecuada caracterización geomecánica del macizo rocoso, mejorando la estabilidad de los taludes y generando un impacto positivo en las operaciones complementarias de desbroce, perforación, voladura, cuarteo, seleccionamiento y acarreo, incrementando de manera directa la seguridad y la eficiencia operativa de la cantera.

La investigación se encuentra delimitada a la caracterización geomecánica del macizo rocoso de la cantera de la empresa Calera Bambamarca S.A.C., abarcando la evaluación de parámetros estructurales, índices geomecánicos y parámetros de resistencia, así como el análisis de estabilidad de taludes y la identificación de condiciones favorables para fallas planas, en cuña y por vuelco. Asimismo, se consideran los principales parámetros de diseño geométrico, tales como altura de banco, ancho de berma, ángulo de talud e interrampa, con la finalidad de proponer un rediseño geométrico técnicamente sustentado del método de explotación. Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran el bajo presupuesto disponible para la ejecución de ensayos especializados.

El objetivo general de la investigación es Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso de la cantera de la empresa Calera Bambamarca S.A.C., con la finalidad de optimizar geomecánicamente el método de explotación mediante el rediseño geométrico de los taludes. Como objetivos específicos se consideran: realizar el cartografiado geológico de la cantera, obtener la caracterización

geomecánica del macizo rocoso y proponer un rediseño geométrico de la cantera basado en parámetros de estabilidad.

El desarrollo de la tesis se estructura en cinco capítulos. El Capítulo I presenta la introducción, donde se expone el contexto, el problema de investigación, la hipótesis, los objetivos, la importancia y los alcances del estudio. El Capítulo II corresponde al marco teórico, donde se desarrollan las bases conceptuales de la geomecánica, la estabilidad de taludes y los métodos de explotación. El Capítulo III describe los materiales y métodos utilizados en la investigación. El Capítulo IV presenta los resultados y el análisis geomecánico del macizo rocoso. Finalmente, el Capítulo V expone las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1 INTERNACIONALES**

Ualdón et al., (2023). Realizaron la investigación “Caracterización de las calizas del Noroeste del Chubut”. Se reporta la presencia de potentes afloramientos de calizas biohermales que forman estructuras bulbosas (Microbialita bulbosa radial), de grandes pináculos (Microbialita radial columnar y microbialita bulbosa) y culminan con niveles de destrucción de los biohermos (Rudstone bioclásticos). Los cuerpos bioconstruidos crecen sobre niveles de grainstone silicoclásticos y pasando lateralmente a packstones-grainstones sedimentarios en cuerpos de agua estancos. Asimismo, es frecuente encontrar estructuras asociadas a pequeños arroyos de aguas alcalinas. El sector sur predomina secuencias de packstones silicoclásticos con ostrácodos, grainstone intraclásticos con ostrácodos y areniscas carbonáticas con clastos de microbialita en el techo de la secuencia. Estos depósitos Pertenecen a la Formación Carinao del Oligoceno – Mioceno, identificando 7,480,000 m<sup>2</sup> de superficie y volumen de caliza de 51 Mm<sup>3</sup>. Geoquímicamente tienen 40.70% de calizas aflorantes de media pureza (93.50% a 97% de CaCO<sub>3</sub>) y 35.80 % de baja pureza (85% a 93.50% de CaCO<sub>3</sub>).

Quintana y Navarro, (2022), realizaron la investigación “Utilización de un sistema de medición del riesgo de caída de rocas en la fase operativa en el camino de Atlas Cumbes, sierra Chica, Córdoba, Argentina”. El estudio definió que presenta 18 taludes críticos con valores desde RHRS: 69 a 225 puntos, delimitando sectores de color: Rojo (Puntuaciones 153 a 225, con inestabilidad) amarillo (Puntuaciones 121 a 173, estabilidad buena) y verde (Estable a mediano y largo plazo), compuesto por rocas: Cataclasitas, pegmatitas, Metatexitas, mármoles calcítico y dolomítico,

gneis esquistoso y gneis masivo. Se definió que los taludes EG11 ocasiona obstaculización del drenaje del pie de talud – cuneta, EG17 ocurrieron derrumbes con un incremento 200% siendo S1 y S2 produciendo caída de rocas por juntas, mejorando la primera berma de sección 2V:1H y superior 2V:1H; EG16 ocurre caída de rocas por flujos de agua afectando el 3% obstruyendo la cuneta. Los tamaños de bloques son: 0.56 m a 1.0 m. y volumen 6.70 m<sup>3</sup>.

Cantera Carranza y Karrantza Harrobiu (2017). Realizaron la investigación “Proyecto de explotación de la cantera Ventalaperra”. Está emplazada en calizas Urganianas, características de la sedimentación carbonatada de la cuenca Vasco-Cantábrica (Albiense, Cretácico medio) en el flanco sur se encuentra una estructura anticlinal caracterizada por el predominio de formaciones carbonatadas estratificadas de buzamiento suave 10°SE - 20°SE, correspondiente a calizas grises con abundantes fósiles (Rudistas y corales)(U2), con homogeneidad composicional, continuidad lateral y karstificación, aflorando en la parte inferior calizas arenosas y margosas (U1) y al este materiales más margosos implicando materiales que están inmediatamente por debajo de la cantera teniendo menos permeabilidad. La cantera presenta un área de 400,000 m<sup>2</sup>, con volumen total de recurso 6,530,000 m<sup>3</sup>, con producción 550 TM/año, estimada para 30 años; proyectando bancos de explotación desde la cota: 150 msnm. a 280 msnm., con parámetros geométricos:  $\Psi_T = 80^\circ$ , b = 6.00 m., hb = 20.00 m., rampa = 8.00 m. %P = 9.29% y plataforma de trabajo = 25.00 m. con dos frentes de explotación D/DD: Oeste 78°/132° y Este 78°/210°, con FS > 1.50

Alomalisa y Villamar (2018). Realizaron la tesis “Optimización de explotación de caliza en la concesión minera “Perla del Pacífico” ubicada en la comuna San Antonio, cantón General Villamil, provincia del Guayas – Ecuador”. Se emplaza en la Formación San Antonio aflorando calizas de tipo arrecifal de color crema y habano con algas y foraminíferos, conformando grosor 120 m.; con secuencias de fósiles y rocas calizas: Packstones a grainstones, siendo calizas ricas en algas presentan espesor variable y altamente deformada y fallada. La distribución de esta formación puede estar restringida por el flanco SW de la Cuenca Progreso. Proponiendo perforación al tresbolillo con consumo específico de 0.30 kg/m<sup>3</sup>, garantizando mejor distribución de la energía del explosivo en la

roca y mejor fracturación de roca optimizando en 5.50% del costo total de la operación. Siendo los volquetes Mercedes-Benz 8 m<sup>3</sup> y 15 m<sup>3</sup> de la empresa el porcentaje de incremento del tiempo operativo con respecto al real fue de un 58%; por otra parte, el coeficiente de utilización en mineral es de 27.75%, debido al uso constante para operaciones auxiliares. Por consiguiente, el uso del volquete HINO subcontratado, para la movilización del material que actualmente transporta el camión Mercedes Benz reduciría aproximadamente en un 34.68% el costo operativo de los 1,864 m<sup>3</sup> de caliza que se trasladan anualmente.

Alvear, et al., (2021). Realizó la investigación “Diseño y análisis económico de la explotación a cielo abierto de un yacimiento de caliza”. Se ubica en el área minera Estancias Cerro Azul al Oeste de la ciudad de Guayaquil; ubicado en la Formación San Eduardo, conformado por caliza, produciendo 8,000 TM, desde la cota 105 msnm. a 185 msnm. proyectando 8 niveles, proyectando reservas probadas 682,640 m<sup>3</sup>. Presentando parámetros de diseño: altura de talud = 72°, altura de banco = 10 m. y Ancho de banco = 8 m. con sistema de explotación a a tajo abierto descendente, mediante parámetros de voladura: espaciado = 4 m., burden = 2.00 m., sobre perforación 1.00 m., longitud de barrenos = 3.00 m. proyectando 15 huecos. Aplicando vías de transporte y acarreo del 10%. Considerando costos de minado: 5% personal, 38% barrenos, 12% brocas y 1% combustible y explosivo 44%. Proponiendo rentabilidad del 12% con un valor presente neto de 156.986 \$ USA, proyectando 5 años de vida útil.

Monte, (2020). Realizó “Análisis de estabilidad de taludes en roca mediante el método de elemento finitos”. Se encuentra ubicado en la localidad rural El Patagual, comunidad Coronel, provincia Concepción, región Biobío, Chile. Por consiguiente, los ensayos de compresión varían: 7.84 MPa a 22.43 MPa., RQD = 61.60 a 43.80,  $\lambda = 13.31 \text{ m}^{-1}$  a  $18.85 \text{ m}^{-1}$ , S = 0.08 m. a 0.05 m., con GSI = 45 a 65, parámetros de criterio Hoek-Brown:  $s = 7.13 \times 10^{-4}$  a  $1.67 \times 10^{-4}$ ,  $a = 0.506$  a  $0.511$ ,  $m_b = 1.218$  a  $0.703$ ,  $\nu = 0.43$  a  $0.25$ ,  $E_i = 3,750 \text{ MPa}$ ,  $E_m = 402.30 \text{ MPa}$  a  $218.40 \text{ MPa}$ . Obteniendo FS en las cinco secciones en el talud A: A1 (FS = 1.51), A2 (FS = 1.40), A3 (FS = 1.60), A4 (FS = 1.40) y A5 (FS = 1.51); y siete secciones en el talud B: B1 (FS = 1.41), B2 (FS = 1.38), B3 (FS = 1.31), B4 (FS = 1.60), B5 (FS = 1.39), B6 (FS = 1.41), B7 (FS = 1.40). Aplicando la probabilidad de ruptura

muestra bajos porcentajes de inestabilidad en ruptura planar en ambos taludes, sin embargo, la ruptura por cuña en el talud: A = 33.33% y B = 00.00%, en cambio la ruptura por vuelco en el talud: A = 00.00% y B = 50.00%.

### 2.1.2 NACIONALES

Calderón, Huamán y Segura, (2021). Realizó la tesis “Evaluación de las canteras de travertino de la provincia de Huancayo, región Junín”. Están constituido por rocas calcáreas de color: Crema y beige, con delgadas capas de margas y lutitas, conformando terrazas semihorizontales, ubicado en el petitorio CANIPACO 2013; facilitando la extracción por bloques el afloramiento del travertino con rumbo N45°W y longitud de 50 m. a 200 m. de ancho y 15 m. de altura.; con volumen 150,000 m<sup>3</sup>, con producción 200 m<sup>3</sup>/mes, proyectando vida útil 25 años. Precizando costo de operación 110 US\$/m, utilidad bruta 40 US\$/m; por consiguiente, la recuperación optima de travertino de las canteras de los pequeños productores mineros está en el rango de 40% a 50 %, pero si utilizaran hilo diamantado estarían en más del 70 %. Ubicándose los productores de travertino están entre: Huancayo y La Oroya, pueden vender su “desmonte” de travertino, a la calera Luren (La más grandes del Perú) ubicada en Lurín, Lima, para que esta elabore cal.

Murillo, (2022). Realizó la tesis “Proceso de implementación del método de plataformas secuenciales para la explotación de caliza en la concesión minera Conchoc-2022”. La explotación se proyecto para realizarse por el método de plataformas secuenciales proyectando producción 120 TM/día, con una reserva de mineral de 3,456,000 TM, con una vida útil estimada de 80 años y recuperación del 87%. Clasificándolo como roca de muy mala calidad, con RQD = 23 %, RMR = 20 – 31. con orientación de sistema discontinuo e inclinación desfavorables. Siendo emplazado la cantera de Caliza en una estructura anticlinal de orientación Este-Oeste, hb = 10 m., b = 3.40 m. y  $\Psi_T = 70^\circ$ . La reducción de costos de operación por el continuo desarrollo de las plataformas secuenciales se debe a la selección de mejores calidades con un 15% de índice de limpieza de desmonte y poca dilución de caliza, ya que la voladura se realiza sobre el mismo material a romper. Siendo los parámetros de banco a explotar: altura = 7 m., ancho = 20 m., largo = 60 m., volumen total = 6,000 m<sup>3</sup>, densidad de roca 2.70 gr/cm<sup>3</sup>, densidad de explosivo 0.80

gr/cm<sup>3</sup>, densidad de iniciador 1.60 gr/cm<sup>3</sup>, diámetro de barreno 0.09 m. y cálculos de taladro: B = 7.40 pies, S = 3.85 pies, Sp = 0.68 m. T = 1.588 M., Vrt = 61.05 m<sup>3</sup>, Tnr = 164.83 TM y N° de taladros = 98.

Gutiérrez, (2019). Realizó la tesis “Análisis y evaluación entre los métodos de explotación convencional y plataformas aplicados en la cantera de caliza de la empresa UNACEM S.A.A.”. La caracterización geomecánica del macizo rocoso se realizó 30 estaciones geomecánicas de mapeo por celdas, conformado por 3 diaclasas DD/D: 319°/52°, 127°/54° y 226/57°; mediante parámetros de diseño de minado conformado por: 5 bancos de 10 m. de altura explotando de forma descendente; con los siguientes parámetros convencionales:  $\Psi_T = 70^\circ$ ,  $\Psi_{TFINAL} = 50^\circ$ . Hb = 10 m., b = 5 m., Gradiente = 12% y R = 20 m. y parámetros plataforma:  $\Psi_T = 70^\circ$ ,  $\Psi_{TFINAL} =$  No aplica. Hb = 10 m., b = No aplica y R = 20 m. Los costos de los explosivos para el sistema de explotación convencional para el talud final de la cantera son de 0.65 S/TM porque se va realizar precorte. Sin embargo, para el método de explotación por plataformas, el costo es de 0.33 S/TM debido a que reduce el precorte a cero soles; por lo tanto, hay una reducción de 97%.

Catari, et al., (2025). Realizó la investigación “Optimización del diseño de talud en minería superficial mediante el método de elementos finitos”. La estabilidad del talud sur en la Mina Cuajone, utilizó métodos estáticos y pseudoestáticos, permitiendo identificar un riesgo significativo de falla con FS de 0.92 en estado original. Mediante la optimización del ángulo de inclinación a 43°, se logró incrementar el FS a 1.11, garantizando la estabilidad del talud. Este hallazgo no solo mejora la seguridad operativa. Asimismo, el análisis del talud norte con FS de 1.57 en condiciones pseudoestáticas con ángulo de inclinación de 38° es adecuado para garantizar la estabilidad. Sin embargo, la investigación destacó las propiedades del material de relleno, en contraste con la roca, juegan un papel crucial en la estabilidad del talud. Mantener el ángulo de 38° en lugar de aumentarlo a 41° es esencial para prevenir posibles fallas. Estos resultados subrayan la necesidad de realizar estudios geotécnicos específicos del sitio y proponen una línea de investigación futura centrada en la caracterización y modelación del comportamiento de los materiales de relleno en la estabilidad de taludes mineros.

Consuelo (2022), investigó “Caracterización geomecánica de la pared oeste del tajo abierto Toromocho, Mina Chinalco”. El mapeo presenta alineamientos estructurales como fallas regionales y locales que gobiernan la zona del proyecto minero, así como los trabajos de voladura y apertura de accesos condicionan el comportamiento mecánico del macizo. Determinando que gran parte del macizo rocoso está muy fracturado, su resistencia máxima media (R3), siendo el promedio de resistencia baja (R2), en relación a las características de las discontinuidades gran parte de estas presentaban espaciamientos entre 0.06 m a 0.20 m. predominando las discontinuidades persistentes de 3 m. y 10 m., llegando a 15 m. en zona de falla; la abertura en las familias de juntas es menor a 5 mm. siendo mayores en zonas de falla, con relleno duro y blando, y planos de superficies planas: Rugosas y suaves. En relación con la orientación de las discontinuidades éstas han sido divididas en tres sectores: E-W, NW-SE, NE-SW y NEE-SWW. El análisis cinemático se realizó por dominios estructurales y litología, con predominancia de fallas en cuña, planares y vuelco.

Revollar (2020). Realizó la investigación “Diseño conceptual de la explotación a tajo abierto del cuerpo de hierro Toro Negro, sector Petra de Sociedad Minera de Responsabilidad Limitada Yale II”. La geomecánica reporta a la Estructura ( $\sigma_{ci} = 73.95$  MPa, %RQD = 92.90, calidad buena IIB y N° fracturas/metro 10), Oeste ( $\sigma_{ci} = 20.18$  MPa, %RQD = 74.50, calidad regular IIIB y N° fracturas/metro 5) y Este ( $\sigma_{ci} = 80.83$  MPa, %RQD = 81.2, calidad regular IIIB y N° fracturas/metro 8). Obteniendo reservas 586,429,120 TM, con producción 50,000 TM/día, con ley Fe de 23.86%. Los parámetros de diseño: Ángulo global del pit = 45°, altura de banco = 10 m., ángulo de interrampa = 45°, ángulo de cara de banco = 75°, altura de berma = 3 m., ancho de banco/berma 8.30 m., ancho de berma de seguridad = 6.80, ancho de rampa = 25 m., gradiente máxima de rampa = 10%, ancho de cuneta = 3 m., gradiente mínima de carretera de alivio = 13%, gradiente máxima de camino de acceso al botadero = 10% y altura de banco del estéril = 30 m. y pendiente de banqueteta = 40°.

### 2.1.3 LOCALES

Mujica, (2024). Realizó la tesis “Cálculo de reservas de las calizas de la Formación Cajamarca para la obtención de óxidos de calcio (CaO) distrito de Jorge Chávez - Celendín”. El cálculo de reservas de las calizas de la Formación Cajamarca en el distrito de Jorge Chávez, Celendín, presenta volumen estimado de 34,811,414.51 TM. Proyectando 18,128,197.3 TM para la producción de óxido de calcio (CaO), destacando tanto por la calidad como por el volumen del recurso. Estos resultados confirman el importante potencial de la zona y garantizan la viabilidad para su explotación industrial. Asimismo las pruebas químicas y mineralógicas de la caliza confirmaron su alta pureza y contenido significativo de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) está entre: 90.11% y 93.72%, lo que la hace adecuada para obtener óxido de calcio (CaO) el cual varía entre el 52.22% y el 60.91% considerándolo de buena calidad. Utilizando parámetros de explotación a cielo abierto descendente:  $\Psi_T = 80^\circ$ ,  $\Psi_{TFINAL} = 27^\circ$ , hb = 5.00 m., Nb = 7, A = 8.75 m.

Terán, (2022). Realizó la tesis “Evaluación geotécnica y diseño del tajo Esmael de la empresa Cal Plus, concesión Colquirrumi 49-C. distrito, provincia de Hualgayoc - Cajamarca”. El tajo Esmael está emplazado en el Cretáceo Superior - Formación Cajamarca, conformado por calizas de espesores: 0.30 m. a 1.20 m., con orientación Az/Bz = N52°/20°SE, a favor del talud, con pequeñas vetillas de calcita de espesores 1.0 mm a 1.5 mm; la mecánica de rocas muestra rocas de calidad: Buena a muy buena, con  $\sigma_{ci} = 105$  MPa a 210 MPa. Categorizado como R5,  $\phi = 38^\circ$  y  $c = 9.18$  MPa. Las geoestructuras muestran cuatro juntas definiendo 3 tipos de rupturas: %PRplanar 18.93% siendo críticas 32 de 169 polos, %PRcuña 16.15% siendo críticas 2,293 de 14,194 intersecciones y %PRvuelco 15.38% siendo críticas 26 de 169 intersecciones. Aplicando método de explotación a tajo abierto con diseño del tajo: altura de banco = 2.00 m., quebradura = 0.35 m., ancho rampa = 4.50 m., ancho berma = 2.40 m., ángulo de banco = 80° y ángulo final de banco = 33°.

Chuquimango, (2024). Realizó la tesis “Análisis geomecánico del tajo de explotación de la Minera Nueva Unión E.I.R.L. - distrito, provincia Hualgayoc – departamento Cajamarca”. Reportando que el análisis del comportamiento de

probabilidad de fallamiento: Planar del 46.67% EG-2 (PE) al 2.22% EG-4 (PE); cuña del 44.95% EG-1 (ID-1/D-2), al 6.87% EG-4 (ID-1/E); vuelco del 0.00% EG-1 al 2.22% EG-4 (PD-1); y base deslizante del 68.89% EG-1 (D-1) al 33.33% EG-3 (E); perteneciente al Mesozoico-Cretácico Superior, constituida por bancos de espesor: 0.80 m. a 2.50 m. de roca caliza de la Formación Cajamarca de orientación Az/Bz N56°/23°SE, caliza mudstone con  $\sigma_{ci} = 80$  MPa. a 120 MPa., presentando blocosidades de forma: Tabulares, cúbicos y prismática, de calidad: Regular, buena a muy buena. Obteniendo características geomecánicas  $\sigma_{ci} = 80$  MPa a 125 MPa, RQD = 57.32% a 93.84%, RMR = 52 a 84 y GSI = 47, de calidad: Regular a buena de estimación R4 a R5 – 2 golpes 3 golpes. Proponiendo explotación tajo de explotación a cielo abierto constituido por parámetros por:  $h_b = 6.00$  m.,  $b = 3.20$  m.,  $q_b = 1.61$  m.,  $\alpha_b = 75$ ,  $\alpha_o = 47$ , y  $h_o = 15.00$  m., realizándose por bancos por la forma del yacimiento y el análisis de resistencia de la roca.

Saldaña, (2025) realizó la tesis “Caracterización geomecánica del macizo rocoso para la determinación del método de explotación de mármol en el distrito de Jorge Chávez Celendín”. Definió que el mármol se generó por el metamorfismo de la Formación Cajamarca, formando mármol de color: Blanquecinos altos contenidos orgánicos, rojos y rosados y amarillos, cremas por su alto contenido de hierro. La geomecánica muestra RMR: 53 a 59 (Tipo III, regular calidad) y GSI de 51 a 57 de calidad regular, con valores  $c$ : 4.273 MPa a 4.926 MPa y  $\phi$ : 22.496° a 24.991°, proyectando método de explotación a cielo abierto; con profundidad de explotación de 100 m., el número de bancos 10, la altura de banco 10 m., el ángulo de talud de 63°, el ángulo de talud final de 39° y el ancho de plataforma de 7 m.; mediante secuencia de explotación pro actividades como: desbroce, arranque primario, desprendimiento, volcado, carguío y acarreo, obtenido %PF planar 28% a 34.78%, cuña 34.19% a 45.45% y vuelco 4.35% a 28%, para el desbroce de roca.

Ortiz, (2024). Realizó la tesis “Evaluación geomecánica para mejorar el diseño de los bancos de explotación de Multiservicios Pirámides de Oro S.R.L., distrito, provincia Hualgayoc departamento de Cajamarca”. La cantera está ubicada en el flanco izquierdo del sinclinal - Apan Bajo de orientación WNW-ESE, con Bz = 13° a 20°SW-NE; y esfuerzos tectónicos SSW-NNE; presentando plegamientos de orientación SW-NE, delimitan cuatro juntas (Az/Bz): N67°/22SE, N318°/84°SW,

N205°/76°SW y N142°/73°SW; formando caídas de rocas de forma: tabular, cúbica y prismática, de tamaño: 0.50 m. a 0.80 m., reportando rocas de buena calidad con valores: RQD (EG-1 = 84.42, EG-2 = 80.65 y EG-3 = 93.84), RMR (EG-1 = 73, EG-2 = 69 y EG-3 = 75) y GSI (EG-1 = 68, EG-2= 64 y EG-3 = 70),  $\sigma_{ci}$  = 110 MPa a 120 MPa con estimación R5,  $\phi$  = 25.61 a 28.98 y  $c$  = 4.55 MPa a 5.69 MPa.; mediante %PF: Planar < 4.44% EG-1 (D-1), 2.22% EG-2 (D-1) y 10% EG-3 (D-1); por cuña < 5.57% la EG-1 (E y D-2) y 4.14% EG-2 (D-1 y D-2) y 21.31% EG-3 (D-1 y D-2); y por vuelco desde: 31.11% a 40% la EG-1, EG-2 y EG-3; generándose condiciones de inestabilidad: Baja (EG-1), moderada (EG-2) y alta (EG-3); utilizando método de explotación a cielo abierto con parámetros: hb = 4.00 m., b = 4.00 m., br = 8.00 m., ab = 80,  $\alpha_o$  = 84, hr = 16.00 m.,  $\alpha_r$  = 40° y ho = 32.00 m.

Limay, (2025). Realizó de la tesis “Evaluación geomecánica para determinar la inestabilidad del Tajo Bendición de Dios E.I.R.L., distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc”. El cartografiado geológico geomecánico muestra roca caliza mudstone – micrítica de color gris azulada de la Formación Cajamarca de orientación Az/Bz N40°/38°SE, con bancos gruesos y duros formando blocosidades de forma: Tabular y cubica, resistencia e golpes/R5, categorizados rocas de buena calidad con RQD: 83.47% 88.74%, RMR: 75 a 81, GSI: 72 A 76 y  $\sigma_{ci}$  = 172 MPa a 205 MPa. Así mismo el comportamiento cinemático %FR: planar (31.71% a 46.34%) y cuñas (28.41% a 44.87%); definiendo como zona de alto riesgo de inestabilidad por FS < 1.50 en tensiones: Totales 1.571 a 1.258, efectivas 1.485 a 0.983 y efectivas + sismicidad 0.903 a 0.690; susceptibles a caída de rocas. Plantea estabilizar por dos banquetas de 30.00 m. y sección de corte 10:1; con berma 5.50 m., siendo complementado la segunda banqueta con anclajes sistemáticos tresbolillo de 8 pies de longitud, siendo distribuidos 44 anclajes en toda a la superficie @ 10.00 m. de L/A constituyendo 11 anclajes en sentido longitudinal y 4 en sentido transversal.

Wilson, (1984). Realizó “Boletín N° 31 Serie A. Carta Geológica Nacional: Geología de los cuadrángulos: Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (14-e)”. Enfoca el contexto geológico regional a escala 1/100,000 en los aspectos: Estratigráficos, estructurales, tectónicos y plutonismo, con breves

descripciones de los yacimientos y prospectos reconocidos en la región de Cajamarca; para interpretaciones, análisis y ubicación de las formaciones geológicas, siendo de gran apoyo para geología local.

Jaimes, Navarro y Santos (2013). Aportaron con el “Mapa geológico del cuadrángulo de Chota, escala 1/50,000 hoja 15-f”. Mostrando información detallada de la geología local, geoestructuras y cuerpos volcánicos: Extrusivos e intrusivos; del área de influencia de la realización de la tesis de investigación fundamentada en cartografiados geológicos actualizados.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS**

Es utilizada para obtener los parámetros geomecánicos siendo de importancia para: Diseño y obras de ingeniería. Estas clasificaciones aportan mediante la observación directa de las características del macizo rocoso y realización de ensayos, relacionados con índices de calidad de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y sus características frente a los sostenimientos de taludes (González, 2002). Las características del macizo rocoso considerar las diferentes clasificaciones geomecánicas en función de:

- Resistencia del macizo rocoso.
- RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Orientación de discontinuidades.
- Condiciones de discontinuidades.
- Estructura geológica y fallas.
- Filtraciones y presencia de agua.
- Estado tensional.

Definida por las siguientes clasificaciones geomecánicas:

- **ROCK QUALITY DESIGNATION DEERE (1964)**

El Índice RQD (Rock Quality Designation), indica el grado de fracturamiento del macizo rocoso, muestra la frecuencia lineal de discontinuidades. Este índice se utiliza como parámetro para las clasificaciones geomecánicas RMR de Bieniawski y Q de Barton. Se calcula simplemente agregando el número de discontinuidades naturales por metro de muestreo y reemplazando en la siguiente ecuación:

$$RQD = 100 * e^{-0.1\lambda} * (0.1\lambda + 1) \quad \text{Ecuación 1}$$

$\lambda$  = Número de discontinuidades / longitud (metros).

Cuadro 2.1. Índice de calidad de roca (RQD) de Deere et al., 1967.

RQD (%)	Calidad de roca
< 25	Muy Pobre
25 - 50	Pobre
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: Gavilanes y Andrade, 2004.

- **VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO BIENIAWSKI (1989)**

Desarrollado por Bieniawski en 1973 y actualizaciones en 1979 y 1989. Permite obtener el índice de calidad con parámetros geomecánicos del macizo rocoso. El factor de ajuste depende de la orientación de discontinuidades, tomando valores distintos para: Túneles, cimentaciones y taludes, y adquiere más importancia en taludes. El resultado de la suma de los seis parámetros nos da el índice final RMR, que varía entre 0 y 100 y se divide en cinco clases de roca, donde el valor 0 nos indica que la roca es de muy mala calidad y el valor 100 nos indica que la roca es de muy buena calidad. Los parámetros para el cálculo del RMR son:

Cuadro 2.2. Clasificación Geomecánica de Bieniawski RMR89.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	<b>RQD</b>		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	<b>Separación entre diaclasas</b>		> 2 m.	0.6 - 2 m.	0.2 - 0.6 m.	0.06 - 0.2 m.	< 0.06 m.		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	<b>Estado de las discontinuidades</b>	Longitud de la discontinuidad	< 1 m.	1 - 3 m.	3 - 10 m.	10 - 20 m.	> 20 m.		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm.	0.1 - 1.0 mm.	1 - 5 mm.	> 5 mm.		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm.	Relleno duro > 5 mm.	Relleno blando < 5 mm.	Relleno blando > 5 mm.		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	<b>Agua freática</b>	Caudal por 100 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min.	10 - 25 litros/min.	25 - 125 litros/min.	> 125 litros/min.		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Fuente: González, 2002.

1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
2. Grado de fracturación en términos del RQD.
3. Espaciado de las discontinuidades.

4. Condiciones de las discontinuidades, que incluye:
  - Longitud de las discontinuidades.
  - Abertura.
  - Rugosidad.
  - Relleno.
  - Alteración.
5. Condiciones hidrogeológicas.
6. Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Cuadro 2.3. Calidad del macizo rocoso en relación al Índice RMR.

Clase	Calidad	Valoración	Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de rozamiento
I	Muy Buena	81 - 100	> 4	> 45°
II	Buena	61 – 80	3 – 4	35° - 45°
III	Media	41 – 60	2 – 3	25° - 35°
IV	Mala	21 – 40	1 – 2	15° - 25°
V	Muy mala	< 20	> 1	> 15°

Fuente: González, 2002.

Expresado por González, 2002; para aplicar la clasificación RMR se divide el macizo rocoso en tramos que presenten características geológicas uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos de los seis parámetros antes mencionados para luego estimar el RMR para cada tramo.

- **ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI)**

Hoek y Brown (1997) introdujeron el Índice de resistencia geológica (GSI), tanto para macizos rocosos duros como débiles. Los ingenieros de campo y los geólogos experimentados utilizan clasificaciones geomecánicas mediante la utilización de la clasificación basa en la inspección visual de las condiciones geológicas. Hoek y Brown (1997) propusieron una clasificación tan práctica para estimar el GSI basándose únicamente en la inspección visual (Figura 2.1).







<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICO GSI</b> <b>JUNTAS DE LA MASA ROCOSA</b> (Modificado por Hoek & Marinos, 2000).  A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, estime el valor promedio de GSI.  No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista de fijar GSI = 35. También notar que esta tabla no se aplica en mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso.  La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultados de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje en rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja en un análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
ESTRUCTURA		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE				
		MUY BUENA Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización.	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada, superficies con óxidos.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimientos compacto o rellenos o fragmentos.	MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimientos de arcilla suave o rellenos.
	Intacta o Masivo: Especimen de roca intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades.	80	70			
	Moderadamente fracturado: Entrelazado macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.		60	50		
	Muy fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad.			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas.				20	
	Follado/Laminado/Cizallado: Falta formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte.					10

Figura 2.1. Hoek-Brown sistema de clasificación de la masa rocosa, 2000. Fuente: Marinos y Hoek (2000).

Cuadro 2.4. Índice Geológico de Resistencia (GSI).

<b>Calidad del macizo</b>	<b>Tipo</b>	<b>GSI</b>
Muy mala	V	0 - 20
Mala	IV	21 - 40
Regular	III	41 - 60
Buena	II	61 - 80
Muy buena	I	81 - 100

Fuente: Hoek, 2002.

## 2.2.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

La minería a cielo abierto exige la realización de excavaciones superficiales, que contendrá: Infraestructuras de servicio, labores de preparación y operaciones de arranque. En este tipo de minería el objetivo primordial de la mecánica de rocas será asegurar la estabilidad de los diversos taludes e infraestructuras de la cantera, corta o descubierta, tanto a nivel general como a nivel local. También en este caso y en función de la geometría del yacimiento, de los requerimientos técnico-económicos, etc (Ramírez y Alejano, 2013). Clasificándolo en los siguiente:

- **Tajo abierto:** Se utiliza en aquellos yacimientos que se encuentran en forma de bolsada y en vetas inclinadas, en zonas cuya topografía es bastante irregular (cerros) (Piña, 2006).
- **Fosa abierta:** Se utiliza también como en el caso anterior, en yacimientos en forma bolsada y en vetas inclinadas, pero en zonas cuya topografía es bastante suave, tipo planicies (Piña, 2006).
- **Explotación en tiras:** Se utiliza en aquellos yacimientos que se encuentran en capas o vetas horizontales, en los cuales, primero se remueve o desmonta el recubrimiento por el método de tiras (niveles o bancos de

explotación). Una vez despejada la capa o veta mineralizada, se comienza su explotación por este mismo método (Piña, 2006).

- **Explotación combinada:** Se utiliza en aquellos yacimientos que se encuentran aflorando en zonas cuya topografía presenta relieves muy pronunciados; cerros casi verticales, donde se hace difícil el ataque al yacimiento por los métodos de Minería de Superficie, utilizando para ello, pozos y galerías (Minería Subterránea) que sirven de acceso al yacimiento y para descarga y transporte del mineral (Piña, 2006).



Figura 2.2. A. Tajo abierto, B. Fosa abierta, C. Explotación en tiras y D. explotación combinada.

Fuente: Piña, 2006.

### 2.2.3 PARÁMETROS DE DISEÑO DE TALUDES

Los tres componentes principales de un diseño de taludes a tajo abierto son los siguientes: Primero, ángulo total del talud del tajo inicia desde la cresta hasta el pie del talud incorporando todas las rampas y bancos a diseñar. Esta puede ser un talud compuesto con unos taludes más planos en materiales superficiales

más débiles y un talud más pronunciado en la roca más competente en profundidad. Además, el ángulo del talud puede variar alrededor del tajo para adaptar tanto la geología diferente como el diseño de la rampa (Wyllie y Mah, 2004).

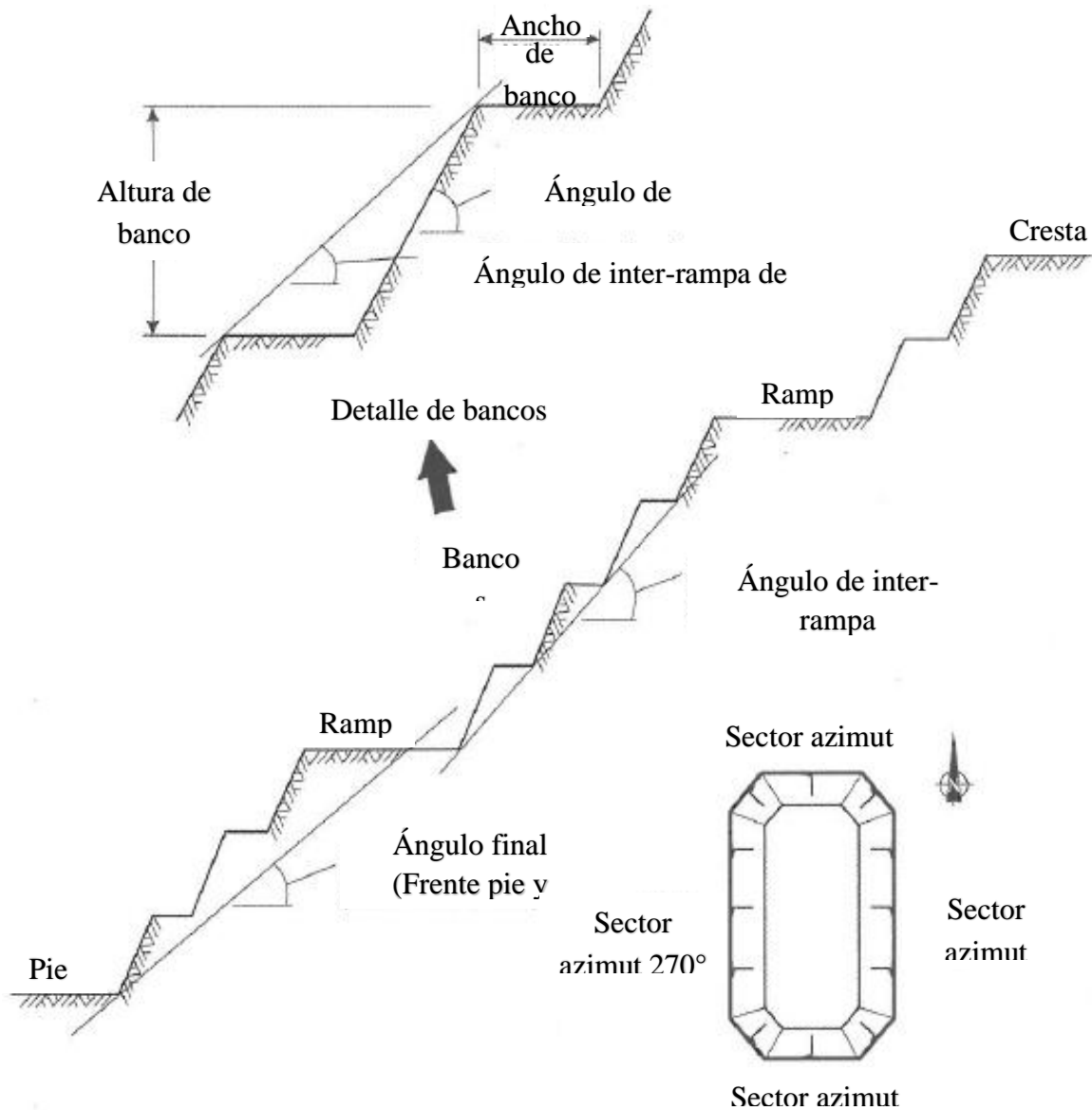


Figura 2.3. Terminología de la cara libre del tajo.  
Fuente: Read y Stacey (2006).

El correcto diseño de una mina a cielo abierto se tiene que haber cubierto en la etapa de investigación geológica, fruto del cual se obtendrá el modelo de yacimiento con todas sus características litológicas y estructurales, que permitan optimizar la geometría del tajo final y establecer la planificación de labores, control

y precisión de la calidad de minerales y la suma de la rentabilidad del negocio. Teniendo en cuenta cuatro grupos de parámetros geométricos, geotécnicos, operativos y medioambientales. Conformando los parámetros geométricos que configuran el diseño de una mina de explotación a cielo abierto, son: altura de banco, ancho de berma, ancho de rampa, quebradura, ángulo de cara de banco, ángulo de interrampa, ángulo global, altura total de tajo (Hustrulid et al., 2013).

### 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Berma:** Plataforma estrecha o área plana que rompe la continuidad de una pendiente (Geotecnia, 2020).

**Criterio de rotura:** Modelo numérico o teórico que limita las regiones de comportamiento elástico y no elástico de un material (Gavilanes y Andrade, 2004).

**Extracción:** Se desmonta el área a trabajar y se lleva a cabo el descapote, posteriormente se barrena aplicando el plan de minado diseñado, se realiza la carga de explosivos y se procede a la voladura primaria, moneo, tumbe y rezagado, carga y acarreo a planta de trituración (MDGD, 2018).

**Estabilidad de talud:** Es la resistencia de cualquier superficie inclinada, como las paredes de una mina a cielo abierto o los cortes de taludes, a fallar. Es la resistencia de una pendiente natural o artificial, o cualquiera otra superficie inclinada a fallar (RC, 2003).

**Límites finales de explotación:** Son aquellas situaciones especiales hasta las que realizan las excavaciones. El límite vertical determina el fondo de la explotación y los límites laterales los taludes finales de la misma (Herrera, 2007).

**Litología:** Ciencia que estudia el origen, evolución y clasificación de las rocas. Se podría considerar como un sinónimo de petrología (Dávila, 2011).

**Macizo Rocoso:** Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los

macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos (González, 2002).

**Material pétreo:** Constituye gran parte del volumen de materiales y minerales extraídos por el sector minero mundial (Asobanca, 2022).

**Método minero:** Proceso iterativo tanto desde el punto de vista temporal como espacial, que permite llevar a cabo la explotación minera de un yacimiento por medio de un conjunto de sistemas procesos y maquinarias que operan de una forma: Ordenada, repetitiva y rutinaria (Herrera y Ortiz, 2006).

**Modelo geomecánico:** Cuantifica diversos parámetros que componen el modelo geológico para que puedan utilizarse en los cálculos propios del modelo matemático (Ramírez, et al., 2008)

**Operaciones mineras:** Conjunto de actividades requeridas para aprovechar un depósito mineral y, en ocasiones, las instalaciones necesarias para procesar el mineral extraído (Herrera, 2006).

**Relieve:** Unidad fisiográfica que corresponde a la vez a un elemento de paisaje y a una asociación de formas elementales: 1. Vega; 2. Llanura de desborde; 3. Terraza; 4. Mesa; 5. Loma; 6. Colina; 7. Cresta; y 8. Viga (Pacheco y Pozzobon, 2011).

**Reserva Minera:** Una reserva se define como la parte del recurso medido o indicado que puede ser económicamente extraída según un escenario planificado basado en consideraciones productivas, ambientales, económicas y financieras derivadas de un plan minero (NACAP, 2022).

**Talud:** Cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería (Batista et al., 2012).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 UBICACIÓN**

##### **3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

Las actividades no metálicas se ubican en las laderas montañosas de las partes altas de Bambamarca, perteneciente a la empresa Calera Bambamarca SAC, políticamente ubicado en el centro poblado Cumbe Chontabamba, distrito Bambamarca, provincia Hualgayoc, al norte de Cajamarca. Siendo emplazada en la concesión MC POLCY N5 con razón social S.M.R.L. MC POLCY N5, conformada por rocas calizas de la Formación Cajamarca, realizando actividades como: Perforación, voladura, desbroce, acarreo, calcinación, descarga, enfriamiento, seleccionamiento, envasado, pesado y comercialización; superponiéndose en el cuadrángulo de Chota (14-f), con coordenadas: UTM – DATUM – WGS 84 – ZONA – 17S.

Cuadro 3.1. Coordenadas de tajo - Calera Bambamarca S.A.C., delimitada por poligonal cerrada.

<b>Vértice</b>	<b>Este (m.)</b>	<b>Norte (m.)</b>
<b>a</b>	769868.59	9261006.36
<b>b</b>	769849.01	9260885.60
<b>c</b>	769975.38	9260879.67
<b>d</b>	769978.88	9260988.13
<b>e</b>	769962.92	9261000.00

### 3.1.2 ACCESIBILIDAD

El acceso a la mina se llevó a cabo mediante transporte terrestre, desde: Cajamarca a Cumbe Chontabamba – Bambamarca (Calera Bambamarca S.A.C), conformado por vías: Pavimentadas, asfaltas y afirmadas, desde condiciones: Malas, regulares y buenas, de acuerdo con la sectorización del recorrido hasta llegar a la zona de estudio, conformando distancia 108 Km. en tiempo 2 h 41 min. Transportando en su recorrido 4 personas de apoyo, para los trabajos a proyectar.

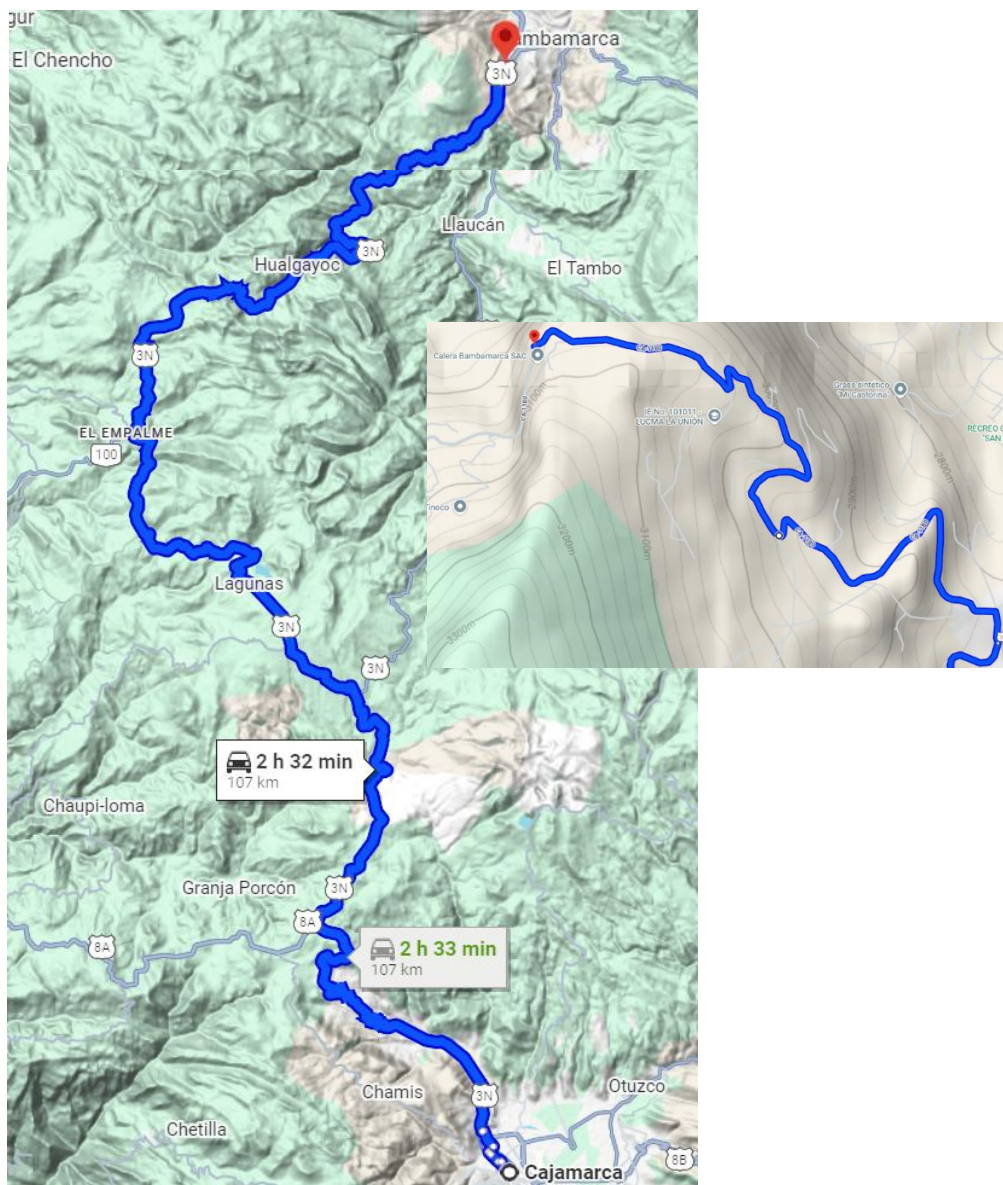


Figura 3.1. Ruta de recorrido desde la ciudad: Cajamarca a Calera Bambamarca S.A.C.

Fuente: Google Mapas, 2025.



Figura 3.2. Ingreso a las instalaciones de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.

Cuadro 3.2. Ruta de accesibilidad desde: Cajamarca a Hualgayoc.

Tramo		Estado de Vía	Vía	Transporte	Recorrido	
De	A				Distancia (Km.)	Tiempo (h.)
Cajamarca	Hualgayoc	Regular a Buena	Terrestre	Combi	87.60	02h 18min
Hualgayoc	Cruce a Moran	Regular a mala	Terrestre	Combi	19.40	00h 18min
Cruce a Moran	Calera Bambamarca	Regular a buena	Terrestre	Combi	1.00	00h 05min
					108.00	02h 41min

### 3.1.3 CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima está conformado por veranos: Cómodos y nublados e inviernos: Cortos, fríos, secos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de -3°C a 20°C y rara vez baja a 2°C o sube a más de 23°C. Siendo las nubosidades más: Despejada inicia el 1 de mayo; dura 4.80

meses terminando el 24 de setiembre y nublada del año comienza el 24 de setiembre; dura 7.30 meses y se termina aproximadamente el 1 de mayo. Presentando precipitaciones de temporada más: Mojada dura 6.90 meses, de 6 de octubre a 2 de mayo, con probabilidad de más del 16 % de que cierto día será un día mojado y seco dura 5.10 meses, del 2 de mayo al 6 de octubre. El mes con menos días mojados en Bambamarca es Julio, con un promedio de 0.40 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación; siendo el más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 32 % el 19 de marzo. Con vientos más: Ventosos > 9.70 Km/h dura 3.80 meses y calmados con velocidad 7.50 Km/h dura 8.20 meses (El Clima y el tiempo promedio en todo el año en BambamarcaPerú, 2025).

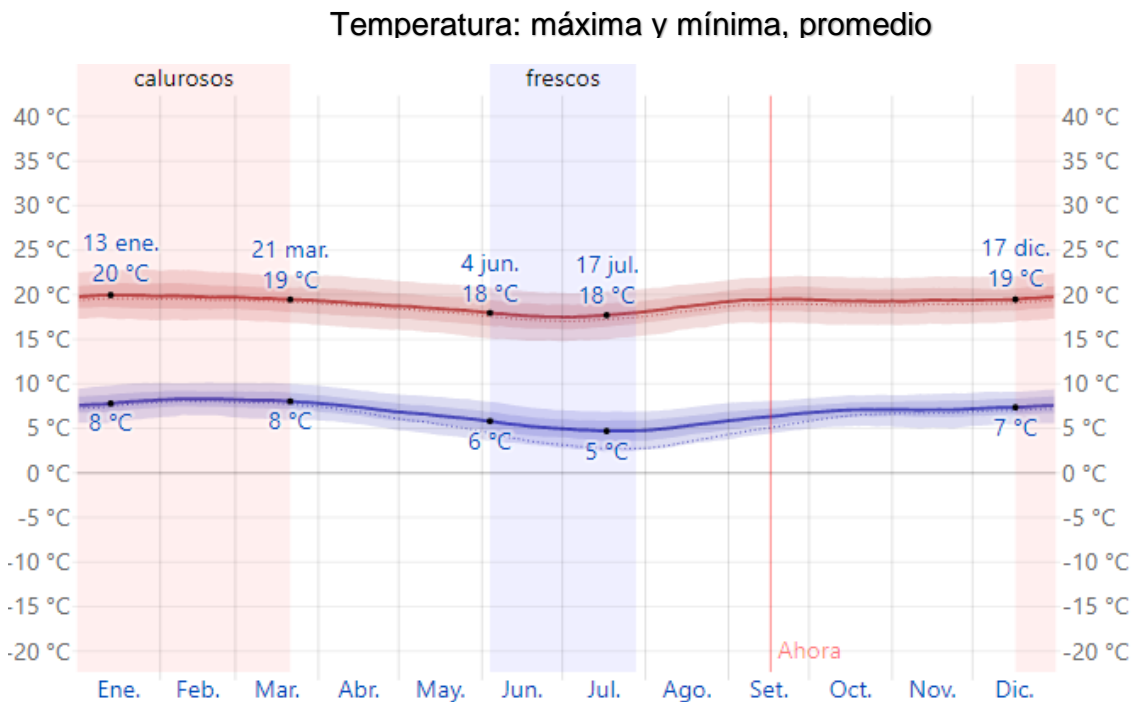


Figura 3.3. Variograma de temperatura: Máxima (línea roja) y mínima (línea azul), con bandas percentiles: 25º a 75º, y 10º a 90º líneas punteadas temperaturas promedio.

Fuente: Weather spark, 2025.

La cobertura de vegetación está emplazada en la zona de vida Bosque húmedo – montano Bajo tropical (bh – MBT), delimitado por altitudes 2,800 msnm.

a 3,400 msnm. con precipitación total anual promedio de varios años de 1,000 a 2,000 mm; la biotemperatura media anual entre 13 y 17°C y la relación de evapotranspiración potencial entre 0.50 y 1.00, caracterizada por su alta biodiversidad. Presentando un clima bastante favorable para la agricultura y ganadería, así como para la producción de maderas y para el abastecimiento humano. Los terrenos de poco declive, se concentra la producción de papa, hortalizas y maíz. Aquí se encuentra la mayor parte de áreas dedicadas a la actividad ganadera para la producción lechera.

Categorías de nubosidad en Bambamarca.

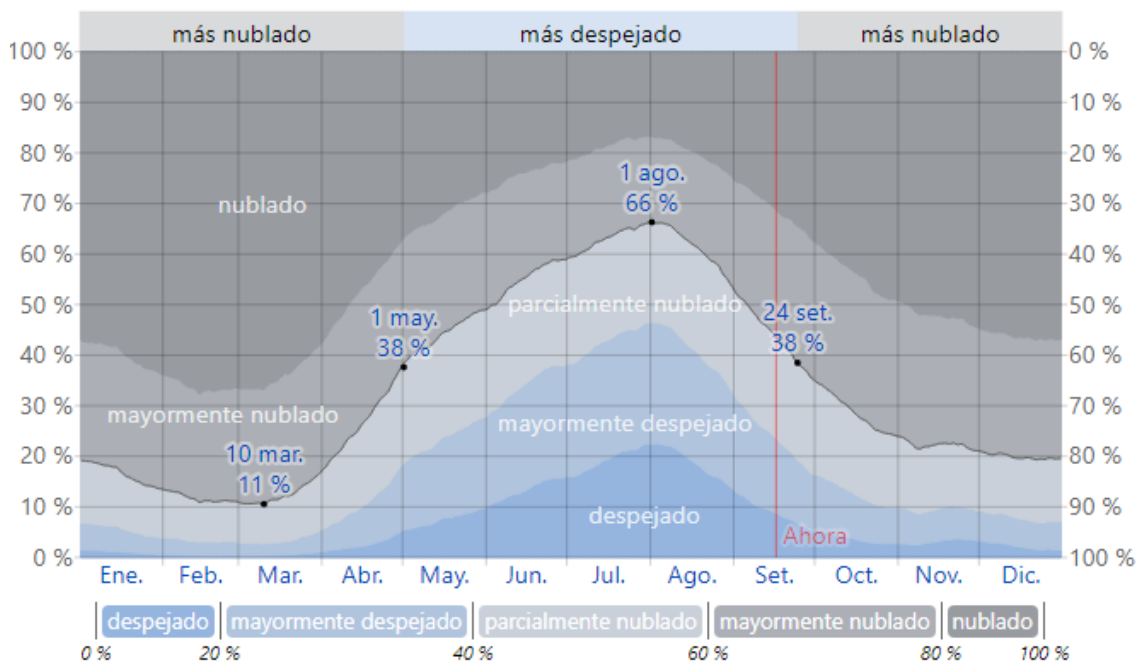


Figura 3.4. Variograma del porcentaje nubosidad de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes.

## 3.2 PROCEDIMIENTOS

### 3.2.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolló mediante una metodología secuencial, sistemática y aplicada, orientada a la caracterización geomecánica del macizo rocoso y a la optimización del método de explotación a cielo abierto en la

cantera de roca caliza de la empresa Calera Bambamarca S.A.C. La metodología comprende seis etapas principales, las cuales se describen a continuación:

- **Reconocimiento de campo:** el reconocimiento de campo constituyó la etapa inicial de la investigación y tuvo como objetivo identificar las condiciones generales del área de estudio. durante esta fase se realizó una inspección visual del frente de explotación, taludes, bancos, accesos y zonas adyacentes, permitiendo reconocer la litología predominante, la presencia de discontinuidades estructurales, evidencias de inestabilidad y condiciones operativas actuales de la cantera. asimismo, se verificó la ubicación espacial de la zona de estudio mediante el uso de coordenadas utm, estableciendo los sectores representativos para el posterior levantamiento geomecánico.
- **Cartografiado geomecánico:** en esta etapa se efectuó el cartografiado geomecánico del macizo rocoso en las estaciones seleccionadas dentro del área de explotación. el levantamiento incluyó la medición y registro de parámetros estructurales tales como orientación (rumbo y buzamiento) de las discontinuidades, espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad, relleno y grado de alteración. las mediciones se realizaron siguiendo criterios establecidos en la literatura geomecánica, garantizando la representatividad de los datos y su aplicabilidad para el análisis posterior de estabilidad de taludes.
- **Clasificaciones geomecánicas:** a partir de la información obtenida en el cartografiado geomecánico, se aplicaron clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso, principalmente los sistemas rmr (rock mass rating) y gsi (geological strength index). estas clasificaciones permitieron evaluar la calidad del macizo rocoso considerando parámetros como resistencia de la roca intacta, r<sub>qd</sub>, espaciamiento de discontinuidades, condiciones de las discontinuidades y presencia de agua. los resultados obtenidos sirvieron como base para definir el tipo y calidad del macizo rocoso y su influencia en el diseño del método de explotación.
- **Determinación de parámetros geomecánicos:** con base en los resultados de las clasificaciones geomecánicas, se procedió a la determinación de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tales como cohesión, ángulo de fricción, resistencia del macizo y constantes del criterio de falla de hoek–

brown. estos parámetros fueron fundamentales para evaluar el comportamiento mecánico del macizo rocoso y constituyeron los insumos técnicos necesarios para el análisis cinemático y la evaluación de estabilidad de los taludes.

- **Análisis cinemático:** el análisis cinemático se realizó con el objetivo de identificar los mecanismos potenciales de falla utilizando el software dips en los taludes de la cantera, tales como falla planar, falla en cuña y vuelco. este análisis se llevó a cabo considerando la orientación de las discontinuidades, la geometría del talud y los parámetros geomecánicos determinados previamente. la evaluación permitió identificar sectores con orientaciones estructurales desfavorables y establecer las condiciones bajo las cuales podrían desarrollarse inestabilidades.
- **Rediseño geométrico y optimización del método de explotación:** finalmente, se realizó la evaluación de la estabilidad de los taludes, integrando los resultados del análisis cinemático y los parámetros geomecánicos obtenidos. con base en esta evaluación, se propuso un rediseño geométrico del método de explotación, considerando altura de banco, ángulo de talud y disposición de bancos, con el fin de mejorar las condiciones de estabilidad y seguridad en la operación minera. esta etapa permitió establecer criterios técnicos para la optimización del método de explotación a cielo abierto, asegurando un adecuado equilibrio entre estabilidad geomecánica y eficiencia operativa.

### 3.2.1.1 TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Cuadro 3.3. Tipo, nivel, diseño y método de investigación.

<b>Criterio metodológico</b>	<b>Tipo / Nivel / Diseño</b>	<b>Descripción aplicada a la investigación</b>
<b>Tipo de investigación</b>	No experimental	La investigación se desarrolló sin manipulación de variables, basada en la observación directa <i>in situ</i> del tajo de roca caliza de la empresa Calera Bambamarca S.A.C. Se recopiló información cualitativa y cuantitativa del macizo rocoso y de las condiciones de explotación, siguiendo protocolos ingenieriles, con el objetivo de optimizar el método de explotación a cielo abierto.
<b>Nivel de investigación</b>	Descriptivo	Permitió caracterizar detalladamente las condiciones geológicas, estructurales y geomecánicas del tajo de explotación, considerando orientación de discontinuidades, parámetros geométricos del talud, condiciones operativas y volumen de producción, constituyendo la base para las etapas posteriores de análisis e interpretación.
<b>Nivel de investigación</b>	Correlacional	Se estableció la relación entre las variables geomecánicas del macizo rocoso (calidad de roca, discontinuidades) y los parámetros geométricos del tajo de explotación, sin manipulación directa de variables, con la finalidad de evaluar su influencia en la optimización del método de explotación.
<b>Nivel de investigación</b>	Explicativo	Se empleó para analizar las relaciones de causa–efecto entre la calidad geomecánica del macizo rocoso y el comportamiento de los taludes, permitiendo explicar cómo los criterios geomecánicos influyen en el diseño geométrico y la estabilidad del método de explotación.
<b>Enfoque lógico</b>	Deductivo	El análisis se desarrolló a partir del objetivo general de optimizar el método de explotación mediante la caracterización geomecánica, desagregándose en objetivos específicos que permitieron contrastar la hipótesis con fundamentos geológicos y geomecánicos.
<b>Enfoque lógico</b>	Inductivo	Se partió de observaciones y mediciones específicas de campo, como registros de producción, cartografiado geomecánico y diagnóstico del macizo rocoso, para establecer conclusiones generales aplicables al método de explotación de la cantera.

### **3.2.1.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO**

La población está constituida por el área de la cantera de explotación de 6,928 m<sup>2</sup> perteneciente a la Calera Bambamarca S.A.C., ubicada en la parte superior de la ladera donde se desarrollan las actividades de perforación, voladura, selección gravitatoria, cuarteo y acopio de la roca caliza destinada al abastecimiento de la planta de beneficio

### **3.2.1.3 MUESTRA**

La muestra se definió mediante el cartografiado panorámico de la cantera, aplicando el criterio de 4 estaciones geomecánicas por hectárea, correspondiendo 4 estaciones para el área estudiada. Las estaciones se distribuyeron de manera estratégica en todo el frente de explotación para obtener parámetros representativos del macizo rocoso, tales como calidad de roca, orientación de discontinuidades y características geométricas del talud.

### **3.2.1.4 UNIDAD DE ANÁLISIS**

La unidad de análisis está conformada por la cantera de explotación, evaluado a partir de las variables: litología, geoestructuras, caracterización geomecánica (RQD, RMR, GSI), orientación de discontinuidades y parámetros geométricos del talud, con el propósito de optimizar el método de explotación a cielo abierto.

### 3.2.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Cuadro 3.4. Identificación de variables.

Tipo de variable	Variable	Definición conceptual	Dimensiones / Componentes	Indicadores principales
<b>Dependiente</b>	Rediseño geométrico de la cantera	Proceso de modificación y optimización de la geometría del tajo de explotación a cielo abierto, basado en criterios geomecánicos y estructurales, con la finalidad de mejorar la estabilidad del talud y la eficiencia operativa.	Geometría del tajo	Altura de banco (hb), ángulo de talud ( $\Psi T$ ), ángulo global ( $\alpha$ ), ancho de berma (b), ancho de rampa (br), quebradura (Q), altura de interrampa (hr).
<b>Independiente</b>	Geoestructuras	Conjunto de discontinuidades presentes en el macizo rocoso que condicionan su comportamiento mecánico y la estabilidad del talud.	Características estructurales	Orientación (rumbo y buzamiento), persistencia, espaciamiento, apertura, rugosidad, tipo de relleno, número de familias de discontinuidades.
<b>Independiente</b>	Geomecánica	Disciplina que evalúa el comportamiento mecánico del macizo rocoso a partir de clasificaciones empíricas y parámetros resistentes.	Calidad del macizo rocoso	RQD (%), RMR, GSI, resistencia a compresión simple ( $\sigma_{ci}$ ), cohesión (c), ángulo de fricción ( $\phi$ ), resistencia global del macizo ( $\sigma_{cm}$ ).
<b>Independiente</b>	Macizo rocoso	Medio geológico conformado por la roca intacta y el sistema de discontinuidades que determinan la estabilidad del talud en la cantera.	Características del macizo	Tipo de roca, grado de fracturamiento, calidad del macizo, comportamiento estructural, mecanismos potenciales de falla (planar, cuña y vuelco).

### 3.2.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon las siguientes técnicas de recolección de datos:

- **Revisión documental especializada:** permitió recopilar información teórica y antecedentes técnicos relacionados con geología estructural, geomecánica de macizos rocosos, estabilidad de taludes y criterios de diseño minero.
- **Observación directa sistemática en campo:** aplicada para identificar características litológicas, estructurales y geométricas del macizo rocoso y del frente de explotación.
- **Medición estructural directa:** utilizada para determinar orientación (rumbo y buzamiento), espaciamiento, persistencia, apertura, relleno y condición superficial de discontinuidades.
- **Aplicación de clasificaciones geomecánicas:** mediante evaluación sistemática de parámetros requeridos por los sistemas RMR y GSI para caracterizar la calidad del macizo rocoso.
- **Análisis cinemático estructural:** técnica empleada para identificar mecanismos potenciales de falla planar, por cuña y por vuelco, en función de la relación geométrica entre discontinuidades y talud.

### 3.2.4 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la obtención y análisis de la información se emplearon los siguientes instrumentos:

- Brújula geológica tipo Brunton, para medición de rumbo y buzamiento (Az/Bz).
- GPS portátil, para georreferenciación de estaciones geomecánicas.
- Cinta métrica y distanciómetro láser, para medición de persistencia, aperturas y geometría de bancos.
- Martillo geológico, para reconocimiento litológico.
- Fichas estructuradas de registro geomecánico, para clasificación RMR y estimación de GSI.
- Cámara fotográfica digital, para registro visual técnico.
- Software RocData, para aplicación del criterio Hoek–Brown y obtención de parámetros equivalentes de Mohr–Coulomb ( $c$  y  $\phi$ ).
- Microsoft Excel, para procesamiento estadístico y elaboración de tablas comparativas.
- AutoCAD, para modelamiento geométrico del talud original y propuesta de rediseño.

### 3.2.5 ETAPAS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

- **Etapas de recopilación de información secundaria:** Durante esta etapa se realizó una revisión documental especializada mediante la consulta de libros técnicos de geomecánica, artículos científicos indexados, tesis previas, informes técnicos y cartografía digital (Google Earth y planos topográficos). Esta información permitió definir los criterios de clasificación geomecánica (RMR, GSI y Hoek–Brown), establecer los parámetros iniciales de análisis y estructurar el marco conceptual del estudio.

- **Etapa de planificación del trabajo de campo:** Se emplearon imágenes satelitales, cartografía base digital y software de modelamiento para delimitar el área de estudio y ubicar estratégicamente las estaciones geomecánicas (EG-01, EG-02, EG-03 y EG-04). Esta etapa permitió organizar el cronograma de trabajo y optimizar la distribución espacial de los puntos de medición, garantizando representatividad estructural.
- **Etapa de reconocimiento y levantamiento geológico–geomecánico:** En esta fase se realizó la observación directa y medición estructural del macizo rocoso, registrando orientación (rumbo y buzamiento), espaciamiento, persistencia, apertura, relleno y condiciones superficiales de las discontinuidades, así como la geometría del talud existente.
- **Etapa de procesamiento y análisis geomecánico:** Los datos obtenidos en campo fueron procesados para la aplicación de clasificaciones geomecánicas (RMR y GSI), determinación de parámetros resistentes equivalentes mediante el criterio Hoek–Brown y su conversión a Mohr–Coulomb, así como el análisis cinemático estructural para identificar mecanismos potenciales de falla planar, por cuña y por vuelco.
- **Etapa de evaluación y propuesta de rediseño geométrico optimizado:** Con base en los parámetros geomecánicos obtenidos y el análisis cinemático desarrollado, se definieron los parámetros geométricos óptimos del método de explotación (altura de banco, ángulo individual, ángulo global, interrampa y berma), integrando criterios de estabilidad estructural y eficiencia operativa.
- **Etapa de redacción y validación técnica:** Finalmente, se elaboró el informe técnico bajo normativa institucional, integrando los resultados geológicos, geomecánicos y de optimización del método de explotación en coherencia con los objetivos planteados.

### 3.2.6 EQUIPOS. MATERIALES Y SOPORTE TECNICO

De acuerdo con lo desarrollado en los capítulos anteriores este acápite muestra la importancia la utilización de equipos, materiales y soporte técnico, siendo de vital importancia para complementar el desarrollo de la tesis, siendo cada uno de ellos de utilización progresiva, por ejemplo, está conformado por lo siguiente:

- **Equipos:** Está conformado por equipos eléctricos y mecánicos, utilizados para los cartografiados, siendo indispensables para obtener información de campo, compuesto por GPS, cámara fotográfica, brújula, rayador, wincha, lupa, flexómetro y picota.
- **Materiales:** Están compuesto generalmente por materiales de escritorio, siendo transportados a campo para poder realizar: Apuntes, descripción, codificaciones, dibujos y trazos, conformado por: Colores, plumones, lápices, borrador, corrector, tajador, regla, lapiceros, ácido clorhídrico, bolsas de muestras, marcador indeleble y portapapeles.
- **Soporte técnico:** Se utilizó en todo el proceso de la elaboración de tesis cumpliendo con el reglamento de grados y títulos, y en la configuración de cada programa numérico o matemático, utilizando: Word, Excel, NitroPro, Adobe AcrobatDC, SASPlanet, Google Earth Pro, Google Maps, Global Mapper, ArcGis y AutoCAD.

### **3.3 GEOLOGÍA**

#### **3.3.1 GEOMORFOLOGÍA**

La geomorfología está constituida por rocas carbonatas del Cretáceo Superior de la Formación Cajamarca, expuestas a la disolución por estar en contacto con las aguas ácidas formando en la superficie de la roca lenares o lápices, en forma de surcos punteagudos alineados, así mismo formó cavernas subterráneas evidenciándose en el tajo, por extracción de roca caliza, conformado estructuras como: Estalactitas y estalagmitas por la recristalización de minerales de aragonito como también calcita de color blanquecino. Por consiguiente hace millones de años en las partes altas de Hualgayoc estuvo cubierto por glaciares siendo la geomorfología regional de mayor amplitud dejada por el desplazamiento de los casquetes de hielo, formando en su curso remoción de sustrato rocoso y zonas de sedimentación en las partes bajas o laterales, manifestándose en el alineamiento de drenajes del río: Tingo y De La Quebrada por las depresiones semicirculares o cóncavas con paredes verticales y fondo sobre excavado, con modelamiento y amplitud del valle en forma de U presenta ancho: 1,000 m. a 1,450 m. y fondo vertical 60 m. a 80 m., con vista: Norte y Noroeste, se identificándose como un valle glaciar con dirección SW a NE, hacia la ciudad de Bambamarca; formado en su transcurso morenas compuestas por materiales gravosos limosos de matriz angulosa.



Figura 3.5. Estalagmitas de longitud 0.30 m. formada por disolución de la roca carbonatada formada en una oquedad del macizo rocoso.

Por consiguiente las instalaciones mineras están emplazadas en unidades geomorfológicas como: Planicies, lomadas, laderas y escarpas, presentando variación morfotopométricas desde pendientes desde:  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ , ubicándose el tajo en roca caliza delimitada por: Ladera y escarpa, siendo el principal abastecedor de materia prima conformado por banco de caliza de espesor: 0.20 m. a 0.35 m. y altura de talud: 0.15 m. a 0.30 m. en forma de farallones verticales con buzamiento en contra del talud, lográndose visualizar coberturas de depósitos cuaternarios de color castaño que cubren a la roca con espesor 0.35 m. a 0.80 m. en sectores de la zona de estudio. Así mismo las otras instalaciones como: Hornos, área de seleccionamiento gravitatorio, desmontera, S.S.H.H., zarandeo molino, silo de cal, zona de parqueo, área de carguío, almacén de herramientas, almacén de sustancias toxicas, vestidor, comedor, oficina y área de descanso; se encuentran emplazadas en: Planicies y lomadas variando desde:  $0^{\circ}$  a  $25^{\circ}$ , conformada por Depósitos Deluviales de materiales limo gravosos de color castaño, formando

terrazas de acumulación gravitatoria por las partes superiores desplazada a las inferiores.



Figura 3.6. Estructuras de aragonito en forma de pilares verticales, dentro de una cavidad de longitud 0.25 m. y altura 0.10 m.

### 3.3.2 GEOLOGÍA LOCAL

El área donde se desarrolla la cantera de la empresa Calera Bambamarca S.A.C. se caracteriza por la presencia predominante de rocas sedimentarias carbonatadas, principalmente calizas de color gris a gris claro, de textura compacta y dureza media a alta, las cuales constituyen el principal material de explotación. Estas rocas se presentan en estratos de potencia variable, con buzamientos moderados a elevados, típicos de ambientes geológicos sometidos a deformación tectónica (González de Vallejo et al., 2002; Hoek & Brown, 1997).

Desde el punto de vista estructural, el macizo rocoso se encuentra afectado por un sistema de discontinuidades bien desarrollado, conformado por diaclasas, planos de estratificación y fracturas secundarias, las cuales controlan de manera directa el comportamiento mecánico del talud. Durante el mapeo geomecánico se identificaron familias de discontinuidades con buzamientos subverticales y otras con inclinaciones moderadas, algunas de las cuales presentan orientación desfavorable con respecto a la cara libre del talud, generando bloques potencialmente inestables.

En ciertos sectores de la cantera se observa la presencia de discontinuidades con buzamiento casi vertical en el mismo sentido de la cara del talud, condición que favorece el desarrollo de mecanismos de ruptura por vuelco, incluso en zonas donde la roca intacta presenta buena calidad geomecánica. Este comportamiento confirma que la inestabilidad no depende exclusivamente de la resistencia del material, sino fundamentalmente de la geometría de las discontinuidades y de su relación con la geometría del talud (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004).

Asimismo, se evidencian zonas con diferente grado de alteración superficial, especialmente en las paredes de las discontinuidades, donde la acción del agua, la meteorización y los procesos físico-químicos han reducido localmente la resistencia al corte. Estas condiciones incrementan la susceptibilidad a fallas estructurales, principalmente en presencia de voladura y durante la temporada de lluvias.

Desde el punto de vista geomecánico, el macizo rocoso varía de calidad buena a regular, dependiendo del grado de fracturamiento, espaciamiento y persistencia de las discontinuidades. Esta variabilidad justifica la necesidad de una caracterización geomecánica integral, ya que el comportamiento del talud no es homogéneo en toda el área de explotación, lo cual resulta determinante para el rediseño, objetivo central de la presente investigación.

**Formación Cajamarca:** Se caracteriza por presentar estratos uniformes y regulares, de coloraciones que varían entre gris y blanquecino, desarrollándose principalmente en orientación N-S. Litológicamente está conformada por calizas

tipo mudstone de tonalidad azulada, con espesores que oscilan aproximadamente entre 300 m y 500 m, observándose en superficie una escasa cobertura vegetal. Asimismo, presenta una estratificación homogénea con espesores individuales de estrato entre 0.25 m y 1.00 m, formando en algunos sectores farallones controlados por procesos de geomorfología kárstica. La presencia de fósiles como equinoideos, gasterópodos, lamelibranquios, amonites y foraminíferos indica un ambiente marino somero durante su sedimentación (Benavides, 1956; INGEMMET, 2017).

**Formación Celendín:** Está constituida por capas delgadas de calizas nodulares arcillosas, intercaladas con margas y lutitas. Las lutitas y margas presentan tonalidades grises a gris azuladas, mientras que las calizas exhiben colores crema oscuro a marrón, predominando estas últimas. El espesor de esta formación es variable debido a procesos erosivos, alcanzando valores máximos entre 300 m y 400 m. Desde el punto de vista paleontológico, contiene una fauna fósil variada compuesta por amonites, lamelibranquios, gasterópodos y equinoideos, lo que confirma su origen marino (Wilson, 1984; INGEMMET, 2017).

### **3.3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

Las geoestructuras principales tienen orientación NE-SW relacionando con el plegamiento regional de estructuras: Sinclinales y anticlinales asimétricos afectando a los estratos del Cretáceo Superior y fallas regionales cortando transversalmente a la secuencia de plegamiento. Sin embargo, las operaciones mineras se ubican en el flanco izquierdo del sinclinal Moran de orientación SSW-NNE con orientación de estratos (Az/Bz): N283°/41°NE.



Figura 3.7. Falla normal sinistral de apertura 0.20 m. a 0.40 m., con Az/Bz = N224°/74°NW, ubicada al sur del tajo.

Por consiguiente, los indicadores cinemáticos muestran que el 75% están dominadas por fallas normales de orientación Az/Bz N165° a N224°/68°SW a 74°NW con planos de recristalización de: Calcita y aragonito mediante aperturas de separación: 0.10 m. a 0.40 m. categorizándolo como estructuras principales; en cambio las fallas inversas conforman el 25% con Az/Bz N51° a N74°/ 63°SE a 76°SE definidas como estructuras secundarias por corta de forma oblicua al fallamiento principal. Así mismo la formación de los escalones en cada plano de falla definieron la energía aplicada en el proceso de ruptura y deslizamiento, siendo congruentes con el movimiento cinemático en la roca caliza. Al mismo tiempo presenta tres juntas (Az/Bz) del basamento rocoso como: N328°/23°NE, N230°/76°NW y N150°/64°SW, conformando la blocosidad del basamento rocoso.

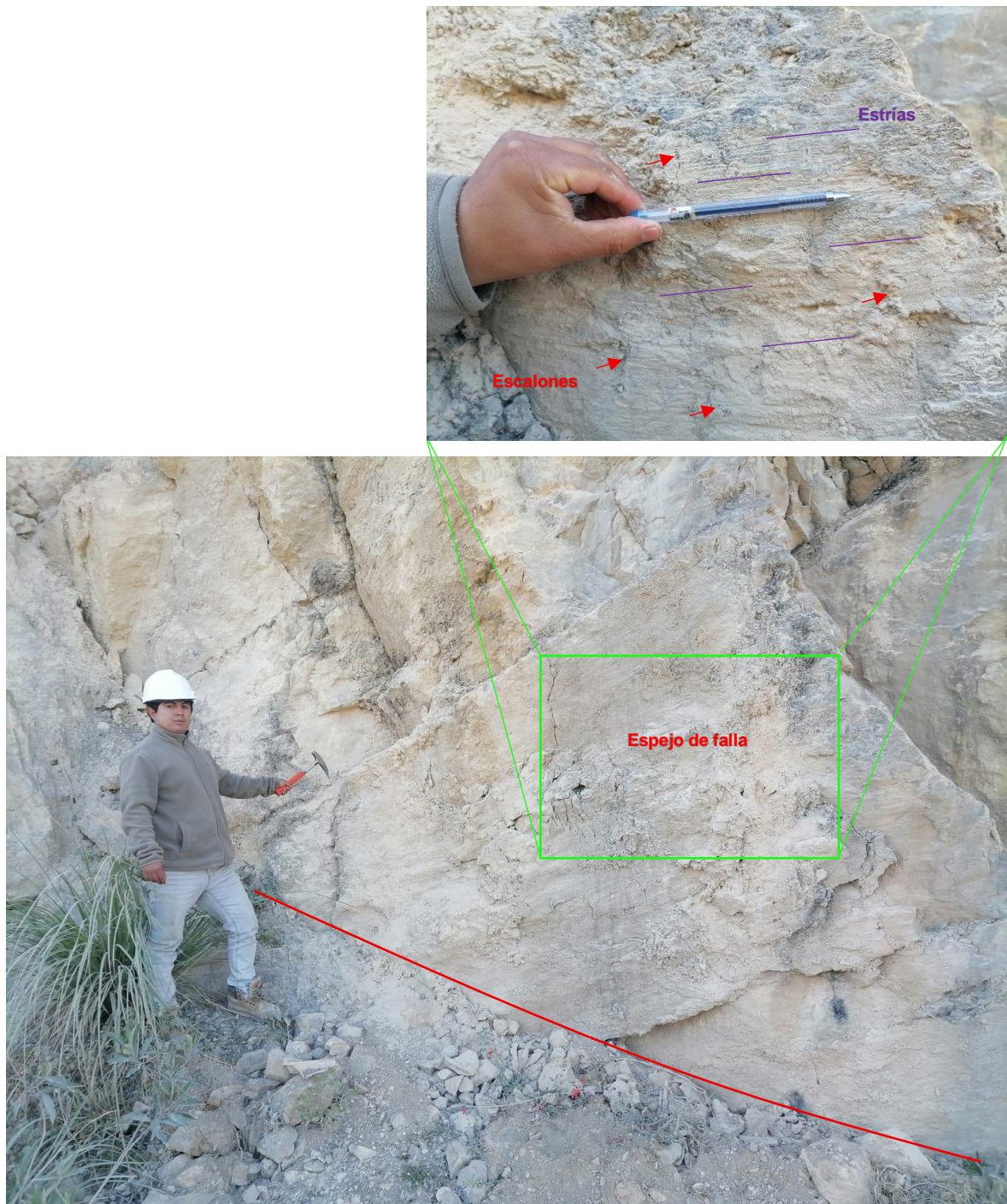


Figura 3.8. Falla inversa dextral con estrías: 1 mm. a 2.5 mm. y acanaladuras 0.10 m. a 0.15 m.; con orientación del plano de falla Az/Bz = N51°/76°SE.

### 3.3.4 CÁLCULO DE RESERVAS Y OPERACIONAL

Los cartografiados de campo muestra amplitud del basamento rocoso calcáreo constituyendo el área de explotación de 6,928 m<sup>2</sup>. desde la latitud: 3,090 msnm. a 3,114 msnm. con peso específico de roca 2.65 TM/m<sup>3</sup>, mostrando cálculo

de reservas 440,620.80 TM. de roca caliza en estado sólido, por la categoría de roca dura tiene factor esponjamiento 1.80, conformando en estado suelto o escombros 793,117.44 TM. mediante producción diaria 135 TM/día. Así mismo el material de recubrimiento cuaternario afecta las operaciones presentado espesor promedio 0.50 m. con peso específico 1.35 TM/m<sup>3</sup>, conformando volumen de 4,676.40 TM de movimiento de tierra con factor de esponjamiento 1.18, siendo un volumen total de movimiento de tierras 5,518.15 TM, sabiendo además el volquete tiene capacidad 20.25 TM equivalente 15 m<sup>3</sup> siendo necesario para retirar todo el desmonte 272.50 volquetes, acotando que la limpieza de la parte superior posterior de la cresta de la ladera o tajo es progresivo conforme van avanzando en campo la producción de roca caliza. Detallándose continuación las reservas de producción de roca caliza, sabiendo que se labora 26 días/mes:



Figura 3.9. Cantera de la calera Bambamarca S.A.C., constituido por estratos de caliza de la Formación Cajamarca, con patinas de óxidos en la superficie de la roca.

### **Roca caliza – planta de procesamiento de cal**

Reservas roca sólida	: 440,620.80 TM
Reservas escombros	: 793,117.44 TM.
Residuos de roca (3%)	: 23,793.52 TM
Reserva final	: 769,323.92 TM
Producción anual	: 42,120 TM/año
Producción mensual	: 3,510 TM/mes
Producción diaria	: 135 TM/día
Vida útil	: 18.27 años

### **Desmonte – desmontera**

Residuos de roca (3%)	: 23,793.52 TM
Depósito residual	: 5,518.15 TM
Total desmontes	: 29,311.67 TM

### **3.3.5 PERFORACIÓN Y VOLADURA**

Las perforaciones en las operaciones mineras constituyen la base principal para la generación de escombros de roca teniendo como base dos caras libres en el tajo, utilizando taladros 15 pies (4.50 m.) con proyección de banco de superficie a detonar 4.00 m. x 4.00 m.; generando un volumen de escombros de rocas 343.44 TM. utilizando 12 taladros conformando: 8 producción y 4 precorte; detallando los parámetros por cada taladro de 0.50 m. sobreperforación, carga de columna 3.20 m. y taco 0.80 m. proporcionando retener la cantidad de energía para tener la

fragmentación óptima. Siendo el burden y espaciamiento 1.00 m. La geomecánica muestra que la roca de calidad: Regular a buena, con resistencia promedio 135 MPa, utilizando para la voladura insumos como: 01 Detonador, 100 gr. ANFO, 1/2 dinamita, echa 1.50 m. lenta y mecha de seguridad 1.50 m. Por consiguiente, se forma la pila de escombros a favor del talud con dimensiones desde: 7 pulg. a 10 pulg.; ayunando al mejor avance de producción.



Figura 3.10. Visualización de las aureolas radiales desde: 0.50 m. a 0.65 m. por la detonación de explosivos, para la fragmentación de la roca caliza.

### 3.3.6 CAPACIDAD DE MAQUINARIA

Las operaciones de explotación en la cantera se realizan con apoyo de maquinaria básica destinada principalmente a las labores de excavación, carguío, transporte y perforación. Entre los equipos utilizados se cuenta con excavadoras, volquetes, una perforadora tipo jackleg y un grupo electrógeno, los cuales permiten

asegurar la continuidad de las actividades productivas y el abastecimiento de materia prima hacia los hornos de calcinación.

La excavadora cumple funciones de limpieza del material superficial, conformación de bancos, carguío de roca fragmentada y apoyo en la selección del material útil. Los volquetes se emplean para el transporte de la roca caliza desde el frente de explotación hasta la zona de procesamiento, así como para la evacuación del material estéril. Por su parte, la perforadora jackleg es utilizada en la ejecución de taladros para voladura, permitiendo la fragmentación del macizo rocoso en el tajo. Finalmente, el grupo electrógeno proporciona energía eléctrica a las instalaciones necesarias para el funcionamiento de las operaciones.

### **3.4 CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO**

La geología de la cantera está compuesta por la Formación Cajamarca y Depósito Deluvial. Por consiguiente, la Formación Cajamarca constituyendo grandes farallones de roca caliza está competente del Cretáceo Superior de la edad Turoniana con pureza: 89% a 93%, siendo una roca de buena calidad fisicoquímica en carbonato de calcio, conformando bancos de caliza de grosor: 0.20 m. a 0.40 m. de color gris azulado con patinas de oxidaciones de color: Rojizo, anaranjado y crema por la meteorización física y química de la roca; así mismo presenta venillas de calcita de color blanquecino de apertura: 2 mm. a 5 mm. constituyendo el relleno en el macizo rocoso. Por lo contrario, los estratos presentan orientación Az/Bz: N283°/41°NE, horizontal a subhorizontal en contra de la cara libre del tajo trabando a la roca calcárea; clasificándolo como roca caliza: Mudstone (Folk, 1962) y micrita ortoquímica (Dunhan, 1962). Así mismo cuando se fractura la roca caliza presenta fracturamiento concoidal de rugosidad; ondulada a lisa de textura: Media a fina; con parámetros de  $\sigma_{ci} = 150 \text{ MPa. a } 182 \text{ MPa.}$ , formando blocosidades: Tabulares a cúbicos, de calidad: Regular a buena.

Por lo contrario, el macizo rocoso se encuentra cubierto por el Depósito Deluvial perteneciente al holoceno cubriendo a la roca caliza con espesores de: 0.30 m. a 0.80 m. de acuerdo con la morfotopometría de la superficie, constituido por materiales arcillo limo gravoso de composición fina presentado superficies

suaves a moderadas por agentes formadores como: Erosión de suelos, gravedad, lluvias y vientos



Figura 3.11. Estratos subhorizontales de roca de la Formación Cajamarca, cubiertos por Depósitos Deluviales de espesor 1.50 m.



Figura 3.12. Depósito Deluvial, constituido por materiales arcillo limo gravoso ubicado en el ingreso de las instalaciones mineras, cubriendo a los estratos de roca caliza.

### 3.5 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL ROCOSO

La caracterización geomecánica por línea de detalle estuvo basado en los modelos: Geológico, geomecánico y matemático, para obtener información: Cualitativa y cuantitativa, de la calidad de roca mediante conocimientos y teorías de la ingeniería de rocas basados en la roca caliza de la Formación Cajamarca en cuanto a su amplitud y extensional para el abastecimiento a la planta de beneficio. Por consiguiente, el tajo está definido por el medio discontinuo en contra de la cara libre del talud con espesor de juntas 0.15 m. a 0.55 m., apertura 1 mm. a 7 mm., persistencia < 1 m. a > 15 m., rugosidad de plano Ondulada – lisa a suave, relleno arcilloso, calcita y óxidos; y condiciones de agua seca; obtenido parámetros por criterios empíricos geomecánicos desde:  $RQD_{Deere64}$  (58.20% a 91.12%),  $RMR_{Bieniawski89}$  (53 a 87) y  $GSI_{Marinos\ y\ Hoek20}$  (48 a 83), siendo rocas de calidad: Regular a buena, delimitado por tres discontinuidades (D/DD):  $23^{\circ}/58^{\circ}$ ,  $76^{\circ}/320^{\circ}$  y  $55^{\circ}/238^{\circ}$ , con orientación de talud D/DD =  $73^{\circ}$  a  $80^{\circ}/ 295^{\circ}$  a  $307^{\circ}$ , conformando el basamento rocoso por superficie fresca y grado de fracturamiento bajo.



Figura 3.13. Estación geomecánica EG-01 compuesto de roca caliza de calidad regular, con  $\sigma_{ci} = 150$  MPa., ubicado en la segunda banqueta del flanco izquierdo del tajo producción.



Figura 3.14. Estación geomecánica EG-02 compuesto de roca caliza de calidad buena, con  $\sigma_{ci} = 175$  MPa., ubicado en la segunda banqueta del centro del tajo producción.

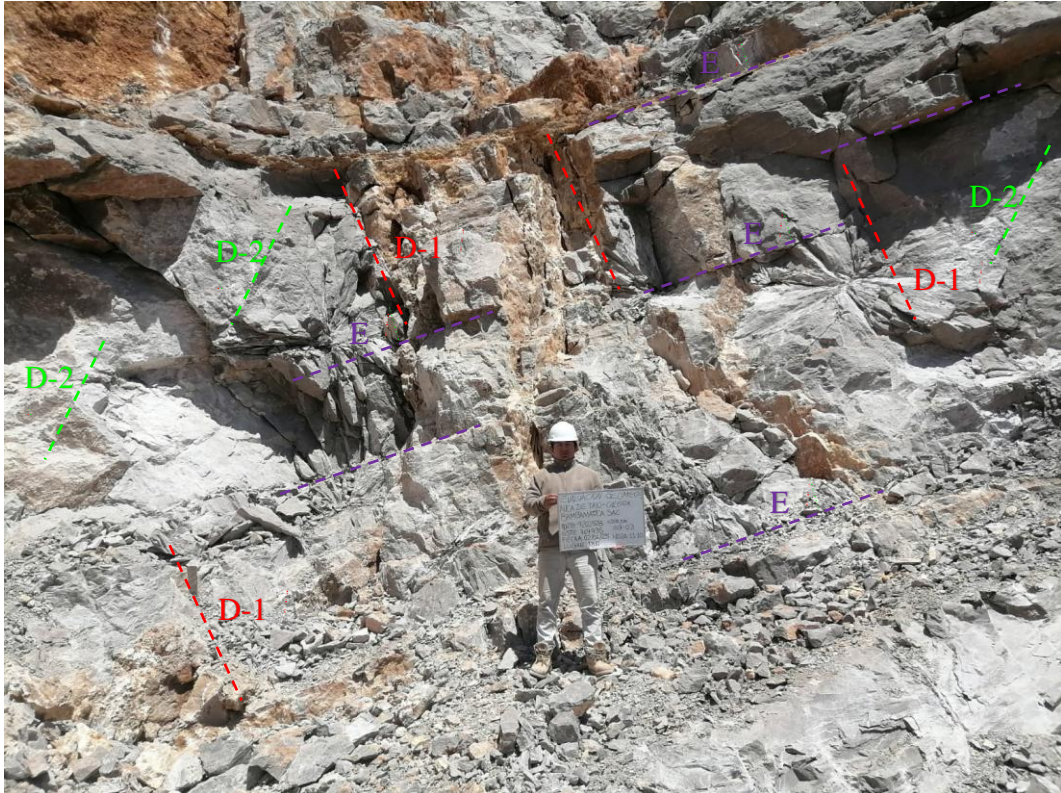


Figura 3.15. Estación geomecánica EG-03 compuesto de roca caliza de calidad buena, con  $\sigma_{ci} = 167$  MPa., ubicado en la segunda banqueta del flanco derecho del tajo producción.

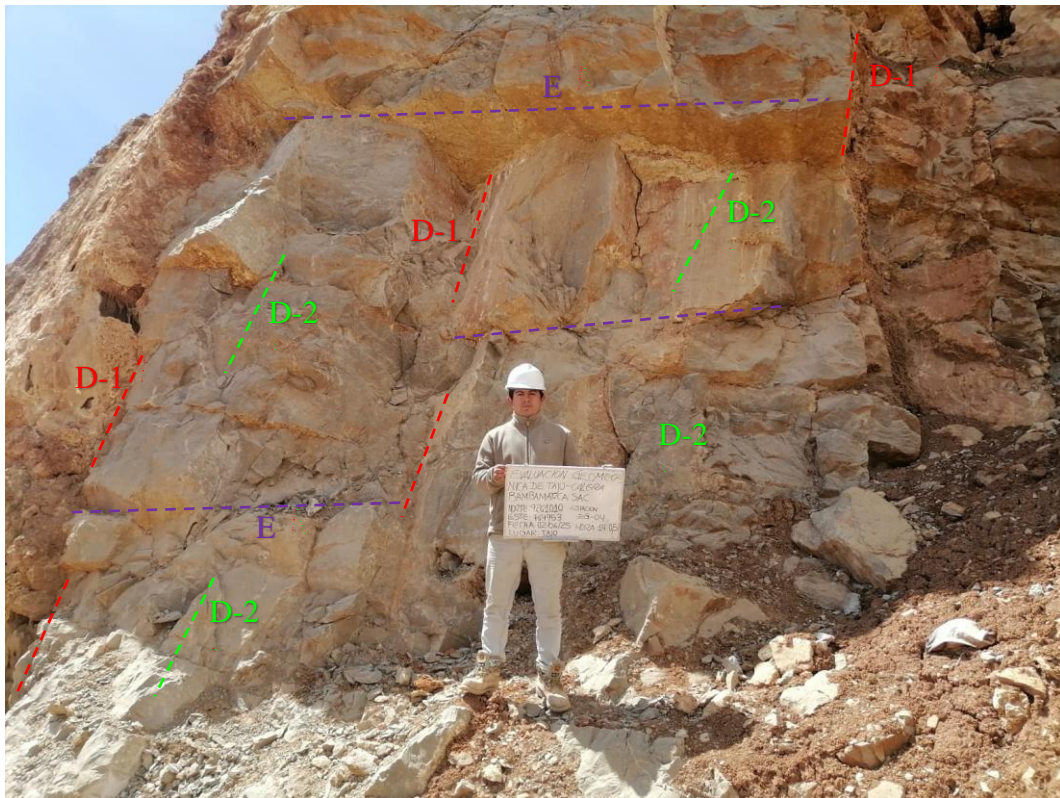


Figura 3.16. Estación geomecánica EG-04 compuesto de roca caliza de calidad buena, con  $\sigma_{ci} = 182$  MPa., ubicado en la primera banqueta del flanco izquierdo del tajo producción.

Cuadro 3.5. Reporte geomecánico de la calidad de roca del tajo del área de producción, Calera Bambamarca S.A.C.

Criterios empíricos			EG-01	EG-02	EG-03	EG-04
$\sigma_{ci}$ (MPa)			150	175	167	182
RQD (%)	Puntaje	Cuantitativo	58.20	84.21	78.81	92.12
		Cualitativo	Regular	Buena	Buena	Excelente
RMR	Puntaje	Cuantitativo	53	76	69	87
		Cualitativo	Media	Buena	Buena	Muy buena
GSI	Puntaje	Cuantitativo	48	71	64	83
		Cualitativo	Regular	Buena	Buena	Muy buena

Con la información obtenida en campo durante el registro geomecánico del tajo, se empleó el programa RocData utilizando el criterio generalizado de Hoek–Brown, adecuado para macizos rocosos anisotrópicos y moderadamente fracturados. La resistencia a compresión simple de la roca intacta se estimó entre 150 y 182 MPa, valores que corresponden a una caliza de categoría R5 (3 a 4 golpes con picota), con un factor de alteración  $D < 1$  y un valor promedio de 0.70, coherente con el efecto de la voladura controlada que genera fragmentos entre 7"

y 10", tamaño adecuado para los hornos de calcinación. El parámetro  $m_i$  correspondió a calizas micríticas formadas por lodo calcáreo consolidado, con valores entre 10 y 11 (fluctuando alrededor de  $9 \pm 2$ ), mientras que el parámetro  $m_b$  representó el valor reducido de  $m_i$  debido a la litología y grado de fracturamiento del macizo. El módulo de elasticidad intacto ( $E_i$ ) se estimó mediante la relación  $E_i = MR \times \sigma_{ci}$ , siguiendo la formulación de Hoek y Diederichs (2005), vinculada empíricamente con la resistencia uniaxial. Los parámetros  $s$  y  $a$  mostraron variaciones propias de un macizo no intacto:  $s$ : 0.0005 a 0.0851,  $a$ : 0.051 a 0.507

Esto refleja el estado anisotrópico impuesto por las discontinuidades. A partir de la envolvente de resistencia y considerando alturas de talud entre 12 y 18 m y un peso específico de  $0.026 \text{ MN/m}^3$ , se obtuvo una resistencia global del macizo entre 15.576 MPa y 62.077 MPa, correspondiente al punto máximo de fallamiento bajo confinamiento. Posteriormente, mediante el método de equivalencia de área entre Hoek–Brown y Mohr–Coulomb, se calcularon los parámetros de diseño:

- $\sigma_3$ max (presión de confinamiento): 37.50 MPa a 45.50 MPa
- Cohesión ( $c$ ): 5.178 MPa a 15.435 MPa
- Ángulo de fricción ( $\phi$ ):  $22.76^\circ$  a  $37.12^\circ$

Estos valores representan los parámetros mecánicos que se utilizaron para la evaluación de la estabilidad del talud.

Cuadro 3.6. Constantes elásticas del macizo rocoso del tajo Calera Bambamarca S.A.C.

Constantes elásticas		EG-01	EG-02	EG-03	EG-04
Clasificación Hoek - Brown	$m_i$	11	10	10	10
	D	0.70	0.70	0.70	0.70
	$E_i$ (MPa)	142,500	131,250	123,580	127,400
	MR	950	750	740	700
Criterio Hoek - Brown	$m_b$	0.632	2.032	1.383	3.930
	$s$	0.0005	0.0150	0.0054	0.0851
	$a$	0.507	0.501	0.502	0.503
Morh - Coulomb	$c$ (MPa)	5.178	10.122	8.087	15.435
	$\phi^\circ$	22.76	31.96	28.87	37.12
Parámetros del macizo rocoso	$\sigma_t$ (MPa)	-0.127	-1.288	-0.654	-3.942
	$\sigma_{cu}$ (MPa)	3.297	21.286	12.161	53.039
	$\sigma_{cg}$ (MPa)	15.576	36.488	27.386	62.077
	$E_m$ (MPa)	13,456.72	46,250.54	31,102.25	65,236.11

La cantera está controlado estructuralmente por tres familias principales de discontinuidades, evaluadas mediante el método lineal, lo que permitió clasificar al macizo rocoso como una caliza de calidad regular a buena (R5, 3 a 4 golpes con picota) y con bajo grado de fracturamiento. Las orientaciones D/DD medidas en la cara libre muestran una bloquesidad tabular y cúbica, la cual fue analizada mediante el software DIPS utilizando la proyección de Schmidt. El análisis cinemático evidenció que los posibles mecanismos de inestabilidad están asociados a las juntas y a las intersecciones de planos que se orientan hacia la cara libre del talud. Estos mecanismos corresponden a falla planar, falla por cuña y vuelco, los cuales influyen directamente en la generación de escombros en el frente de explotación.

En cuanto a la falla planar, la probabilidad de fallamiento (%PF) varía entre 12.20% y 26.83%, siendo las estaciones EG-01 y EG-04 las más críticas debido a la orientación de caída hacia el NW–SW, lo que favorece el deslizamiento indirecto hacia la cara libre. Estas fallas están asociadas principalmente a las juntas D-1 y D-2. En contraste, las estaciones EG-02 y EG-03 muestran menor generación de escombros, ya que las juntas D-1 y D-2 presentan orientaciones menos favorables al deslizamiento directo o indirecto hacia el talud.

Cuadro 3.7. Porcentaje de probabilidad de fallamiento planar del macizo rocoso del tajo de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.

Estación geomecánica	Fallamiento planar				Densidad máxima (%)
	Inestable	Total	%PF	Polos	
EG-01	12	45	26.67	D-1 y D-2	35.36
EG-02	7	45	15.56	D-2	24.34
EG-03	5	41	12.20	D-2	29.70
EG-04	11	41	26.83	D-1	26.08

Por lo contrario, el tajo también presenta fallamiento cuneiforme a favor del talud relacionadas con las estaciones: EG-01 y EG-03, siendo las más críticas mediante %PF desde 28.92% a 30.24%, con dirección indirecta de caída la EG-01/W y orientación directa de caída al SW/EG-03; constituida por la intersección de juntas; en cambio de diaclasas D-1 y D-2; así mismo la menor EG-02 y EG-04 con %PF desde 6.34% a 15.35%. formada por la intersección de planos: D-1 y D-2, con dirección SW de caída indirecta.

Cuadro 3.8. Porcentaje de probabilidad de fallamiento por cuña del macizo rocoso del tajo de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.

Estación geomecánica	Fallamiento por cuña				Densidad máxima (%)
	Inestable	Total	% PF	Intersección	
EG-01	286	989	28.92	D-1 y D-2	35.36
EG-02	152	990	15.35	D-1 y D-2	24.34
EG-03	248	820	30.24	D-1 y D-2	29.70
EG-04	52	820	6.34	D-1 y D-2	26.08

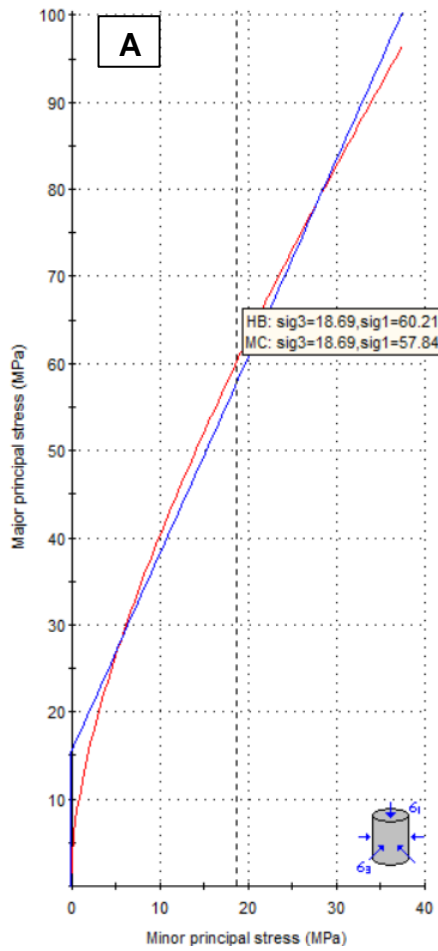
Por lo contrario, el fallamiento por vuelco solo se presenta en la EG-04 con %PF 34.15% relacionada con junta D-2, siendo homólogo al plano del talud principal con orientación D/DD = 76°/307°, siendo muy propenso a formar mayor cantidad de acumulación de escombros, por consiguiente, el diagrama: Pi y beta, constituyeron la concentración de densidades para probabilidad de ruptura del talud.

Cuadro 3.9. Porcentaje de probabilidad de fallamiento por vuelco del macizo rocoso del tajo de la empresa Calera Bambamarca S.A.C.

Estación geomecánica	Fallamiento por vuelco				Densidad máxima (%)
	Inestable	Total	% PF	Polos	
EG-01	0.00	45	0.00	-	35.36
EG-02	0.00	45	0.00	-	24.34
EG-03	0.00	41	0.00	-	29.70
EG-04	14.00	41	34.15	D-2	26.08

### 3.5.1 ESTACION GEOMECAÁNICA 01

Con coordenadas UTM con valores Este (E) = 769965.00 m y Norte (N) = 9260961.00 m. Está conformada por roca caliza delimitado la cara libre por tres familias D/DD: 17°/40°, 63°/322° y 59°/233°, con resistencia promedio  $\sigma_{ci}$  = 150 MPa, altura tajo 15.00 m. de calidad regular, con valores de caracterización geomecánica: L = 2.45, ND = 35,  $\lambda$  = 14.29, RQD = 58.20%, RMR = 53 y GSI = 48, reportando constantes elásticas como: c = 5.178 MPa y  $\phi^\circ$  = 22.76° utilizando el criterio generalizado de Hoek y Brown con a = 0.507; reportando movimientos cinemáticos por software Dips con: %PFplanar 26.67%/D-1 y D-2, %PFcuña 28.92%/D-1 y D2, y %PFvuelco 00.00%, generando la mayor cantidad de escombros a favor del calibre del talud



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 150 MPa  
 GSI = 48  $m_i$  = 11 Factor de disturbancia = 0.70  
 Módulo intacto ( $E_i$ ) = 142,500 MPa  
 Modulus ratio (MR) = 950

Criterio Hoek - Brown

$m_b$  = 0.632  $s$  = 0.0005  $a$  = 0.507

Morh - Coulomb

Cohesión = 5.178 MPa Ángulo de fricción = 22.76°

Parámetros del macizo rocoso

Resistencia a la tracción = -0.127 MPa  
 Resistencia compresión uniaxial = 3.297 MPa  
 Resistencia global = 15.576 MPa  
 Módulo de deformación = 13,456.72 MPa

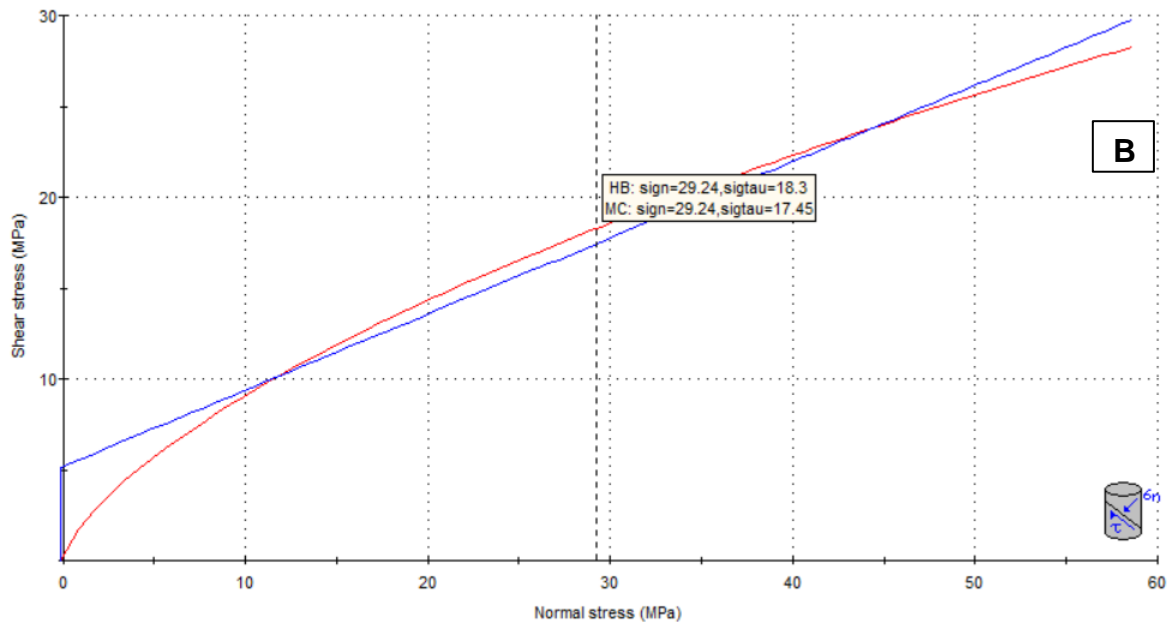
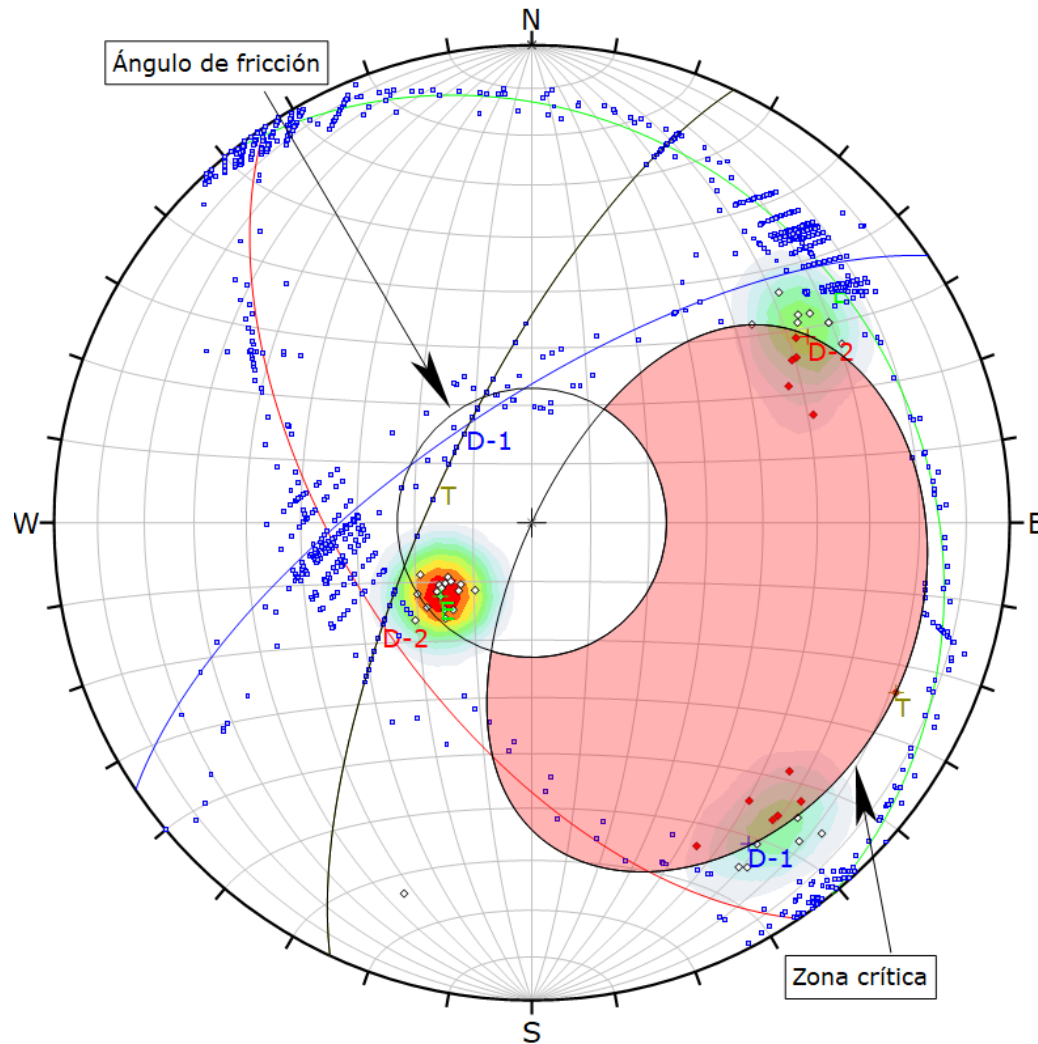
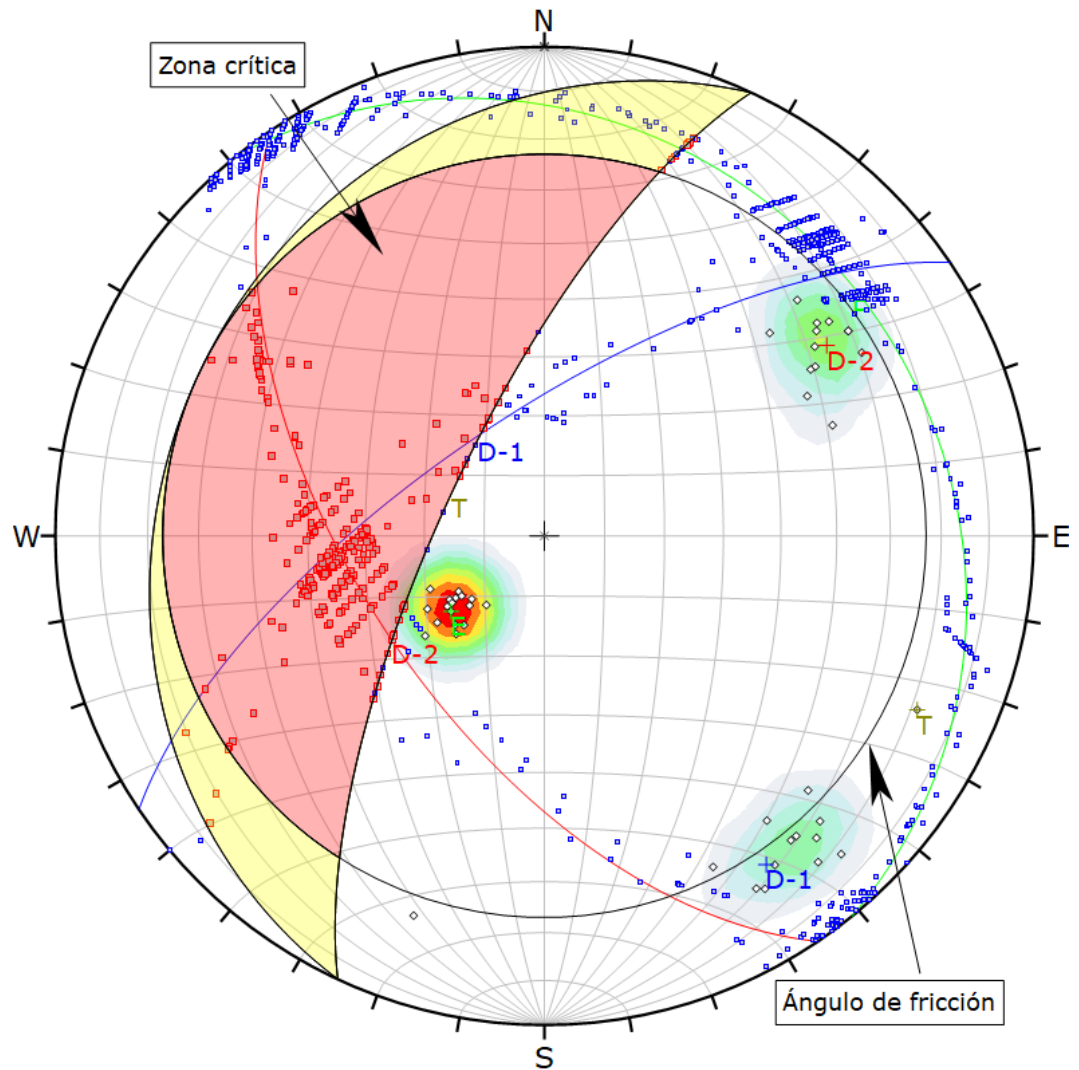


Figura 3.17. Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-01.



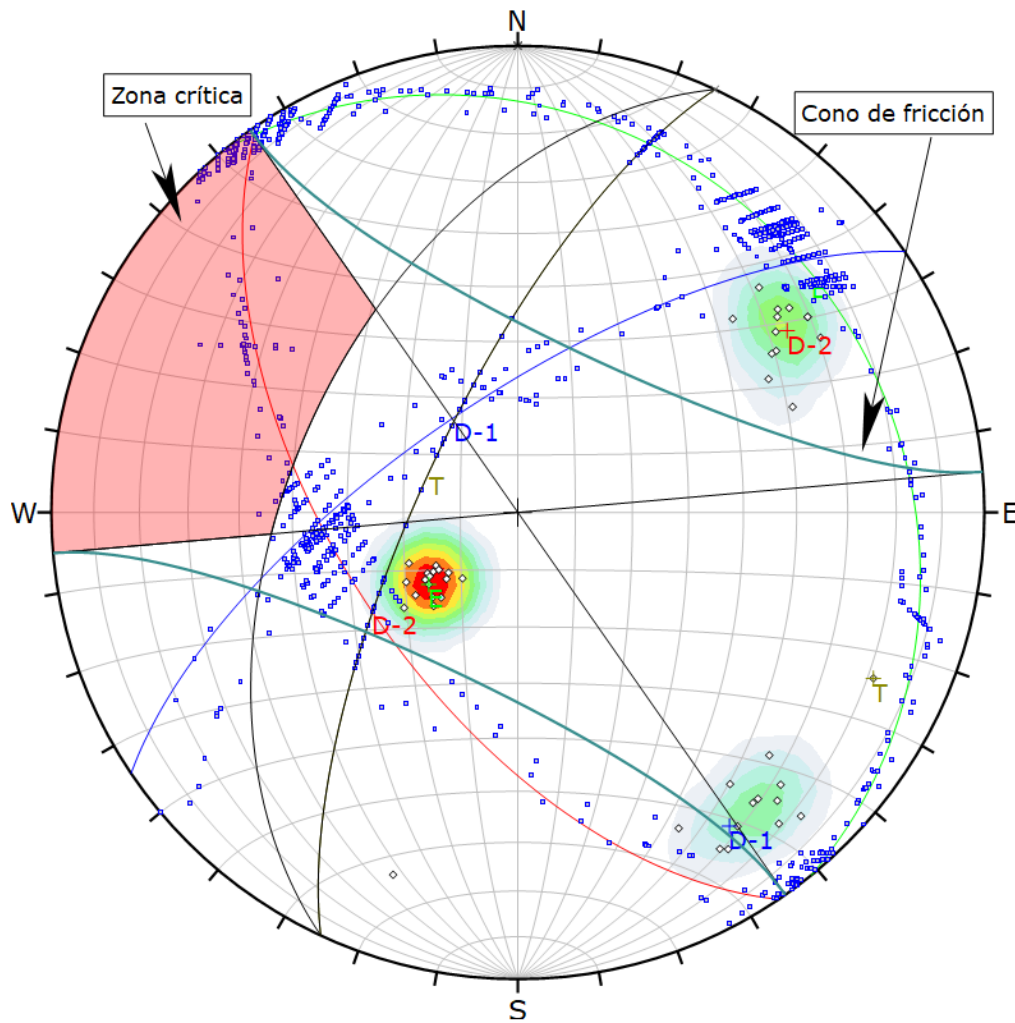
Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 3.60			
	3.60 – 7.20			
	7.20 – 10.80			
	10.80 – 14.40			
	14.40 – 18.00			
	18.00 – 21.60			
	21.60 – 25.20			
	25.20 – 28.80			
	28.80 – 32.40			
	32.40 – 36.00			
Maximum density		35.36%		
Contour data		Polo vectors		
Contour distribution		Fisher		
Counting circle size		1.00%		
Kinematic analysis		Planar siliding		
Slope dip		73°		
Slope Dip direction		295°		
Friction angle		30°		
	Critical	Total	%	
Planar siliding (All)	12	45	26.67%	
	Color	Dip	Dip direction	
User planes				
1	■	20°	51° E	
2	■	70°	326° D-1	
3	■	59°	236° D-2	
4	■	73°	295° T	
Plot Mode		Pole vectors		
Vector count		45 (45 entries)		
Intersection mode		Grid data planes		
Intersections count		989		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal area		

Figura 3.18. Probabilidad de ruptura planar con 26.67%, formando por las juntas: D-1 y D-2, constituido por 12 planos críticos del total de 45, EG-01.



Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 2.90		
	3.60 – 7.20		
	7.20 – 10.80		
	10.80 – 14.40		
	14.40 – 18.00		
	18.00 – 21.60		
	21.60 – 25.20		
	25.20 – 28.80		
	28.80 – 32.40		
	32.40 – 36.00		
Maximum density	35.36%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	73°		
Slope Dip direction	295°		
Friction angle	23°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	286	989	28.92%
	Color	Dip	Dip direction
			Label
User planes			
1	■	20°	51°
2	■	70°	147°
3	■	59°	242°
4	■	73°	305°
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	988		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

Figura 3.19. Probabilidad de ruptura por cuña con 28.92%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-01.



Symbol	Feature			
◇	Pole vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 2.90			
	3.60 – 7.20			
	7.20 – 10.80			
	10.80 – 14.40			
	14.40 – 18.00			
	18.00 – 21.60			
	21.60 – 25.20			
	25.20 – 28.80			
	28.80 – 32.40			
	32.40 – 36.00			
Maximun density	35.36%			
Contour data	Pole vectors			
Contour distribution	Fisher			
Counting circle size	1.00%			
Kinematic analysis	Flexural toppling			
Slope dip	73°			
Slope Dip direction	295°			
Friction angle	23°			
Lateral limits	30°			
	Critical	Total	%	
Flexural toppling (All)	0	45	00.00%	
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	20°	51°	E
2	■	70°	326°	D-1
3	■	59°	236°	D-2
4	■	73°	295°	T
Plot Mode	Pole vectors			
Vector count	45 (45 entries)			
Intersection mode	Grid data planes			
Intersections count	989			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal area			

Figura 3.20. Probabilidad de ruptura por vuelco con 00.00%, no formando planos críticos, constituido por 0.0 planos críticos del total de 45, EG-01.

### 3.5.2 ESTACIÓN GEOMECÁNICA 02

Con coordenadas UTM con valores Este (E) = 769961.00 m y Norte (N) = 9260966.00 m. Está conformada por roca caliza micrítica constituido por tres diaclasas D/DD: 20°/58°, 74°/171° y 80°/300°, con resistencia promedio  $\sigma_{ci} = 175$  MPa, altura de cantera 17.00 m. de calidad buena, con valores de caracterización geomecánica:  $L = 1.70$ ,  $ND = 12$ ,  $\lambda = 7.06$ ,  $RQD = 84.21\%$ ,  $RMR = 76$  y  $GSI = 71$ , con constantes elásticas:  $c = 10.122$  MPa y  $\phi^\circ = 31.96^\circ$ , con  $a = 0.507$ ; con cinemática por software Dips con: %PFplanar 15.56 %/D-1 y D-2, %PFcuña 15.35%/D-1 y D2, y %PFvuelco 00.00%, generando acumulación de escombros en el pie del talud.

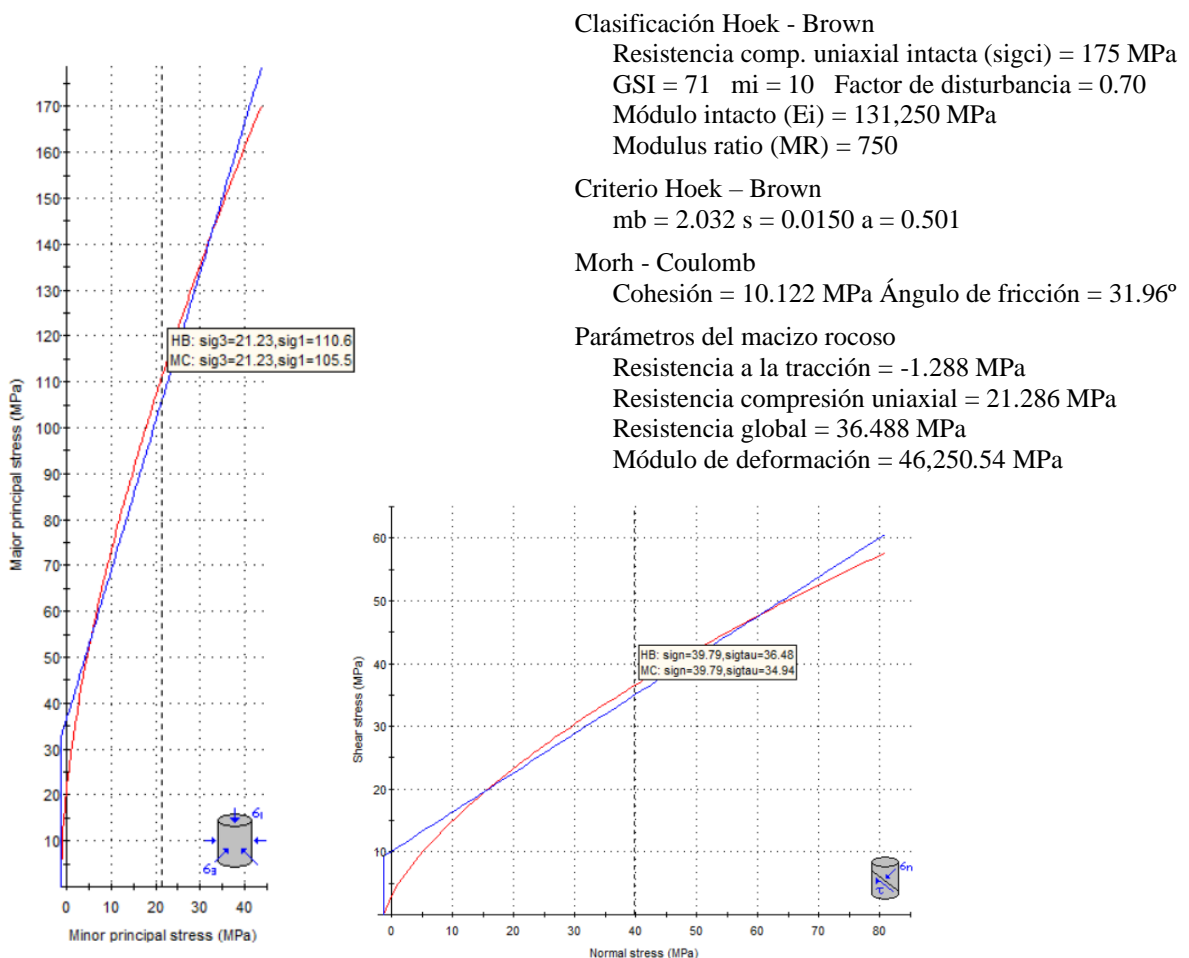
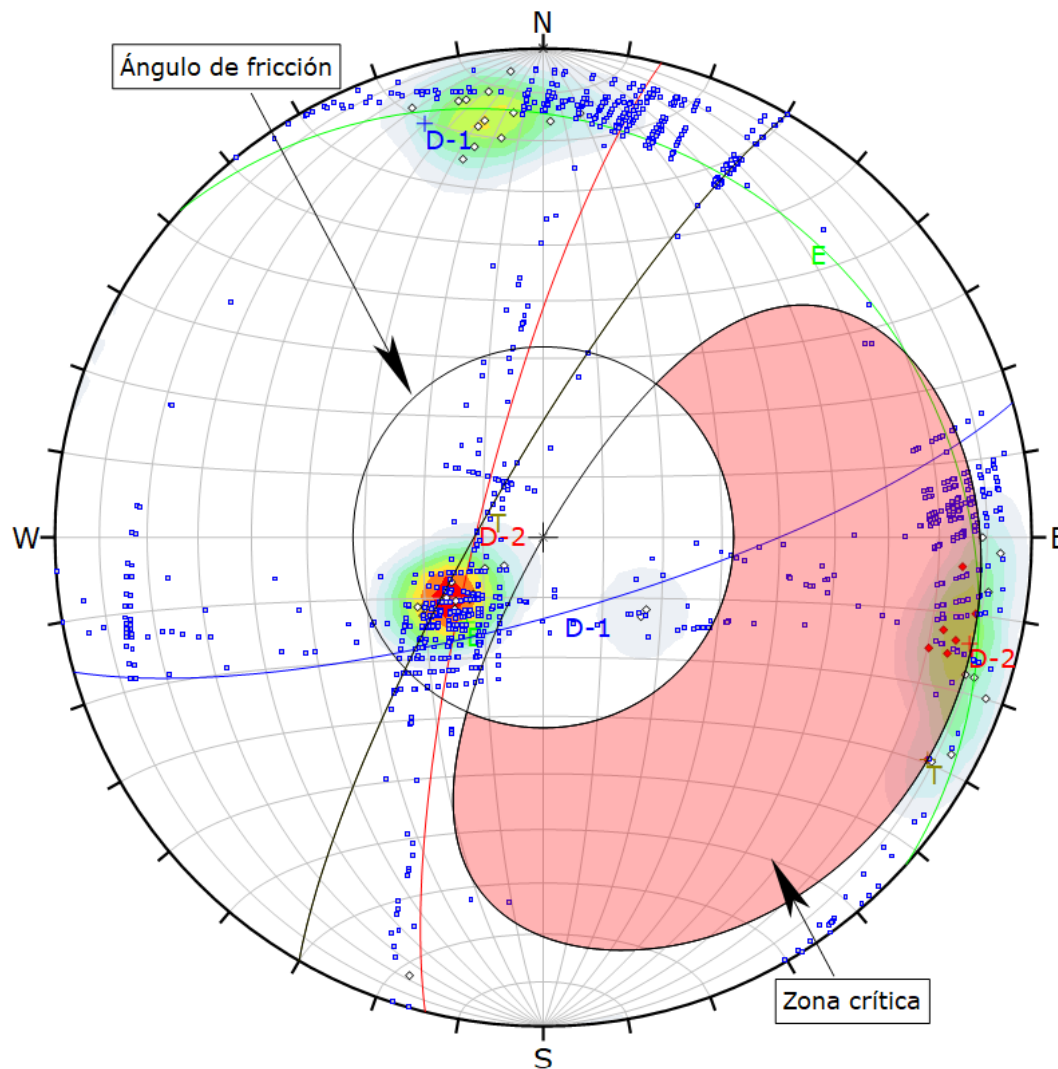


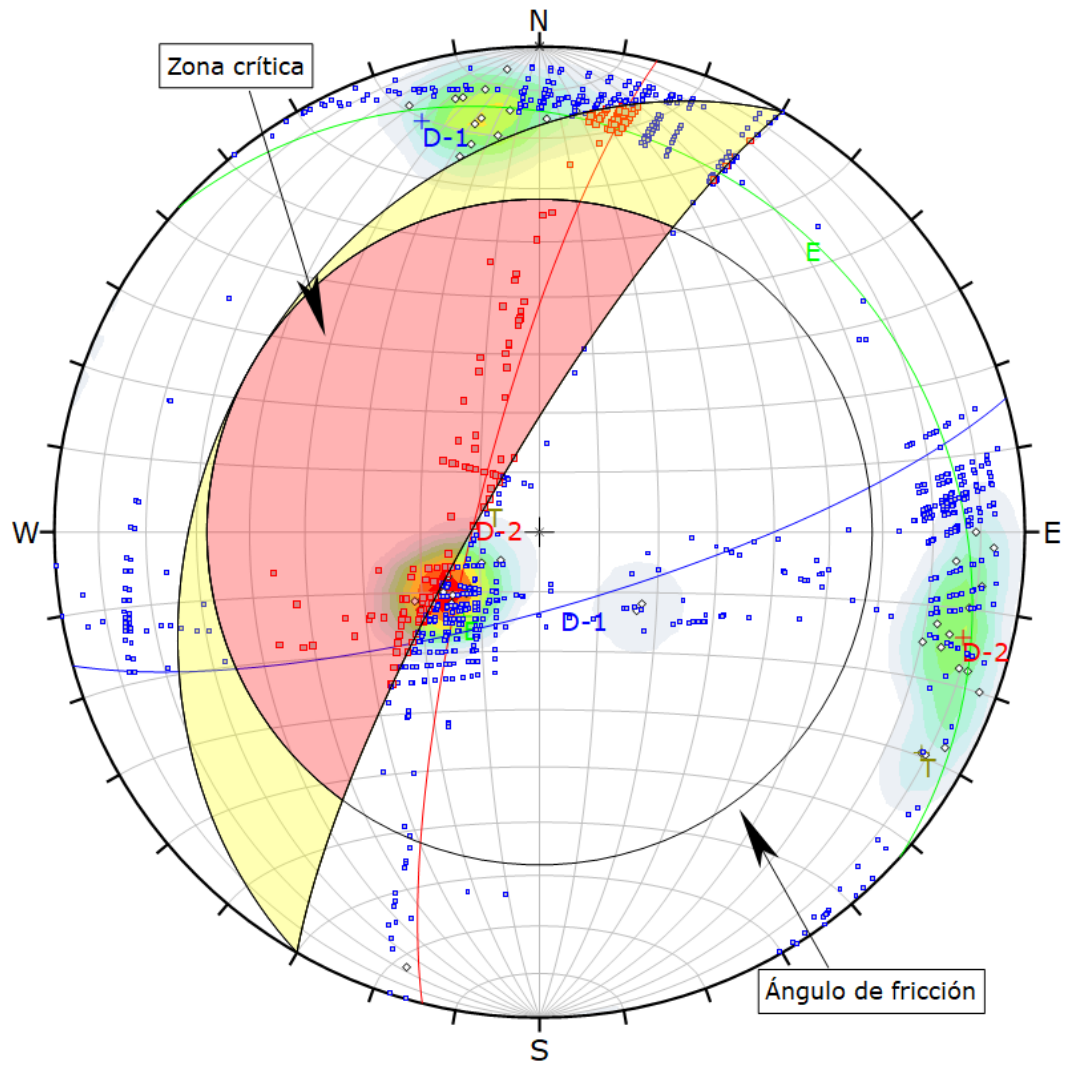
Figura 3.21. Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-02.



Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 2.50		
	2.50 – 5.00		
	5.00 – 7.50		
	7.50 – 10.00		
	10.00 – 12.50		
	12.50 – 15.00		
	15.00 – 17.50		
	17.50 – 20.00		
	20.00 – 22.50		
	22.50 – 25.00		
Maximun density	24.34%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Planar siliding		
Slope dip	80°		
Slope Dip direction	300°		
Friction angle	32°		
	Critical	Total	%
Planar siliding (All)	7	45	15.56%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	70°	42°
2	■	77°	164°
3	■	79°	284°
4	■	80°	300°
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	990		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

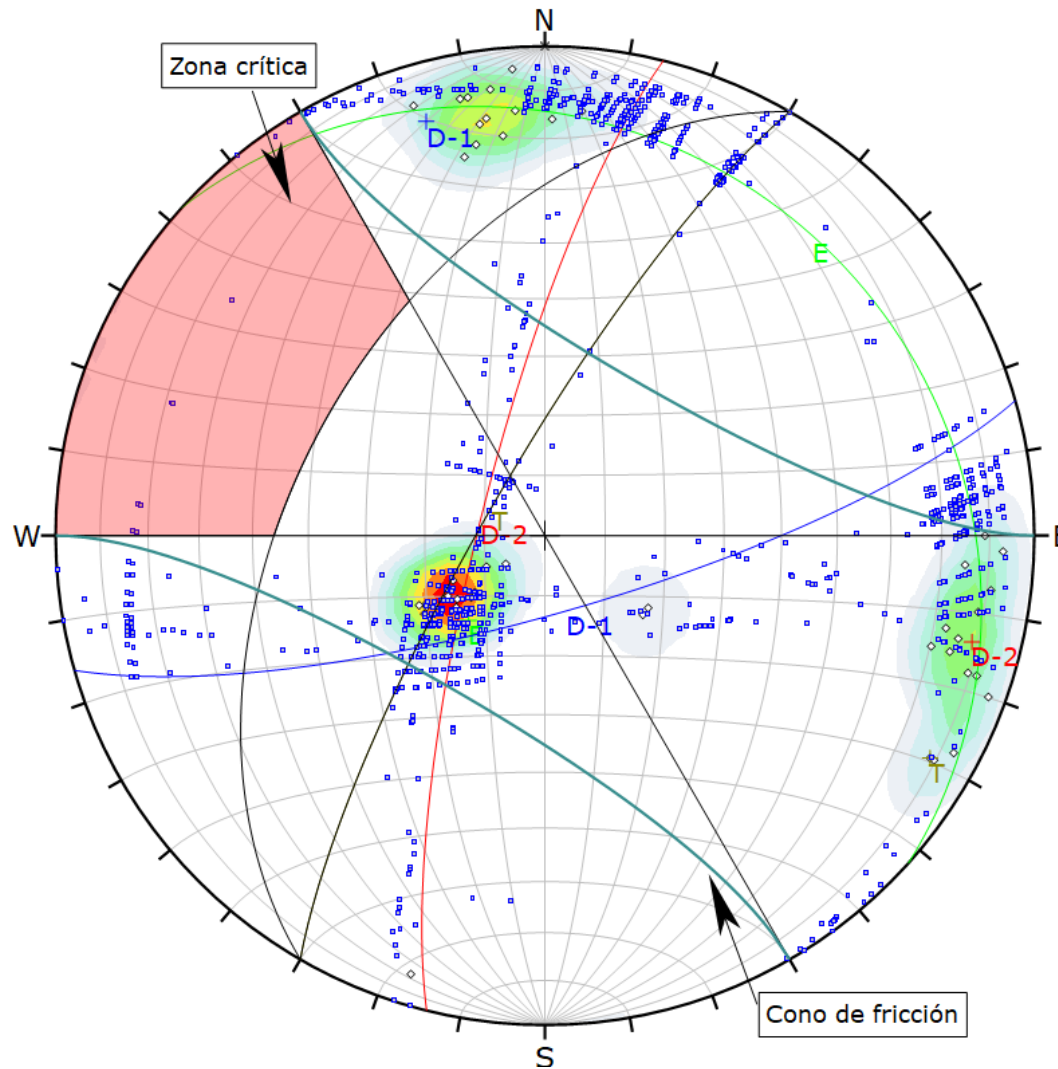
Figura 3.22. Probabilidad de ruptura planar con 15.56%, formando por la junta D-2, constituido por 7 planos críticos del total de 45, EG-02.

Symbol	Feature
--------	---------



◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 2.50		
	2.50 – 5.00		
	5.00 – 7.50		
	7.50 – 10.00		
	10.00 – 12.50		
	12.50 – 15.00		
	15.00 – 17.50		
	17.50 – 20.00		
	20.00 – 22.50		
	22.50 – 25.00		
Maximun density	24.34%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	80°		
Slope Dip direction	300°		
Friction angle	32°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	152	990	15.35%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	19°	42° E
2	■	77°	164° D-1
3	■	79°	284° D-2
4	■	80°	300° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	990		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

Figura 3.23. Probabilidad de ruptura por cuña con 15.35%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-02.



Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 2.50			
	2.50 – 5.00			
	5.00 – 7.50			
	7.50 – 10.00			
	10.00 – 12.50			
	12.50 – 15.00			
	15.00 – 17.50			
	17.50 – 20.00			
	20.00 – 22.50			
	22.50 – 25.00			
Maximum density	24.34%			
Contour data	Polo vectors			
Contour distribution	Fisher			
Counting circle size	1.00%			
Kinematic analysis	Flexural toppling			
Slope dip	80°			
Slope Dip direction	300°			
Friction angle	32°			
Lateral limits	30°			
	Critical	Total	%	
Flexural toppling (All)	0	45	00.00%	
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	19°	42°	E
2	■	77°	164°	D-1
3	■	79°	284°	D-2
4	■	80°	300°	T
Plot Mode	Pole vectors			
Vector count	45 (45 entries)			
Intersection mode	Grid data planes			
Intersections count	990			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal area			

Figura 3.24. Probabilidad de ruptura por vuelco con 00.00%, no formando planos críticos, constituido por 0.0 planos críticos del total de 45, EG-02.

### 3.5.3 ESTACIÓN GEOMECÁNICA 03

Con coordenadas UTM con valores Este (E) = 769935.00 m y Norte (N) = 9260928.00 m. El macizo rocoso está conformado por tres juntas con orientación D/DD: 18°/39°, 69°/3° y 75°/264°,  $\sigma_{ci} = 167$  MPa. y altura tajo 20.00 m. con propiedades de juntas de espaciado: 0.20 m. a 0.80 m., de persistencia: 0.20 m. a 15 m. y superficies rocosas secas. Constituida por rocas de calidad buena, con valores de caracterización geomecánica:  $L = 2.10$ ,  $ND = 18$ ,  $\lambda = 8.57$ ,  $RQD = 78.81\%$ ,  $RMR = 69$  y  $GSI = 64$ . Aplicando los programas numéricos RocDaya se obtuvo constantes elásticas:  $c = 8.087$  MPa y  $\phi^\circ = 28.87^\circ$ , ingresado al software Dips con cinemática de ruptura: %PFplanar 12.20%/D-2, %PFcuña 30.24% /D-1 y D2, y %PFvuelco 00.00%, generando la mayor cantidad de escombros a favor del talud.

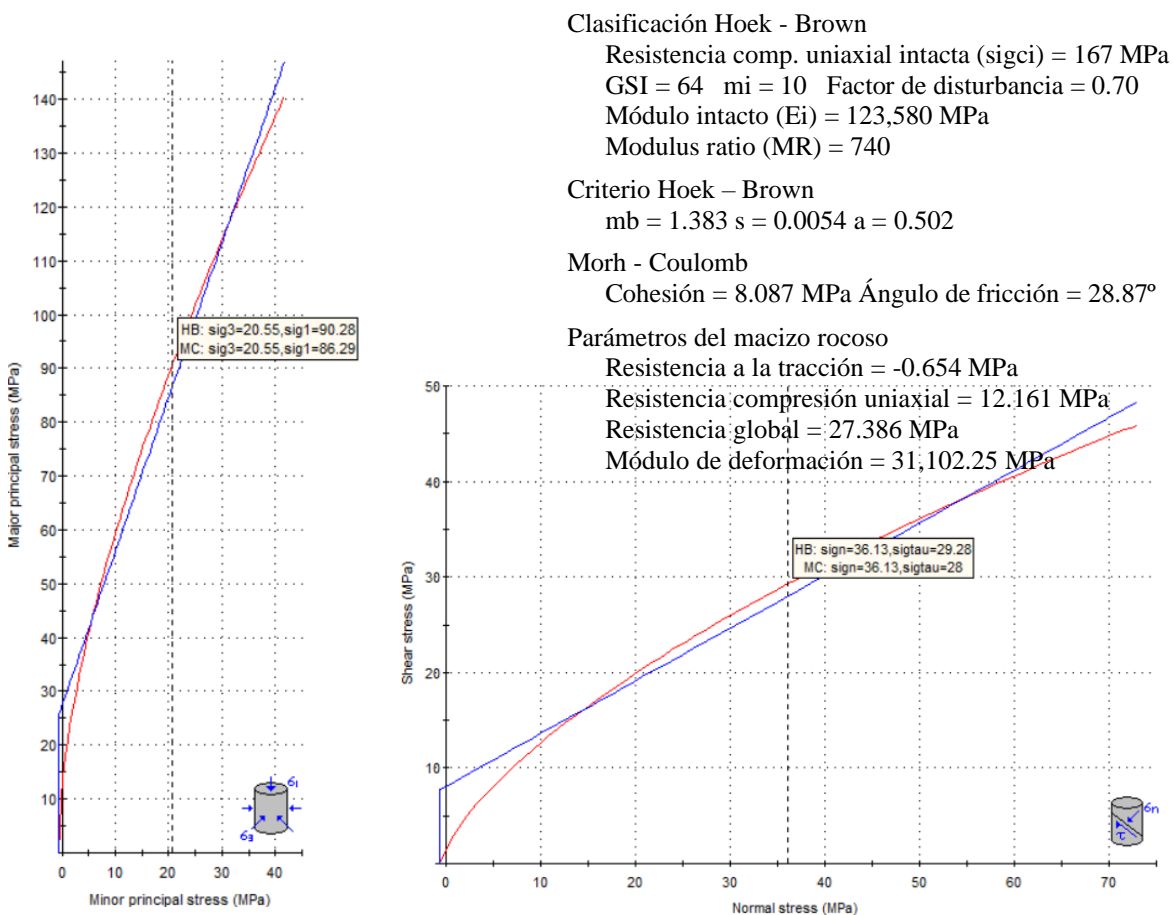
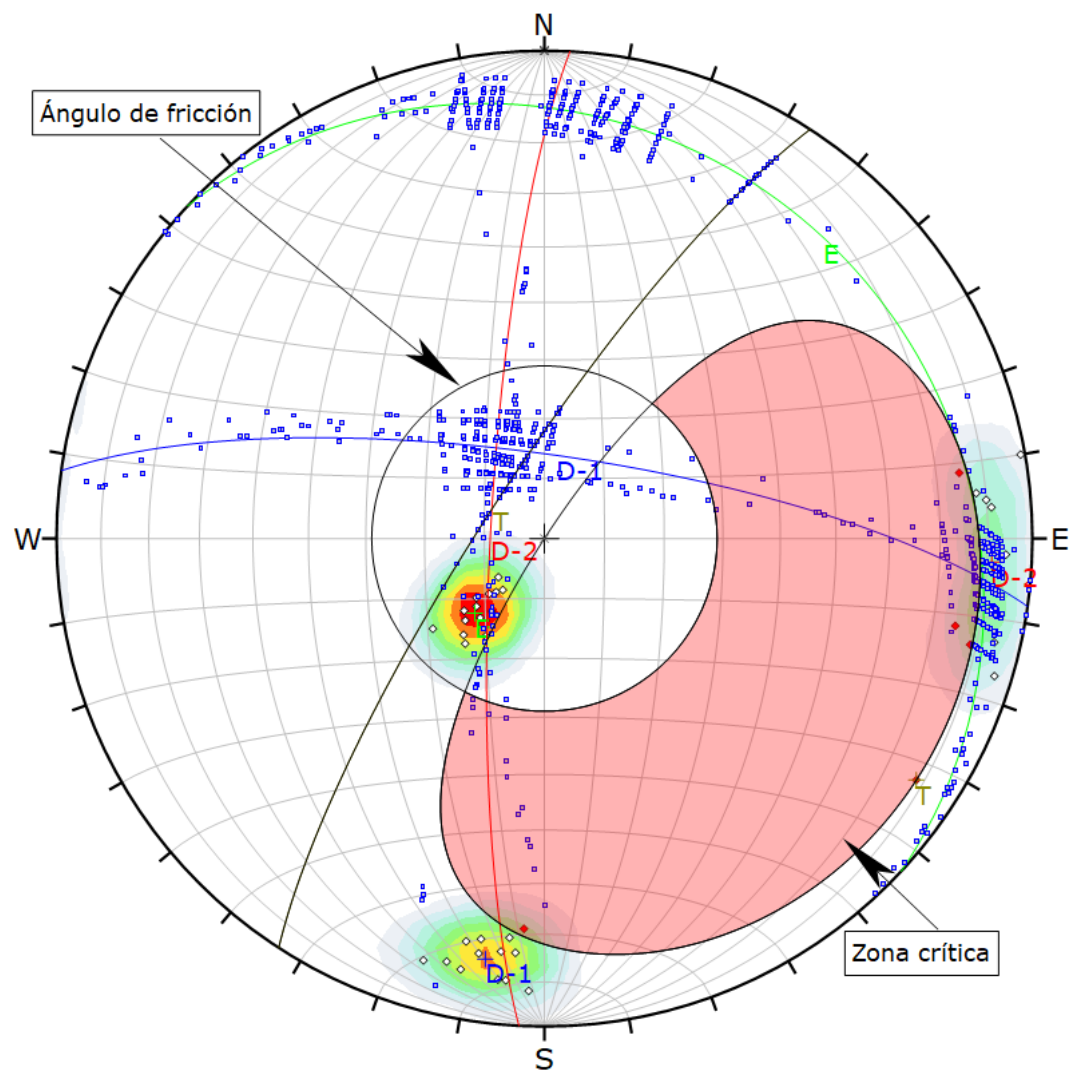


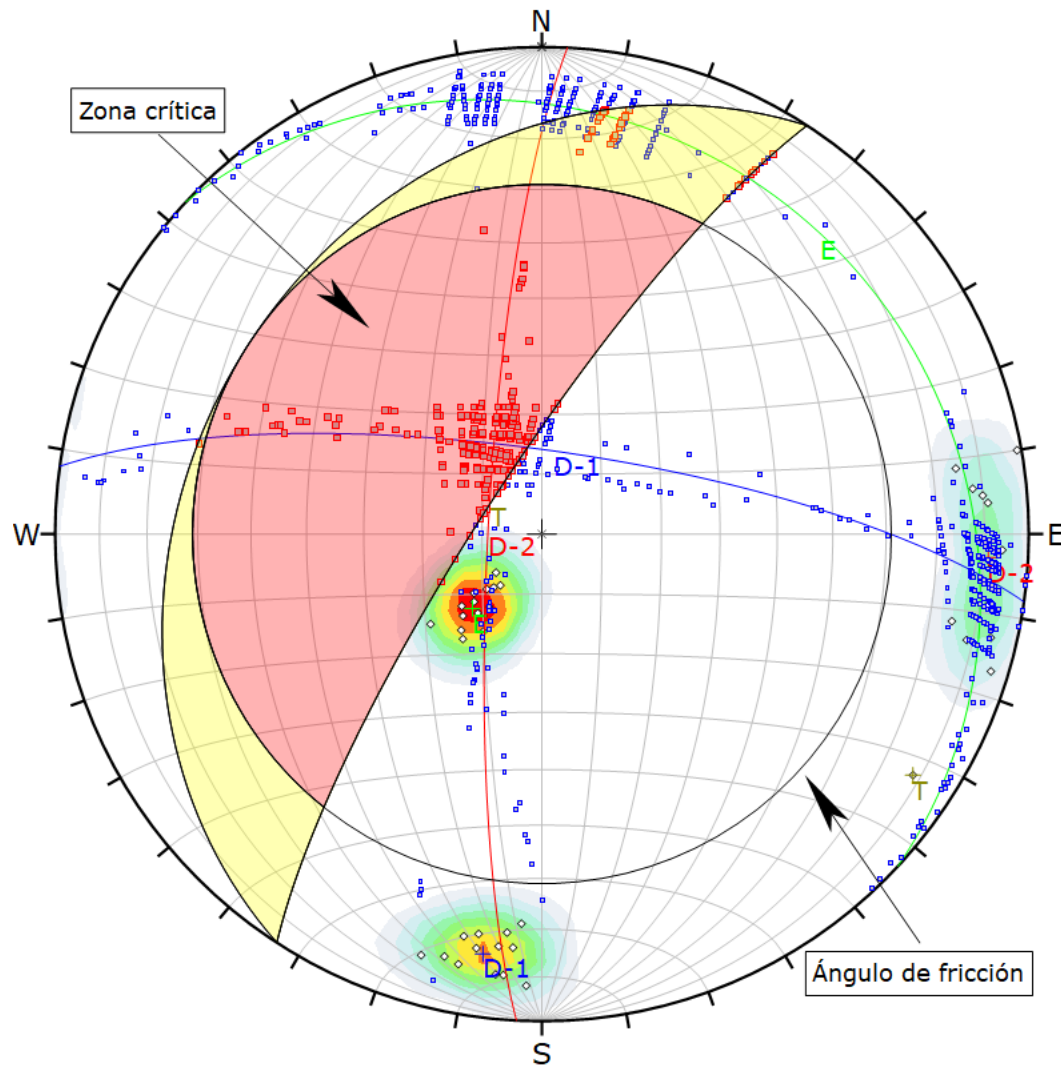
Figura 3.25. Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-03.



Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 3.00		
	3.00 – 6.00		
	6.00 – 9.00		
	9.00 – 12.00		
	12.00 – 15.00		
	15.00 – 18.00		
	18.00 – 21.00		
	21.00 – 24.00		
	24.00 – 27.00		
	27.00 – 30.00		
Maximun density	29.70%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Planar siliding		
Slope dip	80°		
Slope Dip direction	303°		
Friction angle	29°		
Planar siliding (All)	Critical	Total	%
	5	41	12.20%
Color	Dip	Dip direction	Label
	User planes		
1	17°	43°	E
2	76°	8°	D-1
3	81°	273°	D-2
4	80°	303°	T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	41 (41 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	820		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

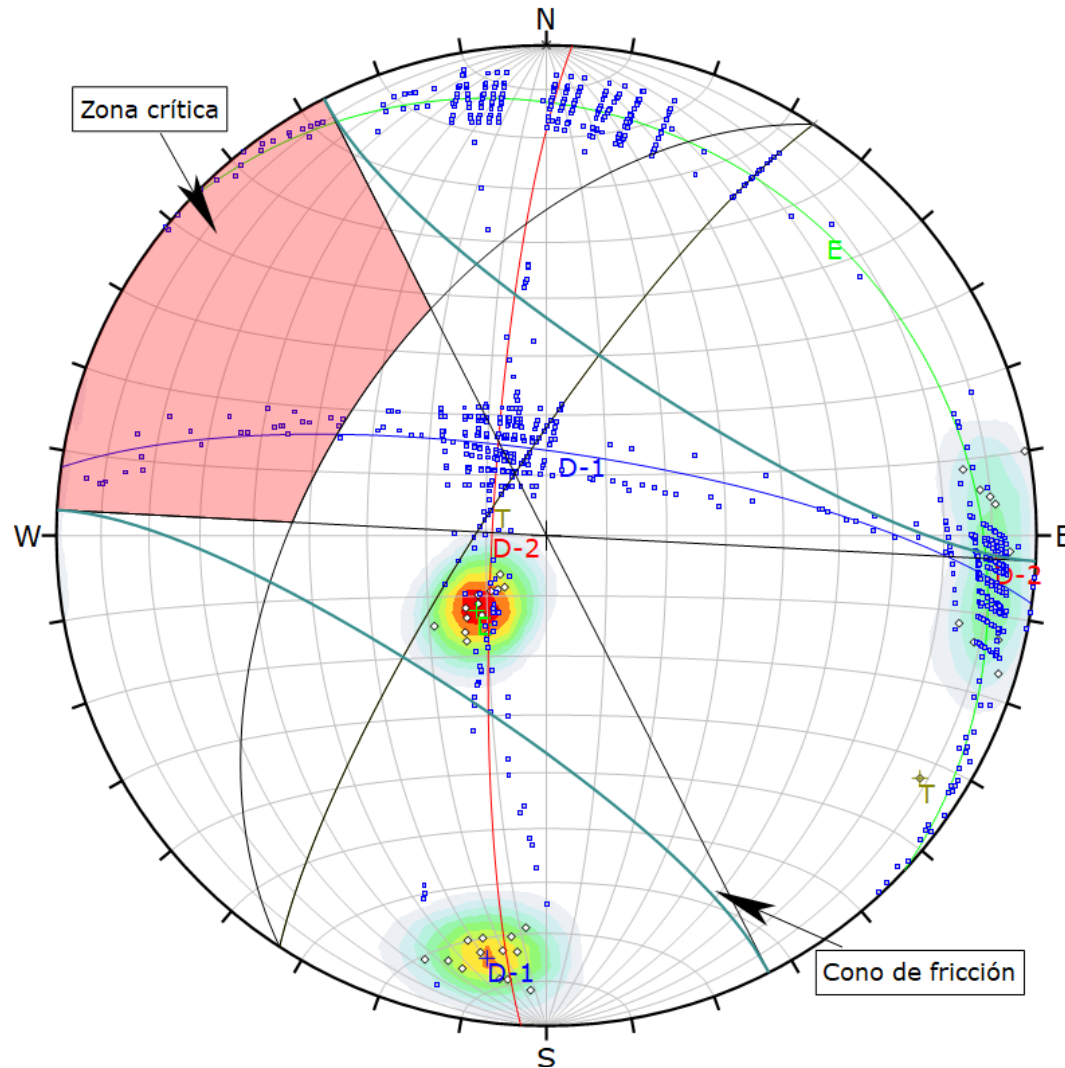
Figura 3.26. Probabilidad de ruptura planar con 12.20%, formando por la junta D-2, constituido por 5 planos críticos del total de 45, EG-03.

Symbol	Feature
--------	---------



◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 3.00		
	3.00 – 6.00		
	6.00 – 9.00		
	9.00 – 12.00		
	12.00 – 15.00		
	15.00 – 18.00		
	18.00 – 21.00		
	21.00 – 24.00		
	24.00 – 27.00		
	27.00 – 30.00		
Maximun density	29.70%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	80°		
Slope Dip direction	303°		
Friction angle	29°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	248	820	30.24%
	Color	Dip	Dip direction
			Label
User planes			
1	■	17°	43° E
2	■	76°	8° D-1
3	■	81°	273° D-2
4	■	80°	303° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	41 (41 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	820		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

Figura 3.27. Probabilidad de ruptura por cuña con 30.24%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-03.

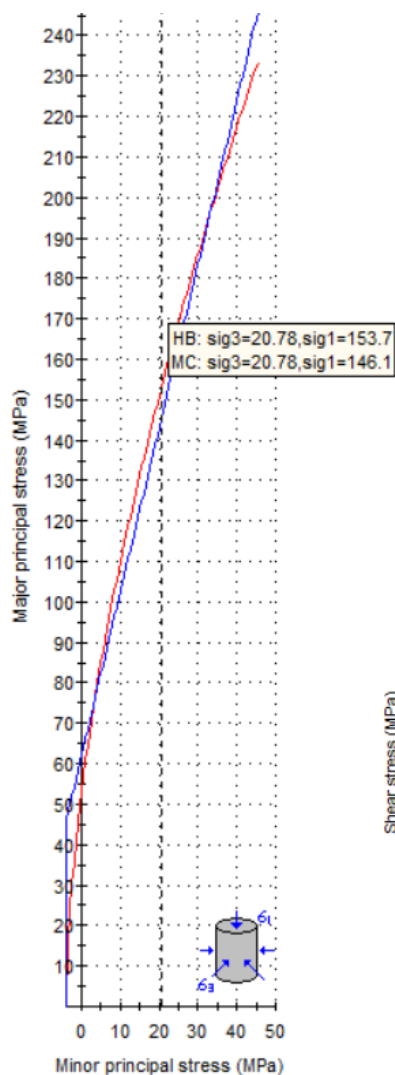


Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 3.00		
	3.00 – 6.00		
	6.00 – 9.00		
	9.00 – 12.00		
	12.00 – 15.00		
	15.00 – 18.00		
	18.00 – 21.00		
	21.00 – 24.00		
	24.00 – 27.00		
	27.00 – 30.00		
Maximun density	29.70%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Flexural toppling		
Slope dip	80°		
Slope Dip direction	303°		
Friction angle	29°		
Lateral limits	30°		
	Critical	Total	%
Flexural toppling (All)	0	41	00.00%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	17°	43° E
2	■	76°	8° D-1
3	■	81°	273° D-2
4	■	80°	303° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	41 (41 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	820		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

Figura 3.28. Probabilidad de ruptura por vuelco con 00.00%, no formando planos críticos, constituido por 0.0 planos críticos del total de 45, EG-03.

### 3.5.4 ESTACIÓN GEOMECÁNICA 04

Con coordenadas UTM con valores Este (E) = 769953.00 m y Norte (N) = 9261010.00 m. Está conformada por roca caliza micrítica de  $\sigma_{ci} = 175$  MPa. de altura tajo 18.00 m. y  $\Psi_T = 76^\circ$ , de calidad buena, con valores de caracterización geomecánica:  $L = 1.95$ ,  $ND = 9$ ,  $\lambda = 4.62$ ,  $RQD = 92.12\%$ ,  $RMR = 87$  y  $GSI = 83$ , con constantes elásticas:  $c = 15.435$  MPa y  $\phi^\circ = 37.12^\circ$ ; con movimiento cinemático: %PFplanar 26.83%/D-1, %PFcuña 6.34%/D-1 y D-2, y %PFvuelco 34.15%/D-2; obtenidos escombros



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 182 MPa  
 $GSI = 83$   $m_i = 10$  Factor de disturbancia = 0.70  
Módulo intacto ( $E_i$ ) = 127,400 MPa  
Modulus ratio (MR) = 700

Criterio Hoek - Brown

$m_b = 3.930$   $s = 0.0851$   $a = 0.500$

Morh - Coulomb

Cohesión = 15.435 MPa Ángulo de fricción =  $37.12^\circ$

Parámetros del macizo rocoso

Resistencia a la tracción = -3.942 MPa  
Resistencia compresión uniaxial = 53.039 MPa  
Resistencia global = 62.077 MPa  
Módulo de deformación = 65,236.11 MPa

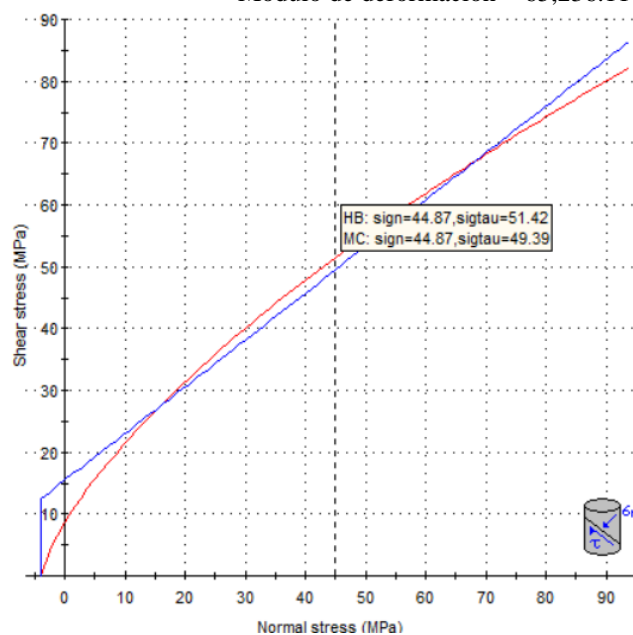
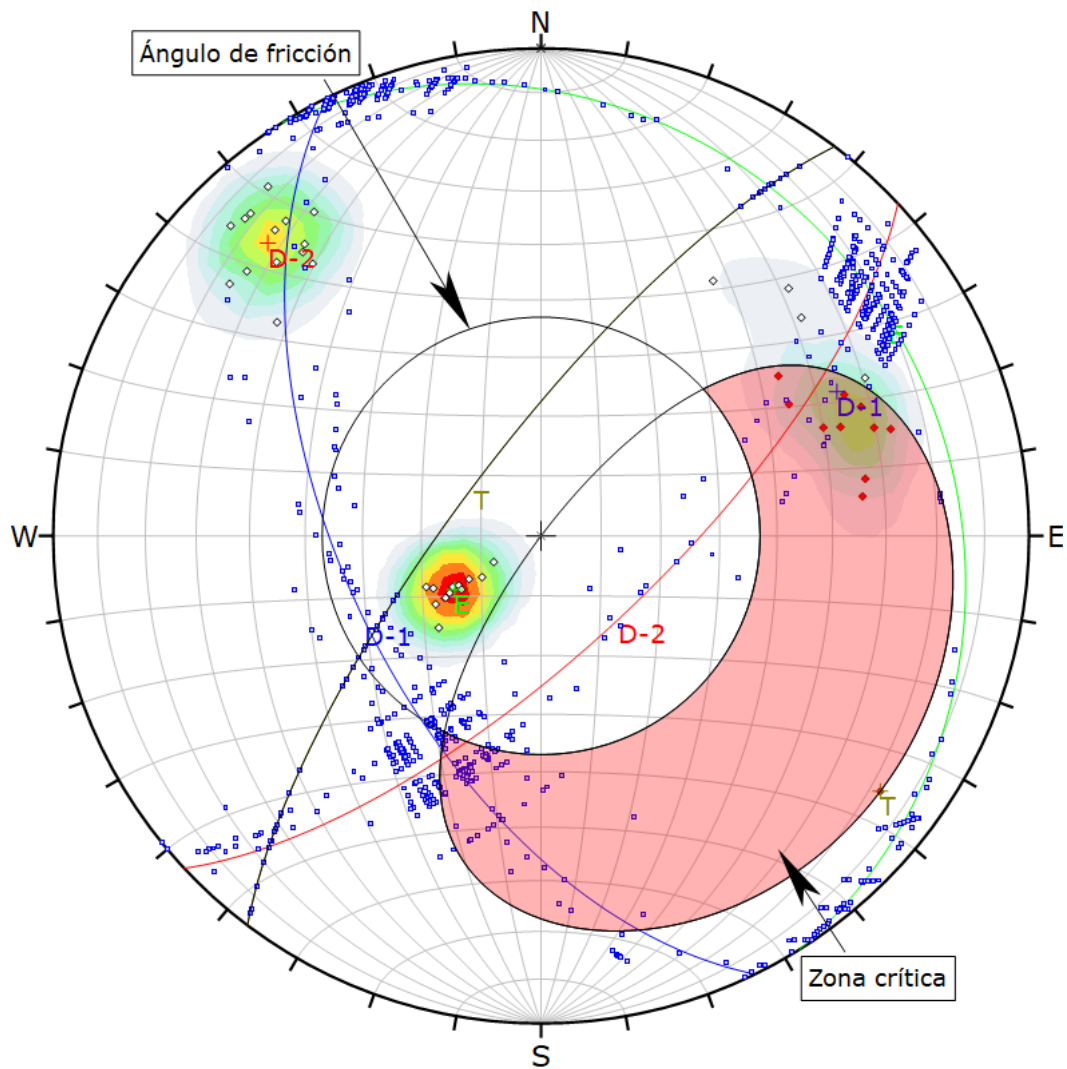


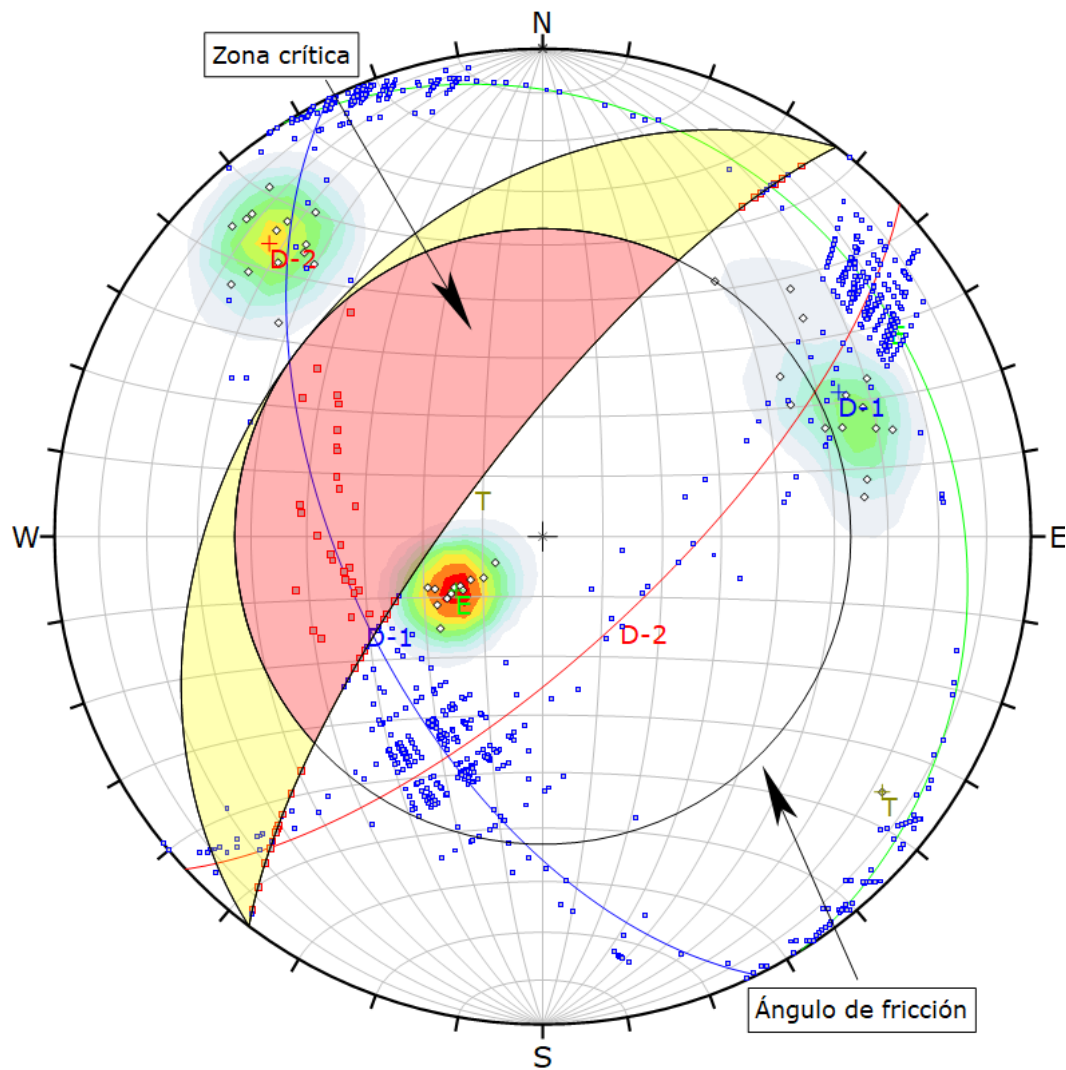
Figura 3.29. Criterio de rotura de esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), método equivalencia de áreas EG-04.



Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 2.70			
	2.70 – 5.40			
	5.40 – 8.10			
	8.10 – 10.80			
	10.80 – 13.50			
	13.50 – 16.20			
	16.20 – 18.90			
	18.90 – 21.60			
	21.60 – 24.30			
	24.30 – 27.00			
Maximum density		26.08%		
Contour data		Polo vectors		
Contour distribution		Fisher		
Counting circle size		1.00%		
Kinematic analysis		Planar siliding		
Slope dip		76°		
Slope Dip direction		307°		
Friction angle		37°		
	Critical	Total	%	
Planar siliding (All)	11	41	26.83%	
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	17°	58°	E
2	■	57°	244°	D-1
3	■	71°	137°	D-2
4	■	76°	307°	T
Plot Mode		Pole vectors		
Vector count		41 (41 entries)		
Intersection mode		Grid data planes		
Intersections count		820		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal area		

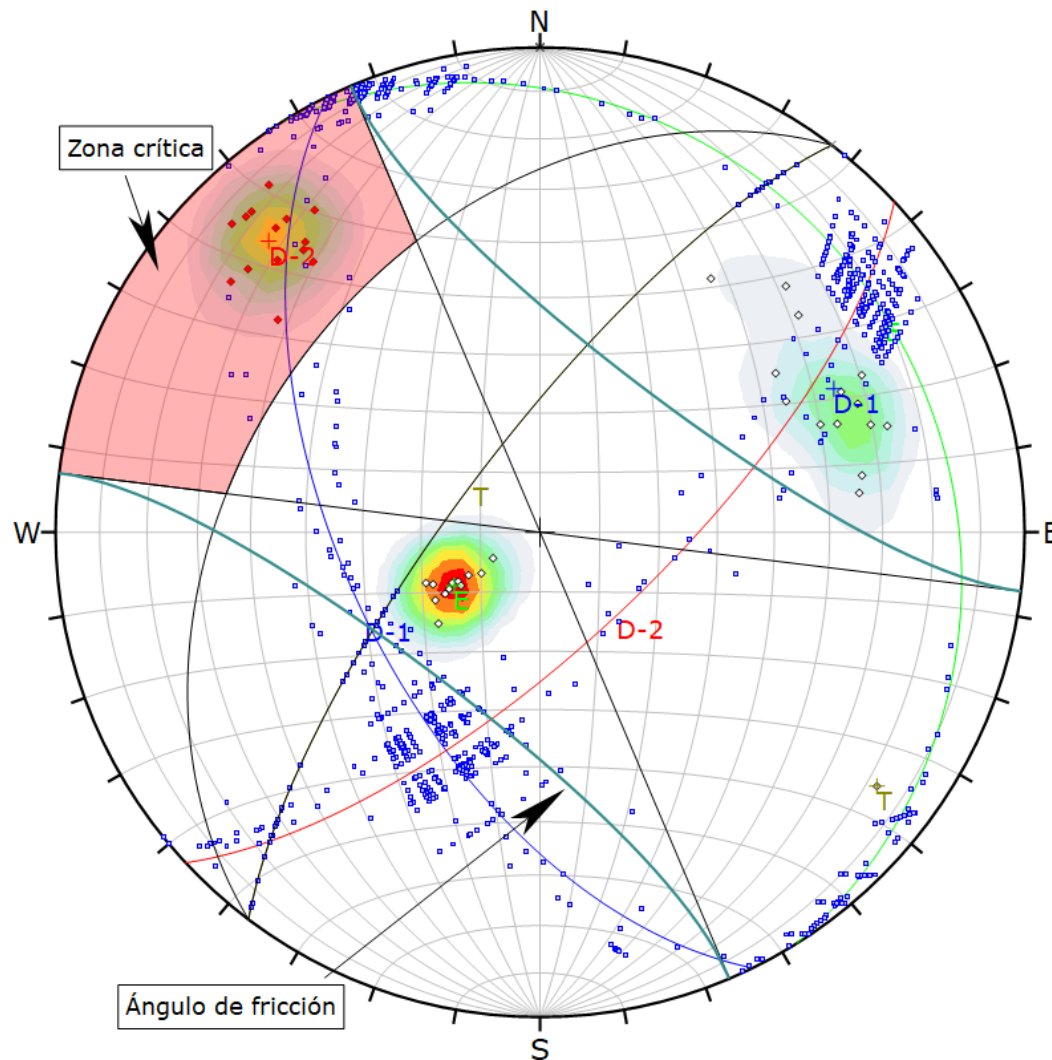
Figura 3.30. Probabilidad de ruptura planar con 26.83%, formando por la junta D-1, constituido por 11 planos críticos del total de 45, EG-04.

Symbol	Feature
--------	---------



◇	Polo vectors			
■	Critical intersection			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 2.70			
	2.70 – 5.40			
	5.40 – 8.70			
	8.10 – 10.80			
	10.80 – 13.50			
	13.50 – 16.20			
	16.20 – 18.90			
	18.90 – 21.60			
	21.60 – 24.30			
	24.30 – 27.00			
Maximum density		26.08%		
Contour data		Polo vectors		
Contour distribution		Fisher		
Counting circle size		1.00%		
Kinematic analysis		Wedge sliding		
Slope dip		76°		
Slope Dip direction		307°		
Friction angle		37°		
	Critical	Total	%	
Wedge sliding	52	820	6.34%	
Color	Dip	Dip direction	Label	
User planes				
1	■	17°	58°	E
2	■	57°	244°	D-1
3	■	71°	137°	D-2
4	■	76°	307°	T
Plot Mode		Pole vectors		
Vector count		41 (41 entries)		
Intersection mode		Grid data planes		
Intersections count		820		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal area		

Figura 3.31. Probabilidad de ruptura por cuña con 6.34%, en función de la intersección de juntas: D-1 / D-2, EG-04



Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 2.70			
	2.70 – 5.40			
	5.40 – 8.10			
	8.10 – 10.80			
	10.80 – 13.50			
	13.50 – 16.20			
	16.20 – 18.90			
	18.90 – 21.60			
	21.60 – 24.30			
	24.30 – 27.00			
Maximum density		26.08%		
Contour data		Polo vectors		
Contour distribution		Fisher		
Counting circle size		1.00%		
Kinematic analysis		Flexural toppling		
Slope dip		76°		
Slope Dip direction		307°		
Friction angle		37°		
Lateral limits		30°		
		Critical	Total	%
Flexural toppling (All)		14	41	34.15%
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	17°	58°	E
2	■	57°	244°	D-1
3	■	71°	137°	D-2
4	■	76°	307°	T
Plot Mode		Pole vectors		
Vector count		41 (41 entries)		
Intersection mode		Grid data planes		
Intersections count		820		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal area		

Figura 3.32. Probabilidad de ruptura por vuelco con 34.15%, formando por la junta D-2, constituido por 14 planos críticos del total de 45, EG-04.

### 3.6 REDISEÑO GOEMÉTRICO

El ciclo de minado que realiza actualmente la cantera Calera Bambamarca S.A.C., está conformado por la explotación a fosa abierta por parámetros de explotación: Altura de banco 1  $hb_1 = 25.12$  m., Altura de banco 2  $hb_2 = 18.00$  m. ancho de berma  $b = 7.00$  m., quebradura 1  $Q_1 = 11.85$  m. y quebradura 2  $Q_2 = 3.14$  m., no teniendo un diseño ingenieril de optimización de producción de roca. Por consiguiente, con la investigación se plantea mejorar el método de explotación por fosa abierta por banquetas descendentes, con un solo frente de cara libre desde la cota: Mínima 3,064.50 msnm. y máxima 3,123.95 msnm.; proyectando extraer roca caliza siguiendo un sistema de minado adecuado con los siguientes parámetros geométricos como: Altura de banco  $hb = 10.00$  m., buzamiento de talud  $\Psi_T = 71^\circ$ , quebradura  $Q = 3.50$  m., ancho de berma  $b = 3.50$  m., ancho de rampa  $br = 8.00$  m., ángulo de interrampa  $\alpha_r = 55^\circ$ , ángulo global  $\alpha_o = 54^\circ$ , altura de interrampa  $hr = 30.00$  m. y altura global  $ho = 51.85$  m.; así se lograría mejorar los aspectos de desbroce de roca relacionados con la perforación y voladura, utilizando taladros de perforación inclinados (por el buzamiento en contra de la cara libre) para mejores desplazamientos desde la cara libre para la formación de la pila de escombros (desbroce y seleccionamiento de la roca).

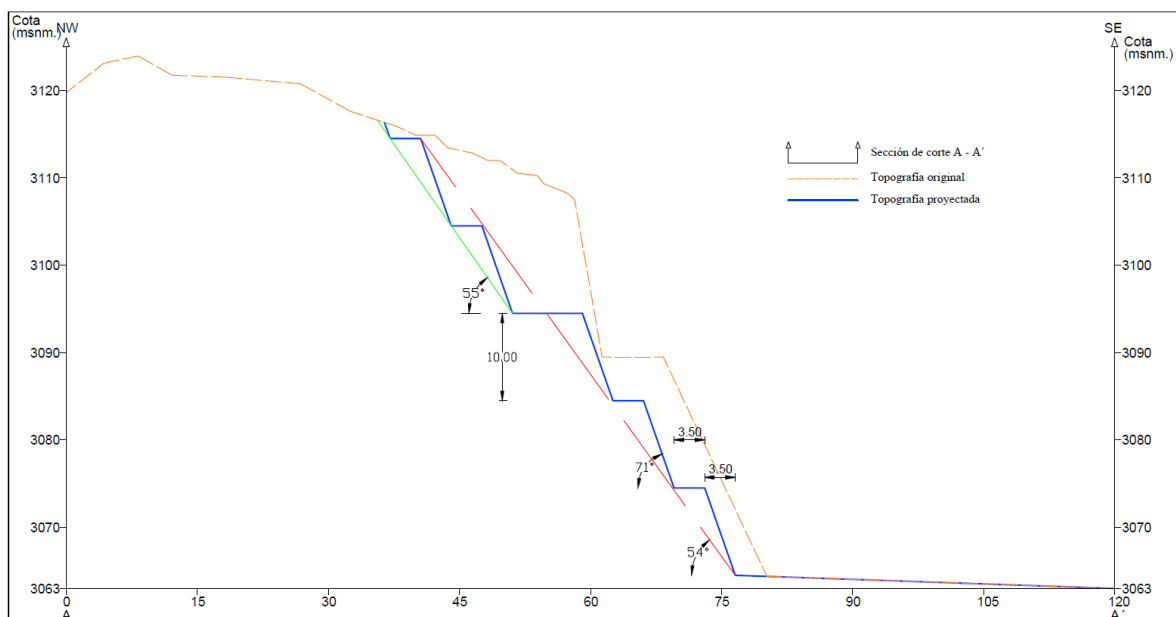


Figura 3.33. Parámetros de rediseño del tajo para optimizar el método de explotación en la Calera Bambamarca S.A.C.



Figura 3.34. Tajo de explotación de la Calera Bambamarca S.A.C., ubicado en la parte superior de las instalaciones mineras.

### **3.7 OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN BASADO EN CRITERIOS GEOMECÁNICOS**

#### **3.7.1 FUNDAMENTACIÓN GEOMECÁNICA DEL DISEÑO OPTIMIZADO**

La optimización del método de explotación en la cantera de caliza se estableció a partir de la caracterización geomecánica del macizo rocoso, cuyos parámetros fueron determinados mediante clasificación RMR (Bieniawski, 1989), estimación de GSI (Hoek y Marinos, 2000) y aplicación del criterio de rotura de Hoek–Brown con conversión equivalente a Mohr–Coulomb para fines de diseño ingenieril (Hoek, Carranza-Torres y Corkum, 2002).

Parámetros obtenidos

- RQD = 58.20 % – 91.12 %
- RMR = 53 – 87
- GSI = 48 – 83
- $\sigma_{ci}$  = 150 – 182 MPa

- $\sigma_{cm} = 15.576 - 62.077 \text{ MPa}$
- $c = 5.178 - 15.435 \text{ MPa}$
- $\varphi = 22.76^\circ - 37.12^\circ$

Con estos parámetros se adoptaron valores equivalentes de diseño:

- $c = 9.5 \text{ MPa}$
- $\varphi = 30^\circ$
- $\gamma = 0.026 \text{ MPa/m}$

### 3.7.2 OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL BANCO

a) Determinación del ángulo individual

El factor de seguridad frente a falla planar fue evaluado mediante la formulación clásica de equilibrio límite para deslizamiento en plano (Hoek y Bray, 1981)::

$$FS = \frac{c + (YH \cos^2 \beta) \tan \Phi}{YH \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

Considerando:

- $FS = 1.3$
- $H = 10 \text{ m}$
- $\beta = 71^\circ$

El diseño cumple:

$$FS \geq 1.3$$

valor mínimo recomendado para taludes en condición operativa según Hoek y Bray (1981).

b) Reducción del esfuerzo vertical inducido

$$\sigma_v = YH \quad (2)$$

expresión derivada del estado tensional gravitacional en medios continuos (Jaeger, Cook y Zimmerman, 2007).

Diseño original (25 m):

$$\sigma_v = 0.026 (25) = 0.65 \text{ MPa}$$

Reducción:

$$\frac{0.65 - 0.26}{0.65} \times 100 = 60\%$$

La disminución del 60 % en esfuerzo inducido reduce la probabilidad de inestabilidad estructural.

### 3.7.3 CONFIGURACIÓN GLOBAL DEL TAJO

Altura total proyectada:

$$H_{total} = 51.85 \text{ m} \quad (3)$$

Número de bancos:

$$n = \frac{51.85}{10} = 5$$

Proyección horizontal total:

$$L = 34.70 \text{ m}$$

(Brady y Brown, 2006)

Ángulo global:

$$\tan \beta_g = \frac{51.85}{34.70}$$

$$\beta_g = 56.5^\circ$$

Se adopta conservadoramente:

$$\beta_g = 54^\circ$$

### 3.7.4 EVALUACIÓN TÉCNICO – OPERATIVA DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

#### 3.7.4.1 OPTIMIZACIÓN EN PERFORACIÓN Y VOLADURA

Longitud total de taladro se calculó como (Langefors y Kihlström, 1978):

$$L_t = H_b + J \quad (4)$$

Subperforación:

$$J = 0.10 (10) = 1m$$

$$L_t = 11m$$

Comparación de carga lineal:

$$\frac{Q_{opt}}{Q_{orig}} = \frac{10}{25} = 0.4$$

La energía por taladro se reduce al 40 % respecto al diseño original, generando:

- Mejor control de fragmentación
- Menor sobre-rotura
- Disminución de vibraciones
- Reducción de reproceso

#### 3.7.4.2 OPTIMIZACIÓN DE CARGUÍO

La producción horaria del equipo de carguío se estimó mediante el modelo de rendimiento de equipos mineros (Hartman y Mutmansky 2002).

$$P_h = C_b \times F_f \times N_c \times p \quad (5)$$

La mejora en fragmentación incrementa el factor de llenado ( $F_f$ ) y reduce tiempo de ciclo, aumentando rendimiento real sin cambiar equipo.

### 3.7.4.3 OPTIMIZACIÓN DE ACARREO

Producción diaria base:

$$P_d = 135TM/día$$

Capacidad volquete = 15 TM

$$\frac{Viajes}{día} = \frac{135}{15} = 9$$

(Hartman y Mutmansky, 2002)

La explotación por 5 niveles permite:

- Accesibilidad progresiva
- Mejor maniobrabilidad
- Reducción de pendientes críticas
- Mayor seguridad operativa

### 3.7.5 OPTIMIZACIÓN PRODUCTIVA FUNDAMENTEADA TÉCNICAMENTE

El tiempo efectivo de operación se define como (Hustrulid y Kuchta, 2006):

$$T_e = T_t - T_i \quad (6)$$

La reducción de:

- Limpieza post-voladura
- Paralizaciones por caída de bloques
- Retrabajos por mala fragmentación

Disminuye  $T_i$ , incrementando el tiempo efectivo.

Se proyecta conservadoramente una mejora del 8 % en eficiencia operativa.

- **Producción optimizada:**

$$P_{d,opt} = 135 \times 1.08 = 146 TM/día$$

Producción anual:

$$P_{d,opt} = 146 \times 300 = 43,740 \text{ TM/año}$$

Incremento anual:

$$\Delta P = 43,740 - 40,500 = 3,240 \text{ TM/año}$$

### **3.7.6 IMPACTO ECONÓMICO ESTIMADO DE LA OPTIMIZACIÓN**

Considerando:

Precio promedio = \$120 por TM

$$\text{Ingreso adicional} = 3,240 \times 120$$

$$\text{Ingreso adicional} = 388,800 \text{ USD/año}$$

Este incremento económico se obtiene sin ampliar reservas, sin incrementar capacidad instalada ni modificar el mercado objetivo, sino exclusivamente mediante la optimización técnico-operativa basada en criterios geomecánicos.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### 4.1.1 RESULTADOS DEL CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO

El cartografiado geológico realizado en la cantera Calera Bambamarca S.A.C. permitió identificar una caliza masiva con variaciones locales de fracturamiento, controlada por tres familias principales de discontinuidades con orientaciones promedio  $23^{\circ}/58^{\circ}$ ,  $76^{\circ}/320^{\circ}$  y  $55^{\circ}/238^{\circ}$ . La persistencia varía desde  $<1$  m hasta  $>15$  m, con aperturas entre 1 y 7 mm y rellenos de arcilla, calcita y óxidos. La familia D-2 ( $76^{\circ}/320^{\circ}$ ) presenta buzamiento alto y dirección subparalela al frente de explotación original, generando condiciones geométricas desfavorables para estabilidad. Esta configuración estructural introduce anisotropía mecánica significativa, condicionando los mecanismos potenciales de falla planar y por cuña en los taludes desarrollados.

Cuadro 4.1. Sistemas estructurales identificados en el tajo Calera Bambamarca S.A.C.

Sistema	Tipo estructural	Dirección (°)	Buzamiento (°)	Persistencia	Apertura	Relleno
D-1	Discontinuidad	$23^{\circ}$	$58^{\circ}$	$<1$ m a $>10$ m	1–5 mm	Arcilla / Calcita
D-2	Discontinuidad	$76^{\circ}$	$320^{\circ}$	$>5$ m a $>15$ m	2–7 mm	Calcita / Óxidos
E	Estratificación (plano primario)	$55^{\circ}$	$238^{\circ}$	Alta continuidad	1–4 mm	Arcilla / Óxidos

#### 4.1.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

Los valores obtenidos de RQD (58.20 % – 91.12 %), RMR (53 – 87) y GSI (48 – 83) clasifican el macizo como calidad regular a buena, con variabilidad espacial entre estaciones geomecánicas. La resistencia a compresión simple de roca intacta se estimó entre 150 y 182 MPa (roca R5), sin embargo, la resistencia global del macizo ( $\sigma_{cm}$ ) disminuye a un rango entre 15.576 y 62.077 MPa debido al efecto de discontinuidades y disturbación ( $D < 1$ ). Los parámetros equivalentes obtenidos ( $c = 5.178 - 15.435$  MPa;  $\phi = 22.76^\circ - 37.12^\circ$ ) reflejan un comportamiento controlado más por fricción estructural que por cohesión intacta.

En consecuencia, aunque el macizo presenta buena resistencia intacta, su comportamiento global está condicionado por la interacción entre calidad estructural y orientación de discontinuidades, lo que justifica la necesidad de evaluar cinemáticamente la estabilidad del talud bajo la geometría existente.

El análisis cinemático mediante proyección estereográfica permitió determinar los siguientes porcentajes de probabilidad de ruptura:

Cuadro 4.2. Probabilidad de ruptura de las estaciones de la cantera Bambamarca S.A.C

ESTACIÓN	PROBABILIDAD DE RUPTURA					
	PLANAR		CUÑA		VUELCO	
	%	Condición	%	Condición	%	Condición
EG-01	26.67	Alto	28.92	Alto	0	Bajo
EG-02	15.56	Bajo	15.35	Bajo	0	Bajo
EG-03	12.20	Bajo	30.24	Crítico	0	Bajo
EG-04	26.83	Alto	6.34	Bajo	34.2	Crítico

El rediseño propuesto responde directamente a las condiciones estructurales y geomecánicas identificadas, configurando un esquema geométrico que reduce la exposición a planos críticos y mejora el margen de seguridad sin comprometer la continuidad productiva.

#### 4.1.3 RESULTADOS DEL REDISEÑO GEOMÉTRICO

El diseño original presentaba alturas de banco de 25.12 m y 18.00 m, ancho de berma de 7.00 m, quebraduras variables (11.85 m y 3.14 m) y ausencia de un ángulo técnico definido. La altura global alcanzaba aproximadamente 51.85 m sin subdivisión estructural adecuada. Esta geometría generaba mayor superficie expuesta a las discontinuidades críticas, incrementando la probabilidad de desprendimientos locales y daño inducido por voladura. La configuración empírica favorecía sobre-rotura, fragmentación heterogénea y acumulación irregular de escombros, afectando estabilidad residual del talud.

Cuadro 4.3. Parámetros del talud original de la cantera Bambamarca S.A.C

PARÁMETRO	VALOR	CONDICIÓN
altura de banco	18.00 - 25.00m	Excesiva para macizo RMR 53-87; favorece la continuidad de planos críticos y aumenta probabilidad de falla planar - cuña.
ancho de berma	7.00m	Amplia, no optimiza relación estabilidad - economía.
quebradura	3.14 - 11.85 m	Variable e inconsistente; incrementa exposición estructural y sobre-rotura por voladura.
altura global	51.85	Sin subdivisión técnica adecuada; favorece mecanismos de falla.
producción diaria	135tm/día	Estable, pero con potencial de mejora mediante optimización geomecánica.

El rediseño propuesto establece una altura de banco uniforme de 10.00 m, buzamiento de talud individual de 71°, ancho de berma de 3.50 m, quebradura de 3.50 m, ancho de rampa de 8.00 m, ángulo interrampa de 55° y ángulo global de

54°, con altura global de 51.85 m. La reducción de altura disminuye el esfuerzo vertical inducido de 0.65 MPa (25 m) a 0.26 MPa (10 m), representando una reducción del 60 %. La subdivisión en cinco bancos mejora el control estructural, reduce continuidad de planos críticos y disminuye el %PF observado en estaciones con paralelismo estructural.

Con el nuevo ángulo individual de 71° y global de 54°, se elimina el paralelismo crítico identificado entre el talud original y la discontinuidad D-2 en EG-04. La incorporación de bermas funcionales de 3.50 m actúa como elemento de retención de bloques y disipación de energía. La altura de interrampa de 30.00 m limita el desarrollo de fallas de gran escala, restringiendo la propagación de mecanismos de cuña. En términos estructurales, el rediseño reduce la exposición simultánea a múltiples familias de discontinuidades, mejorando el comportamiento global del talud a mediano y largo plazo.

Cuadro 4.4. Parámetros del talud optimizado de la cantera Bambamarca S.A.C

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>CONDICIÓN</b>
Altura de banco	10m	Reduce esfuerzo vertical inducido en 60% (0.65 → 0.26 MPa); limita continuidad de planos críticos y disminuye %PF
Buzamiento de talud	71°	Compatible con $c = 5.178\text{--}15.435$ MPa y $\varphi = 22.76^\circ\text{--}37.12^\circ$ ; mantiene $FS \geq 1.3$ en condición operativa
Quebradura	3.50m	Controlada; disminuye sobre-rotura y daño por voladura; mejora estabilidad local
Ancho de berma	3.50m	Optimiza relación seguridad–economía
Angulo de Interrampa	55°	Reduce paralelismo con juntas D-1 y D-2; mejora estabilidad intermedia
Angulo global	54°	Incrementa el margen de seguridad global
Altura global	51.85m	Mantiene capacidad productiva con mejor control estructural mediante subdivisión en 5 bancos

La modificación geométrica propuesta (altura de banco = 10 m, ángulo individual = 71°, ángulo global = 54° e interrampa = 55°) genera una reducción

cualitativa significativa del porcentaje de probabilidad de falla (%PF) identificado en el análisis cinemático original. En el diseño empírico anterior, el paralelismo estructural entre el talud y la familia D-2 ( $76^{\circ}/320^{\circ}$ ) favorecía condiciones críticas en EG-04 (vuelco 34.2 %) y altas probabilidades de falla planar y por cuña en EG-01 y EG-03 (26.67–30.24 %).

Con el nuevo ángulo global de  $54^{\circ}$ , se rompe el paralelismo crítico con D-2, reduciendo la ventana cinemática de deslizamiento y, por consiguiente, disminuyendo la intersección de polos dentro de las zonas de falla potencial en el estereograma. Asimismo, la subdivisión en cinco bancos de 10 m limita la continuidad estructural vertical de planos persistentes ( $>15$  m), restringiendo el desarrollo de mecanismos de cuña de gran volumen.

La incorporación de bermas funcionales de 3.50 m actúa como elemento de disipación de energía y retención de bloques, lo que reduce la probabilidad de propagación progresiva de fallas locales hacia una inestabilidad global. En términos cualitativos, las estaciones que inicialmente presentaban condición “Alta” o “Crítica” tenderían a migrar hacia rangos “Moderados” o “Bajos”, debido a la disminución del paralelismo geométrico y del esfuerzo vertical inducido (reducción aproximada del 60 %).

Esta disminución del esfuerzo inducido representa una mejora estructural cuantificable que refuerza el control preventivo del talud frente a mecanismos de falla previamente identificados.

Por tanto, el rediseño no solo optimiza la geometría operativa, sino que transforma un sistema estructuralmente reactivo en uno preventivamente controlado, reduciendo la probabilidad de activación de mecanismos planar, cuneiforme y de vuelco a mediano y largo plazo.

La producción nominal actual es de 135 TM/día (42,120 TM/año), con eventos de voladura que generan aproximadamente 343.44 TM por disparo. La reducción de alturas y control de quebradura a 3.50 m mejora la fragmentación y disminuye saneos posteriores. Si la eficiencia operativa aumenta entre 5 % y 8 %, la producción efectiva podría incrementarse a un rango de 142–146 TM/día,

representando aproximadamente 3,000 TM adicionales por año sin incorporar nuevos equipos. Considerando reservas de 769,323.92 TM y vida útil estimada de 18.27 años, esta mejora impacta positivamente la rentabilidad sin modificar el esquema operativo principal.

En perforación y voladura, el uso de taladros de 15 pies (4.57 m), burden y espaciamiento de 1.00 m y 12 taladros por disparo generaba daño radial entre 0.50 y 0.65 m en el diseño original. Con bancos de 10 m, la energía se distribuye de forma más controlada, reduciendo sobre fracturación y preservando cohesión estructural. Operativamente, la retroexcavadora trabaja en un frente más estable y las bermas de 3.50 m disminuyen riesgo de caída sobre zona de carguío. El volumen de desmonte estimado de 29,311.67 TM ( $\approx 272$  viajes de volquete de 20.25 TM) puede reducirse al minimizar sobreexcavación y caída de bloques. Así, la optimización geomecánica se traduce en mejoras técnicas y operativas indirectas, sin desplazar el eje central de la investigación.

#### **4.1.4 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN BASADO EN CRITERIOS GEOMECÁNICOS**

La optimización del método de explotación en la cantera Calera Bambamarca S.A.C. se obtuvo como resultado integral de la aplicación de criterios geomecánicos al diseño geométrico del talud, lo que permitió mejorar simultáneamente la estabilidad estructural, el desempeño operativo y la eficiencia productiva.

Desde el punto de vista técnico, la reducción de la altura de banco de 25 m a 10 m generó una disminución del 60 % en el esfuerzo vertical inducido (de 0.65 MPa a 0.26 MPa), limitando la continuidad vertical de discontinuidades persistentes mayores a 15 m y reduciendo la exposición simultánea a planos críticos identificados en el análisis cinemático. El nuevo ángulo individual de  $71^\circ$  y el ángulo global conservador de  $54^\circ$  eliminan el paralelismo estructural previamente observado entre el talud original y la familia D-2 ( $76^\circ/320^\circ$ ), disminuyendo la

probabilidad de activación de mecanismos de falla planar, cuña y vuelco registrados en las estaciones EG-01 y EG-04.

En el ámbito operativo, la subdivisión del talud global de 51.85 m en cinco bancos de 10 m permitió un control independiente por nivel, mejorando la accesibilidad progresiva y la maniobrabilidad de equipos. La reducción de la longitud de taladro y de la carga lineal por disparo al 40 % respecto al esquema original favoreció una fragmentación más homogénea, menor sobre-rotura y reducción de reprocesos post-voladura. Asimismo, la incorporación de bermas funcionales de 3.50 m incrementa la retención de bloques y mejora la seguridad operativa sin afectar la continuidad productiva.

Desde el punto de vista productivo, la mejora en la calidad de fragmentación y la disminución de tiempos improductivos asociados a saneos, limpieza y paralizaciones por inestabilidad permitieron proyectar un incremento conservador del 8 % en eficiencia operativa. En consecuencia, la producción diaria pasó de 135 TM/día a 146 TM/día, elevando la producción anual de 40,500 TM/año a 43,740 TM/año. Esto representa un incremento anual de 3,240 TM.

En términos económicos, considerando un precio promedio de venta de 120 USD por tonelada, la optimización genera un ingreso adicional estimado de 388,800 USD por año, sin ampliación de reservas (769,323.92 TM), sin incremento de capacidad instalada y sin incorporación de nuevos equipos.

En conjunto, los resultados evidencian que la optimización técnico-operativa y productiva del método de explotación no deriva de una expansión del sistema, sino de la adecuación geométrica fundamentada en parámetros geomecánicos del macizo rocoso. La integración entre caracterización estructural, rediseño geométrico y ajuste operativo permitió transformar un esquema empírico en un sistema técnicamente controlado y económicamente más eficiente.

De esta manera, la optimización del método de explotación no constituye un proceso aislado, sino el resultado lógico de la caracterización geomecánica y del rediseño geométrico previamente fundamentados, integrando estabilidad,

eficiencia operativa y desempeño productivo en un único esquema técnico coherente.

## 4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las investigaciones desarrolladas por Mujica (2024), Terán (2022), Chuquimango (2024), Ortiz (2024) y Limay (2025) coinciden en que los yacimientos estudiados se encuentran emplazados en la Formación Cajamarca, compuestos por calizas de buena calidad con contenidos elevados de  $\text{CaCO}_3$  y resistencia correspondiente a roca R5. Sin embargo, aunque existe similitud litológica, se identifican variaciones estructurales significativas en la orientación de los estratos. Mientras la mayoría reporta orientaciones Az/Bz con tendencia SE ( $\text{N}40^\circ\text{--}62^\circ/\text{E}20^\circ\text{--}38^\circ\text{SE}$ ), la investigación de Castrejón (2026) presenta orientación Az/Bz  $\text{N}283^\circ/41^\circ\text{NE}$ , evidenciando una variación tectónica asociada al emplazamiento en el flanco izquierdo del sinclinal Morán. Esta diferencia geométrica implica variaciones en el comportamiento cinemático del macizo y en la relación entre discontinuidades y talud.

En términos geomecánicos, los valores obtenidos en la presente investigación (RQD 58.20%–91.12%, RMR 53–87, GSI 48–83 y  $\sigma_{ci}$  150–182 MPa) son comparables con los reportados por Ortiz (2024) y Limay (2025), quienes también clasifican el macizo como de calidad buena. No obstante, la variabilidad espacial en Calera Bambamarca genera diferencias en los parámetros equivalentes de Mohr–Coulomb ( $c = 5.178\text{--}15.435$  MPa;  $\phi = 22.76^\circ\text{--}37.12^\circ$ ), lo cual influye directamente en la respuesta resistente frente a los mecanismos de falla identificados. A diferencia de otras investigaciones que analizan el macizo de forma predominantemente resistente, el presente estudio integra explícitamente el análisis cinemático como eje central del rediseño.

En el análisis cinemático, se identifican variaciones importantes respecto a los estudios comparados, los cuales no cuantifican porcentaje de probabilidad de falla (%PF). En la Calera Bambamarca, las estaciones EG-01 y EG-04 presentan falla planar con %PF de 26.67% y 26.83% (condición alta), mientras que EG-03 presenta falla por cuña crítica con 30.24% y EG-04 registra falla por vuelco crítica

con 34.15%. Estas variaciones demuestran que, pese a tener roca de buena resistencia intacta, la estabilidad está gobernada por la orientación relativa entre discontinuidades (D-1, D-2 y D-3) y el talud original ( $73^{\circ}$ – $80^{\circ}/295^{\circ}$ – $307^{\circ}$ ). Esta situación no es reportada con igual nivel de detalle en los trabajos comparados.

En contraste con Mujica (2024) y Terán (2022), cuyos diseños presentan buzamientos de talud de  $80^{\circ}$  con ángulos globales relativamente bajos ( $27^{\circ}$ – $33^{\circ}$ ), el rediseño propuesto por Castrejón (2026) ajusta el ángulo individual a  $71^{\circ}$  y el ángulo global a  $54^{\circ}$ , reduciendo el paralelismo estructural identificado especialmente con la familia D-2 ( $76^{\circ}/320^{\circ}$ ). Esta variación geométrica modifica las ventanas cinemáticas observadas en los estereogramas, disminuyendo cualitativamente la probabilidad de deslizamiento planar y por cuña al reducir la coincidencia angular crítica.

Asimismo, en comparación con Chuquimango (2024) y Saldaña (2025), cuyos bancos varían entre 6 m y 10 m con ángulos globales de  $39^{\circ}$ – $47^{\circ}$ , el presente estudio propone una altura uniforme de 10 m sustentada en reducción del esfuerzo vertical inducido ( $0.65 \text{ MPa} \rightarrow 0.26 \text{ MPa}$ , disminución del 60%). Esta variación no solo responde a criterios productivos, sino principalmente a control estructural y reducción de continuidad de planos críticos, aspecto que diferencia metodológicamente esta investigación.

En términos volumétricos, aunque las reservas de Castrejón (2026) (440,620.80 TM sólido y 793,117.44 TM suelto) son menores que las reportadas por Mujica (2024), la producción diaria de 135 TM/día es significativamente superior a la reportada por Terán (2022) (25 TM/día). Esta variación responde al equipamiento y escala operativa, pero el rediseño propuesto permite proyectar incrementos de eficiencia de 5%–8% sin modificar el parque de maquinaria, lo cual evidencia optimización técnica indirecta derivada del análisis geomecánico.

Desde el punto de vista estructural, la principal diferencia con los estudios comparados radica en la cuantificación explícita del riesgo mediante %PF. Mientras las otras investigaciones describen calidad del macizo y parámetros geométricos, la presente tesis demuestra que incluso en roca R5 con RMR alto, pueden existir condiciones críticas de vuelco (34.15%) y cuña (30.24%) si existe paralelismo

estructural. Esta variación conceptual constituye el aporte técnico principal del estudio.

### 4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten confirmar de manera objetiva la hipótesis planteada, ya que la caracterización geomecánica del macizo rocoso en la cantera Calera Bambamarca S.A.C., mediante la evaluación de parámetros litológicos, estructurales y resistentes, constituyó la base técnica para el rediseño y optimización del método de explotación a cielo abierto.

La caracterización litológica identificó calizas mudstone–micríticas de la Formación Cajamarca con resistencia a compresión simple ( $\sigma_{ci}$ ) entre 150 y 182 MPa (clasificación R5), mientras que el análisis estructural determinó tres familias principales de discontinuidades ( $23^\circ/58^\circ$ ,  $76^\circ/320^\circ$  y  $55^\circ/238^\circ$ ), las cuales controlan el comportamiento mecánico del talud. Los índices geomecánicos obtenidos (RQD: 58.20–91.12 %, RMR: 53–87 y GSI: 48–83) evidenciaron un macizo de calidad regular a buena, cuyo comportamiento está dominado por la orientación y persistencia de sus discontinuidades.

El análisis cinemático confirmó la existencia de mecanismos potenciales de inestabilidad en el diseño original, registrándose valores de porcentaje de probabilidad de falla (%PF) de hasta 26.83 % para falla planar (EG-04), 30.24 % para falla por cuña (EG-03) y 34.15 % para falla por vuelco (EG-04). Estos resultados demostraron que la geometría original favorecía el paralelismo crítico entre la discontinuidad D-2 y el plano del talud principal, incrementando el riesgo de desprendimiento pese a tratarse de roca de alta resistencia intacta.

A partir de los parámetros equivalentes de resistencia determinados ( $c = 5.178\text{--}15.435$  MPa;  $\varphi = 22.76^\circ\text{--}37.12^\circ$ ;  $\sigma_{cm} = 15.576\text{--}62.077$  MPa), se sustentó técnicamente el rediseño geométrico del método de explotación, estableciéndose una altura de banco de 10 m, ángulo individual de  $71^\circ$ , ángulo global de  $54^\circ$ , altura de interrampa de 30 m y bermas funcionales de 3.50 m. Esta nueva configuración

elimina el paralelismo estructural crítico, limita la continuidad vertical de planos persistentes y reduce cualitativamente la probabilidad de activación de fallas planares, por cuña y por vuelco identificadas en las estaciones críticas.

Asimismo, la reducción del esfuerzo vertical inducido en 60 % (0.65 MPa → 0.26 MPa) mejora las condiciones de estabilidad local y global del talud. Desde el punto de vista técnico-operativo, la subdivisión en cinco bancos de 10 m permitió optimizar el control de voladura, disminuir la sobre-rotura, mejorar la fragmentación y reducir tiempos improductivos asociados a limpieza y saneo de taludes.

En términos productivos, la mejora en la eficiencia operativa proyectada en aproximadamente 8 % permitió incrementar la producción anual de 40,500 TM a 43,740 TM, representando un aumento de 3,240 TM por año sin ampliación de reservas ni incorporación de nuevos equipos. Considerando un precio promedio de 120 USD por tonelada, esta optimización genera un ingreso adicional estimado de 388,800 USD anuales, derivado exclusivamente de la aplicación de criterios geomecánicos al diseño del método de explotación.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis general de la investigación, al demostrarse que la caracterización geomecánica no solo permitió describir el comportamiento del macizo rocoso, sino fundamentar técnica y cuantitativamente la optimización integral del método de explotación en términos de estabilidad, seguridad, eficiencia operativa y rendimiento productivo, transformando un diseño empírico en un esquema técnicamente sustentado y económicamente más eficiente.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- El cartografiado geológico permitió establecer que la cantera Calera Bambamarca S.A.C. se emplaza en la Formación Cajamarca, constituida por bancos de caliza de 0.20 a 0.40 m de espesor, con orientación estructural promedio N283°/41°NE, asociada al flanco del sinclinal Morán. Se identificaron tres familias principales de discontinuidades que controlan el comportamiento mecánico del macizo rocoso, confirmando que la estabilidad del talud está gobernada por la anisotropía estructural y la relación geométrica entre planos de debilidad y el frente de explotación. Esta información estructural constituyó la base técnica para redefinir la orientación y geometría del talud, permitiendo eliminar el paralelismo crítico identificado en el diseño original y sentando el fundamento para la optimización integral del método de explotación.

- La caracterización geomecánica evidenció que el macizo presenta calidad variable entre regular y buena (RQD: 58.20 % – 91.12 %; RMR: 53 – 87; GSI: 48 – 83). Aunque la resistencia de la roca intacta alcanza valores elevados (150 – 182 MPa, R5), la resistencia equivalente del macizo disminuye (15.576 – 62.077 MPa) debido a la presencia de discontinuidades persistentes. Los parámetros equivalentes obtenidos ( $c = 5.178 - 15.435$  MPa;  $\varphi = 22.76^\circ - 37.12^\circ$ ) demostraron que el comportamiento resistente está dominado por fricción estructural. El análisis cinemático identificó probabilidades de falla de hasta 34.15 % en el diseño original, evidenciando condiciones críticas de estabilidad. Estos resultados justificaron técnicamente la necesidad de rediseño geométrico y permitieron establecer criterios de seguridad con  $FS \geq 1.3$ , integrando la geomecánica como eje central de la optimización del método de explotación.

- El rediseño geométrico propuesto (altura de banco = 10 m; buzamiento individual = 71°; ángulo global = 54°; interrampa = 55°; bermas de 3.50 m) redujo el esfuerzo vertical inducido en aproximadamente 60 % (0.65 MPa → 0.26 MPa), limitó la continuidad de planos persistentes y disminuyó cualitativamente la probabilidad de falla planar, por cuña y por vuelco. Esta modificación geométrica permitió optimizar el método de explotación no solo desde el punto de vista de estabilidad, sino también en términos técnico–operativos, mejorando el control de voladura, la fragmentación y la continuidad de trabajo por niveles independientes. Como resultado, se proyecta un incremento de eficiencia operativa del orden del 8 %, elevando la producción anual de 40,500 TM a 43,740 TM (3,240 TM adicionales por año), lo que representa un impacto económico estimado de 388,800 USD anuales sin modificar reservas ni capacidad instalada. Se confirma así que la caracterización geomecánica permitió fundamentar un rediseño técnicamente sustentado que optimiza integralmente la seguridad, operación y productividad de la cantera

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda que la empresa actualice periódicamente el cartografiado geológico–estructural conforme avance la explotación, incorporando nuevas mediciones de orientación, persistencia y espaciamiento de discontinuidades, así como el registro sistemático de la estratificación subparalela (E). La actualización continua del modelo estructural permitirá detectar cambios en la geometría del macizo y anticipar zonas potencialmente críticas antes de su exposición completa, fortaleciendo el control preventivo de la estabilidad.
- Se recomienda complementar la caracterización geomecánica con ensayos de laboratorio en muestras representativas de roca intacta (resistencia a compresión simple, tracción indirecta y módulos elásticos), así como con pruebas in situ cuando sea posible. La obtención de parámetros mecánicos directos permitirá calibrar con mayor precisión los valores utilizados en el criterio de Hoek–Brown y en la conversión a parámetros equivalentes de Mohr–

Coulomb, incrementando la confiabilidad de los análisis de estabilidad para futuras ampliaciones del tajo.

- Se recomienda implementar progresivamente el diseño geométrico optimizado propuesto en la investigación, respetando los parámetros establecidos (altura de banco de 10 m, ángulo individual de 71°, ángulo global de 54°, interrampa de 55° y bermas de 3.50 m), y acompañar su aplicación con un programa de monitoreo geotécnico continuo. La validación en campo del desempeño del nuevo diseño permitirá verificar la reducción efectiva del porcentaje de probabilidad de falla (%PF), consolidar un esquema de explotación preventivo y garantizar estabilidad técnica y operativa a mediano y largo plazo.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Alomalisa, J., y Villamar, K. (2018). *Optimización de explotación de caliza en la concesión minera “Perla del Pacífico” ubicada en la comuna San Antonio, cantón General Villamil, provincia del Guayas – Ecuador* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Asobanca. (2022). *Guía de minas y canteras de material pétreo*. Quito – Ecuador: Copyright.
- Batista, J., Blanco, G., y Nevado, J. (2012). *Propuesta de un Manual para la evaluación de taludes. Guayana – Venezuela*. Recuperado de <http://catalogo-gy.ucab.edu.ve/documentos/tesis/aab3868.pdf>
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Pennsylvania - USA: John Wiley & Sons.
- Brady, BHG; Brown, ET. 2006. *Rock mechanics for underground mining*. 3 ed. Dordrecht, NL. Springer. 628 p.
- Alvear, C., López, M., Pindo, J., Proaño, G. (2021). *Diseño y análisis económico de la explotación a cielo abierto de un yacimiento de caliza*. Pág.: 1 a 8, Guayaquil – Ecuador: Campus Gustavo Galindo.
- Calderón, A., Huamán, M., y Segura, J. (2021). *Evaluación de las canteras de travertino de la provincia de Huancayo, región Junín* (Tesis de pregrado). Universidad Continental – Facultad de Ingeniería – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Cantera Carranza y Karrantza Harrobiu (2017). *Proyecto de explotación de la cantera Ventalaperra*. Vasco – España: INGEOTYC, S.L.
- Catari, P., Barriga, C., Villanueva, C., Gomez, J., Alvarado H., Melgar., Chirinos, E. (2025). *Optimización del diseño de talud en minería superficial mediante el método de elementos finitos*. *Revista digital de ciencia ingeniería y tecnología – Novasinerгия*. Universidad Nacional DE Chimborazo. ISSN: 2631-2654, 8(1), pág.: 33 - 51. Recuperado de <https://doi.org/10.37135/ns.01.15.09>

- Consuelo, Y. (2022). *Caracterización geomecánica de la pared oeste del tajo abierto Toromocho, Mina Chinalco* (Tesis de pregrado) Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Recuperado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/0bc4545a-2687-4b9d-8f97-e2a961bca219>
- Chuquimango, J. (2024). *Análisis geomecánico del tajo de explotación de la Minera Nueva Unión E.I.R.L. - distrito, provincia Hualgayoc – departamento Cajamarca* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.
- Dávila, B. (2011). *Diccionario geológico*. Callao – Perú: INGEMMET.
- Deere, D., Hendron, A., Patton, F., y Cording, E. (1967). *Design of surface and near surface construction in rock*. Failure and Breakage of Rock, Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mech., Ed: C. Fairhurst, págs. 237-302.
- El Clima y el tiempo promedio en todo el año en BambamarcaPerú, 2025. Consultado 15 oct. 2025. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/19981/Clima-promedio-en-Celend%C3%ADn-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- MDGD, (2018). *Perfil de mercado de la caliza*. Estados Unidos: Secretaria de economía.
- Gavilanes, J., y Andrade, H. (2004). *Introducción a la Ingeniería de Túneles: Caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizo rocoso*. Quito – Ecuador: Editorial: AIME.
- Geotecnia, (2020). *Diccionario*. Recuperado de <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/berma/>
- González, De V. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Gutiérrez, K. (2019). *Análisis y evaluación entre los métodos de explotación convencional y plataformas aplicados en la cantera de caliza de la empresa UNACEM S.A.A.* Revista Científica Redalyc – Universidad Nacional Mayor de San Marcos, ISSN: 1560-9146 (Impreso), Industria Data, vol 22, pág.: 26 a 36.
- Hartman, HL; Mutmanský, JM. 2002. *Introductory mining engineering*. 2 ed. New York, US. John Wiley & Sons. 570 p.

- Herrera, J. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. Madrid – España: Copyright.
- Herrera, J. (2007). *Diseño de explotaciones de cantera*. Madrid – España: Copyright.
- Herrera, J., y Ortiz, F. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. Madrid – España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). *The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463.
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B. 2002. Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC 2002). Toronto, Canada. p. 267–273
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2005). *Empirical Estimation of Rock Mass Modulus*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 203-215
- Hoek, E.; Bray, J. 1981. *Rock slope engineering*. 3 ed. London, UK, The Institution of Mining and Metallurgy. 358 p.
- Hoek, E., y Brown, E. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, pp. 1165-1186.
- Hoek, E; Marinos, P. 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels & Tunnelling International* 32(11): 45–51.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., y Martin, R. (2013). *Open pit mine planning & design*. *Editorial: CRC Press, Taylor & Francis Group, an informa business* Boca Raton, London, New York y Leiden. Tercera edición. volumen 1 – fundamentos.
- Jaeger, JC; Cook, NGW; Zimmerman, RW. 2007. *Fundamentals of rock mechanics*. 4 ed. Oxford, UK. Blackwell Publishing. 475 p.
- Jaimes, F., Navarro, J., y Santos, A. (2013). *Mapa geológico del cuadrángulo de Chota, escala 1/50,000 hoja 15-f cuadrante – I*. Lima - Perú: Ingemmet. Recuperado de <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

- Jaeger, JC; Cook, NGW; Zimmerman, RW. 2007. *Fundamentals of rock mechanics*. 4 ed. Oxford, UK. Blackwell Publishing. 475 p.
- Langefors, U; Kihlström, B. 1978. *The modern technique of rock blasting*. 3 ed. New York, US. John Wiley & Sons. 438 p.
- Limay, M. (2025). *Evaluación geomecánica para determinar la inestabilidad del Tajo Bendición de Dios E.I.R.L., distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.
- Marinos, P; Hoek, E. 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne, AU. p. 1422–1446.
- Monte, I. (2020). *Análisis de estabilidad de taludes en roca mediante el método de elemento finitos* (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción.
- Mujica, J. (2024). *Cálculo de reservas de las calizas de la Formación Cajamarca para la obtención de óxidos de calcio (CaO) distrito de Jorge Chávez – Celendín* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Murillo, J. (2022). *Proceso de implementación del método de plataformas secuenciales para la explotación de caliza en la concesión minera Conchoc-2022* (Tesis de pregrado). Universidad Continental – Facultad de Ingeniería – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- NACAP. (2022). *Extracción mina II: Apuntes carguío y transporte*. Viña del Mar Valparaiso – Chile: Área minería y metalurgia.
- Ortiz, J (2024). *Evaluación geomecánica para mejorar el diseño de los bancos de explotación de multiservicios Pirámides de Oro SRL, distrito, provincia Hualgayoc departamento de Cajamarca* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.

- Osinermin. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Magdalena del Mar, Lima - Perú: Edición: INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Pacheco, C., y Pozzobon, E. (2011). *Manual de ejercicios de laboratorio: Fotogrametría y fotointerpretación 1ra Edición*. Merida – Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Piña, A. (2006). *Métodos de explotación de yacimientos superficiales*. Recuperado de:  
<http://transport.world-aluminium.org/facts/responsible-mining.html>
- Quintana, E., y Navarro, A. (2022). *Utilización de un sistema de medición del riesgo de caída de rocas en la fase operativa en el camino de Atlas Cumbes, sierra Chica, Córdoba, Argentina*. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 48, pág.: 37 – 39. Buenos Aires – Argentina: Utilización de un sistema de medición de riesgo.
- Ramírez, O., y Alejano, M. (2013). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Universidad Politécnica de Madrid y en la de Vigo, en el Master Internacional. Recuperado de:  
[http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA\\_DE\\_ROCAS\\_1.pdf](http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf)
- Ramírez, P., De La Cuadra, L., Laín, R., y Grijalbo, E. (2008). *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. Instituto geológico y minero de España.
- RC. (2003). *Glosario técnico minero*. Bogotá – Colombia. Ministerio de minas y energía.
- Read, J., y Stacey, P. 2009. *Guidelines for: Open pit slope design*. Austria: CSIRO PUBLISHING – CRC.
- Revollar, O. (2021). *Diseño conceptual de la explotación a tajo abierto del cuerpo de hierro Toro Negro, sector Petra de Sociedad Mineta de Responsabilidad Limitada Yale II* (Tesis de pregrado). Universidad Continental – Facultad de Ingeniería – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Saldaña, L. (2025). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso para la determinación del método de explotación de mármol en el distrito de Jorge Chávez Celendín* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca

– Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.

- Senamhi. (2022). *Datos hidrometeorológicos en Cajamarca: Estación San Marcos*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=cajamarca&p=estaciones>
- Teran, D. (2022). *Evaluación geotécnica y diseño del tajo Esmael de la empresa Cal Plus, concesión Colquirrumi 49-C. distrito, provincia de Hualgayoc – Cajamarca* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.
- Ubaldo, M., Cabaleri, N., Cozzi, Guillermo., Castro, S., Bechis, F., Juárez, P., y Cagnomi, M. (2023). *Caracterización de las calizas del Noroeste del Chubut*. Buenos Aires – Argentina: SEGEMAR y IGRN. ISSN 2618-5032.
- Wilson, J. (1984). *Boletín N°31 Serie A. Carta Geológica Nacional: Geología de los cuadrángulos de Jayanca, Incahuasi, Cutervo, Chiclayo, Chongoyape, Chota, Celendín, Pacasmayo, Chepén*. Lima – Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Wyllie, D., y Mah, C. (2004). *Ingeniería civil y minería de taludes rocosos. Ingeniería de taludes rocosos*. Reino unido – Londres. Spon Press - Grupo Taylor & Francis

**ANEXO A**  
**AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA**

**CALERA BAMBAMARCA S.A.C.**

RUC: 20570836111

Provincia de Hualgayoc, Distrito de Bambamarca

Dirección legal: Jr. Jorge Chávez N° 470, Bambamarca, Hualgayoc, Cajamarca.

---

**Bambamarca, [02 de Junio del 2025]**

**ASUNTO:** Autorización para realización de tesis

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente, **CALERA BAMBAMARCA S.A.C.**, con RUC N.º 20570836111, en calidad de titular de la **mina no metálica de caliza**, ubicada en la **provincia de Hualgayoc, distrito de Bambamarca**, autoriza al alumno **KENNETH CASTREJÓN MENDOZA con DNI 71928291**, estudiante de la **Universidad Nacional de Cajamarca**, a realizar estudios e investigaciones en nuestras instalaciones con el fin de desarrollar su **proyecto de tesis universitaria**.

Este permiso es concedido bajo la supervisión del personal de la empresa, y con el compromiso del alumno de respetar las normas internas de seguridad, confidencialidad y conducta durante el tiempo que dure su investigación.

Asimismo, se deja constancia que el proyecto académico no compromete ni afecta las operaciones normales de la empresa, y que toda la información recabada será usada exclusivamente con fines académicos. En caso de requerirse publicación o difusión del contenido de la tesis, se deberá coordinar previamente con la empresa.

El presente documento es emitido con la aprobación del **Gerente General**, señor **Wilmer Edilberto Aguilar Mejía**, quien respalda el desarrollo académico del alumno mencionado.

Atentamente,



**Wilmer Edilberto Aguilar Mejía**

Gerente General

CALERA BAMBAMARCA S.A.C.

**ANEXO B**

**REGISTROS GEOMECÁNICOS**

Tabla 5.1. Registro geomecánico EG-01.

REGISTRO GEOLOGICO GEOTECNICO				TESIS UBICACION		CARACTERIZACION GEOMECANICA PARA OPTIMIZAR EL METODO DE EXPLOTACION EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC - CUMBRE CHONTABAMBA - BAMBAMARCA - HUAYLAYOC										BENIAWSKY RMR (1989) Superficie																
EG-01				TAJO CALERA BAMBAMARCA																												
RESPONSABLE Castrojo Mendoza Kenneth				HOJA N°		FECHA 25/09/2025																										
SISTEMA WGS 84 ZONA 17S				EJECUTADO POR Castrojo Mendoza Kenneth																												
DIS. Nro	DATA GPS			LITOLOGIA FORMAC.	MACIZO ROCOSO			TIPOS		RESIST. COMP. UNIAJ.		RCD TRAMO		ORIENTACION			ESPACIADO(m)		PERIST. (m)		ABERTURA (mm)		RUGOS.		RELLENO		ALTERAC. METEOR.		AGUA		CALIDAD DE INFORMACION	
	ESTE (m.)	NORTE (m.)	COTA (manm.)		METEOZACION	GRADO FRACT.	OSI	E=Estraficada D=Oclasa	RESIST. COMP. UNIAJ.	ND	RS	DIRECCION	Z/R	DIP	DD	1-> >2	2-> 2-0.6	1-> <1	2-> <0.1	1=Muy Rug.	2=Qp	1=Arcilloso	2=Duro<5mm	1=Infiltrada	2=Lig. Hum.	1=Seco	2=Lig. Apar.	1=Loc. Real	2=Loc. Apar.			
				1=Fresco	1=Alto	1=Blao-Regul.	F=Normal	L	35					3-> 0.6-0.2	3-> 3-10	3-> 0.1-1	3=Lig. Rug.	3=Calca	3=Duro<5mm	3=Mod. Ab.	3=Humedo	3=Loc. Proy.										
				2=Lev. Met.	2=Mediano	2=Blao-Imag.	F=Inversa	A	14.29					4-> 0.2-0.06	4-> 10-20	4-> 1-5	4=Ondulad. ltu	4=Ondos	4=Suave<5mm	4=Muy Ab.	4=Suave<5mm	4=Descomp.	5=Flujo									
				3=Mod	3=Bajo	3=Blao-Capas	F=Directa	Prom. Golpes						5-> <0.06	5-> >20	5-> >5	5=Suave	5=Roca Trbur.	5=Suave<5mm	5=Descomp.	5=Flujo											
				4=Alt. Met.		4=fract-Intens	trf=Microfalda	1 Golp	Y <sub>r</sub>																							
				5=Compf.		Agregar MB,B,M,F,MP	S=Subrees																									
							C=Contacto																									
1	769965.00	9260961.00	3090.00																													
2																																
3																																
4																																
5																																
6																																
7																																
8																																
9																																
10																																
11																																
12																																
13																																
14																																
15																																
16																																
17																																
18																																
19																																
20																																
21																																
22																																
23																																
24																																
25																																
26																																
27																																
28																																
29																																
30																																
31																																
32																																
33																																
34																																
35																																
36																																
37																																
38																																
39																																
40																																
41																																
42																																
43																																
44																																

Diseño Original: M.Sc. Victor Tolentino

Diseño Modificado: Reinaldo Rodriguez - 2017

Tabla 5.2. Registro geomecánico EG-02.

REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO				TESIS	CARACTERIZACIÓN GEOMECAÁNICA PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC - CUMBE CHONTABAMBA - BAMBAMARCA - HUALLGAYOC										BENIAWSKY RMR (1989)									
EG-02				UBICACIÓN	TAJO CALERA BAMBAMARCA										Superficie									
RESPONSABLE				TRAMO	DE	A	FECHA	25/09/2025	DE	A	DE	A	DE	A	DE	A								
SISTEMA				WGS	84	ZONA 175	EJECUTADO POR	Castrojo Mendoza Kenneth	FECHA	25/09/2025	DE	A	DE	A	DE	A								
DIS. Nro	DATA GPS			MACIZO RD060			TIPOS	RESIST. COMP. UNIA.		RQP TRAMO		ORIENTACIÓN			ESPAZIADO(m)	PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELLENO		ALTERAC. METEOR.	AGUA	CATEGORÍA DE INFORMACIÓN	
	ESTE (m.)	NORTE (m.)	COTA (msnm.)	LITOLÓGIA FOMAC.	METEZORIZACIÓN	GRADO FRACT.	OSI	E-Estratificada	$\sigma_{cl}$		ND	12	DIRECCIÓN						TIPO	DUREZA				
					1=Fresco	1=Alto	1=Blq-Regul.	D-Diáclasa	Prom. Golpas		A	7.06	2/R	DIP	DD	1=>2	1=<1	1=Nada	1=Muy Rug.	1=Arcilloso	1=Ninguna	1=Inaberrada	1=Seco	1=Lec. Real
					2=Lav. Met.	2=Mediano	2=Blq-Regul.	F=Fr. Normal	3 Golp		$\tau_p$					2=2-0.6	2=1-3	2=<0.1	2=Rugosa	2=Cs	2=Duro<5mm	2=Lig. Ab.	2=Lig. Húm.	
					3=Mod.	3=Bajo	3=Blq-Regul.	F=Fr. Inversa							3=0.6-0.2	3=3-10	3=0.1-1	3=Lig. Rug.	3=Cakita	3=Duro>5mm	3=Mod. Ab.	3=Humedo	3=Lec. Agar.	
					4=Ab. Met.		4=Fract-Intens	F=Fr. Directa							4=0.2-0.06	4=10-20	4=1-5	4=Ondulad.-L	4=Ondos	4=Suave<5mm	4=Muy Ab.	4=Gotando	4=Lec. Proy.	
					5=Comp.		5=Fract-Intens	m=Microfalla							5=<0.06	5=>20	5=>5	5=Suave	5=Blca Tritur.	5=Suave>5mm	5=Decomp.	5=Flujo		
							Agregar MB, R,M,P,MP	SE-Sobrees.											6=Be					
							C=Contacto												7=Parizo					
																			8=Veta					
																			9=Episorita					
																			10=Argonita					
																			11=Profanita					
1	769961.00	9260996.00	3090.00		1	3	1		RS (175MPa)	84.21		330	23	60	3	4	5	5	1	5	1	1	1	
2					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		328	20	58	4	5	4	5	4	3	2	1	1	
3					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		219	21	51	3	4	5	4	3	2	1	1	1	
4					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		324	18	54	3	4	5	5	4	3	2	1	1	
5					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		215	21	55	4	5	4	5	1	5	1	1	1	
6					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		328	19	58	3	4	5	4	3	2	1	1	1	
7					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		321	15	51	3	5	4	5	4	3	2	1	1	
8					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		329	23	59	4	5	4	5	1	5	1	1	1	
9					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		321	19	51	3	4	5	5	3	2	1	1	1	
10					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		320	16	50	3	4	5	4	1	5	1	1	1	
11					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		327	24	57	3	4	4	5	4	3	2	1	1	
12					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		334	17	64	4	5	5	5	1	5	1	1	1	
13					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		331	24	61	3	4	4	4	1	5	1	1	1	
14					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		324	8	54	3	5	4	5	4	3	2	1	1	
15					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		332	11	62	4	4	1	5	-	1	1	1	1	
16					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		287	83	17	3	1	4	4	1	5	1	1	1	
17					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		86	85	176	3	1	1	5	3	2	1	1	1	
18					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		84	71	174	4	1	1	5	-	1	1	1	1	
19					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		78	68	168	3	1	4	4	4	3	2	1	1	
20					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		82	75	172	3	1	4	5	1	5	1	1	1	
21					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		79	80	169	3	1	5	5	3	2	1	1	1	
22					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		91	74	181	3	1	1	5	-	-	1	1	1	
23					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		80	70	170	4	1	1	4	-	-	1	1	1	
24					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		95	76	185	3	1	5	5	4	3	2	1	1	
25					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		83	81	173	3	1	5	5	1	5	1	1	1	
26					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		81	74	171	4	1	1	5	-	-	1	1	1	
27					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		73	81	163	4	1	5	4	1	5	1	1	1	
28					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		86	76	176	3	1	1	5	-	-	1	1	1	
29					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		98	79	188	3	1	4	5	1	-	1	1	1	
30					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		80	80	170	3	1	4	5	1	5	1	1	1	
31					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		200	86	290	1	2	5	5	4	3	2	1	1	
32					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		198	82	288	2	1	4	5	3	2	1	1	1	
33					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		182	83	272	2	2	5	4	4	3	1	1	1	
34					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		190	79	280	1	1	5	5	3	2	1	1	1	
35					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		196	75	286	2	2	4	5	4	3	2	1	1	
36					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		187	81	277	3	1	5	5	4	3	2	1	1	
37					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		180	79	270	2	1	5	4	4	3	2	1	1	
38					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		198	80	288	3	2	4	5	3	2	1	1	1	
39					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		184	75	274	2	1	5	5	4	3	2	1	1	
40					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		193	73	283	1	2	5	5	4	3	2	1	1	
41					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		210	81	300	3	1	4	4	3	2	1	1	1	
42					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		208	84	298	2	2	5	5	4	3	2	1	1	
43					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		194	76	284	3	2	4	4	3	2	1	1	1	
44					1	3	1		RS (175MPa)	84.21		196	71	286	1	2	5	5	4	3	2	1	1	
									Talud			210	80	300										

Diseño Original: M.Sc. Victor Talentino

Diseño Modificado: Reinaldo Rodriguez - 2017



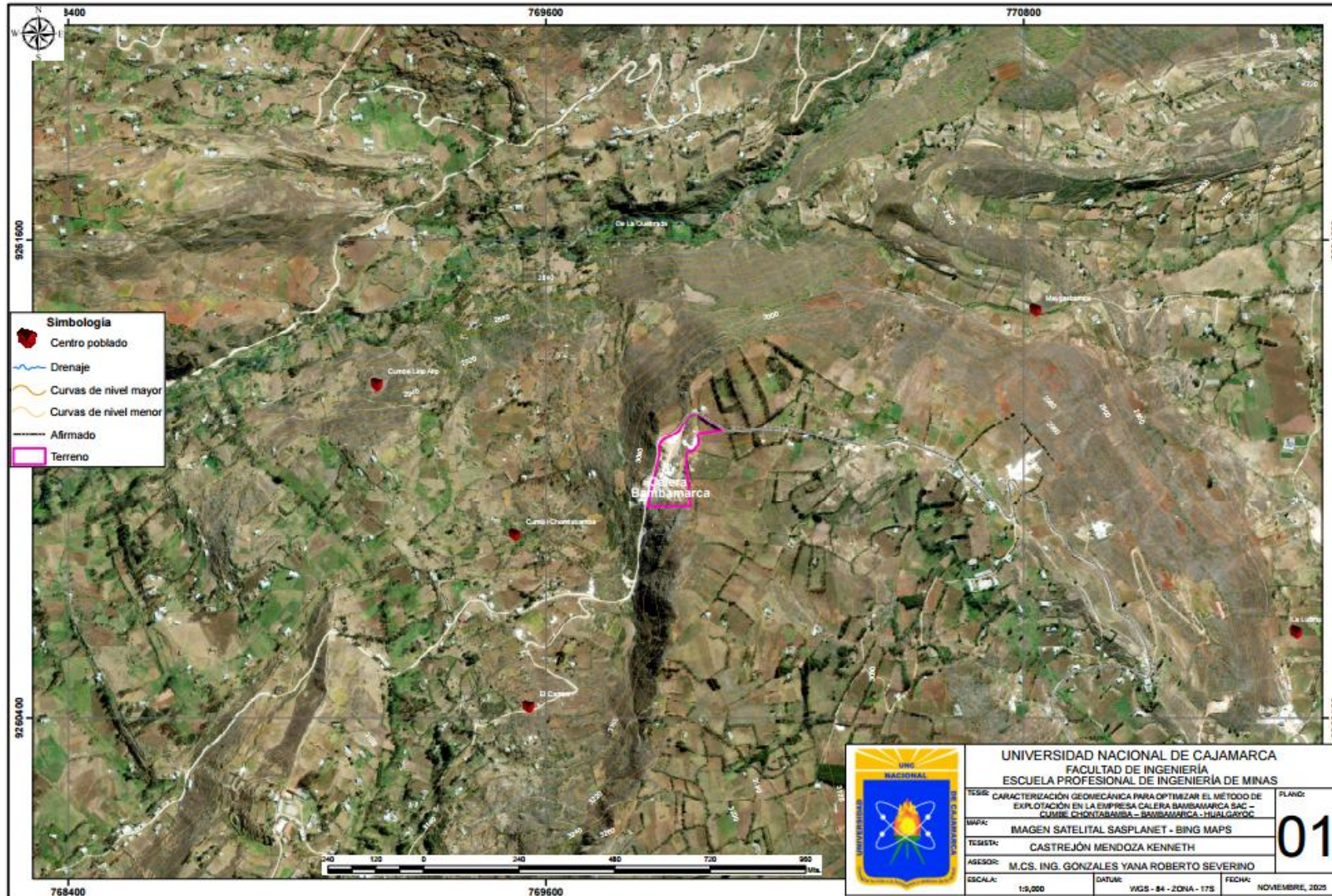
Tabla 5.4. Registro geomecánico EG-04.

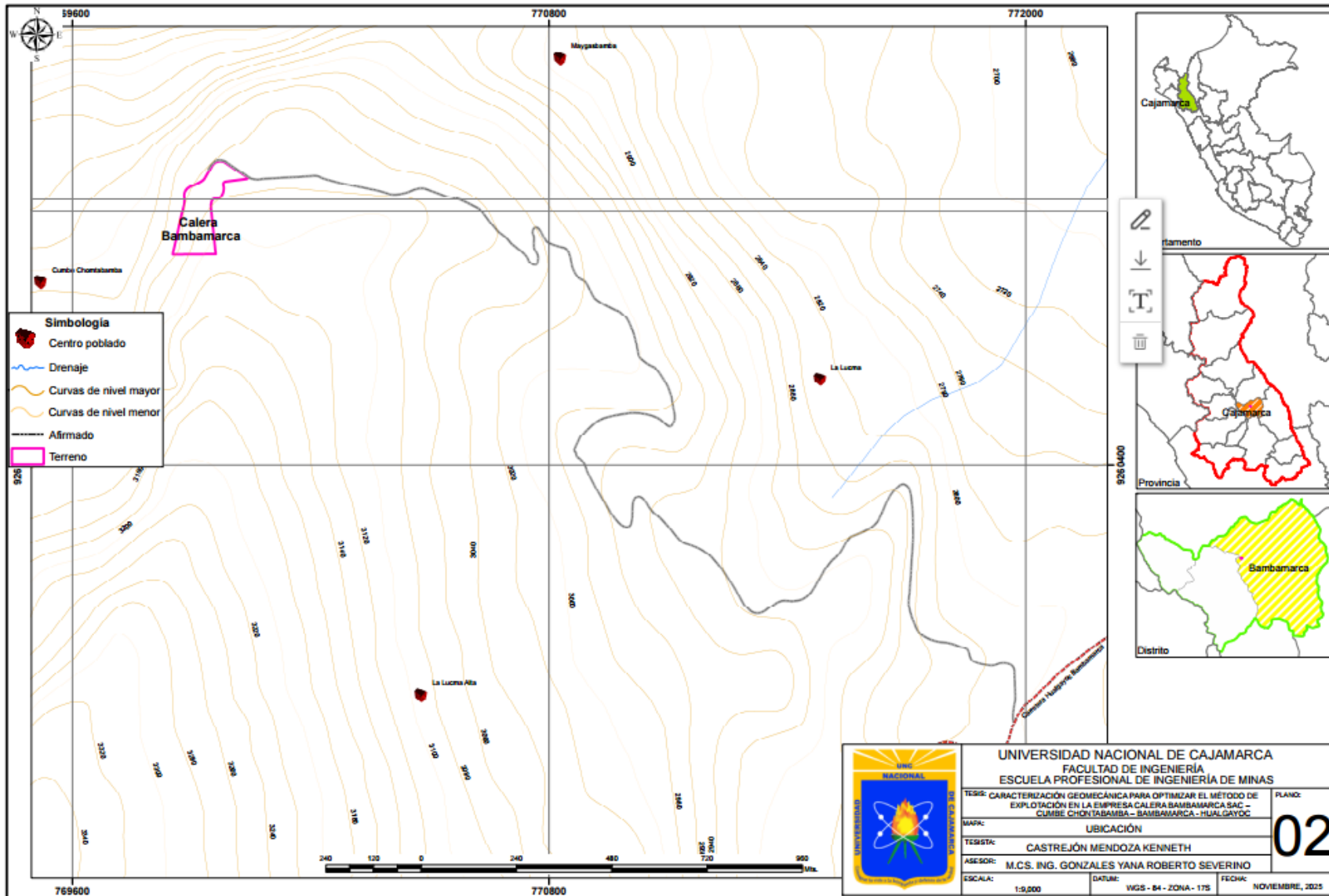
REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO				TESIS	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC - CUMBE CHONTABAMBA - BAMBAMARCA - HUALGAYOC										BENIAWSKY RMR (1989) Superficie									
UBICACIÓN				UBICACIÓN	TAJID CALERA BAMBAMARCA																			
CÓDIGO	EG-04			TRAMO																				
RESPONSABLE	Castrojin Mendoza Kenneth			HDIAN°																				
SISTEMA	WGS	84	ZONA 17S	EJECUTADO POR	Castrojin Mendoza Kenneth										FECHA			25/09/2025						
DIS. Nro	DATA GPS			MACIZO ROCOSO			TIPOS	RESIST. COMP.		RQD TRAMO		ORIENTACIÓN			ESPACIADO(m)		PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELLENO		ALTERAC. METEOR.	AGUA	CRONOL. DE INFORMACIÓN
	ESTE (m.)	NORTE (m.)	COTA (msnm.)	LITOLOGÍA FORMAC.	METFORIZACIÓN	GRADO FRACT.	GSI	E=Estratificada D=Diaclasa	σ <sub>Ci</sub>		ND L 4.62		DIRECCIÓN							TIPO		DUREZA		
					1= Fresco 2= Lev. Met. 3= Mod. 4= Alt. Met. 5= Compl.	1= Alto 2= Mediano 3= Bajo	1= Bloq. Regul. 2= Bloq. Irreg. 3= Bloq. Capas 4= Fract. Intensa m= Microfalla	F= F. Normal Fi= F. Inversa Fd= F. Directa mf= Microfalla SE= Sobres. C= Contacto	4 Golp		γ <sub>p</sub>		Z/R DIP DO							6= Bx 7= Panizo 8= Veta 9= Esponita 10= Aragonita 11= Prolusita				
1	769953.00	9261010.00	3065.00	Formación Cajamarca (Ks-ca), calizas mudstone micrítica de color gris azulada de fractura fresca.	1	3	2	E	R5 (182MPa)	92.12	336	21	66	2	3	5	4	1	5	1	1	1		
2					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	334	20	64	3	4	5	5	3	2	1	1	1	1	
3					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	328	18	58	2	3	4	4	1	5	2	1	1	1	
4					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	330	17	60	3	4	4	4	5	3	2	1	1	1	
5					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	329	14	59	2	4	5	4	1	5	1	1	1	1	
6					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	331	9	61	3	3	4	4	5	1	5	2	1	1	
7					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	325	12	55	2	4	5	4	3	2	1	1	1	1	
8					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	329	16	59	3	4	4	4	1	5	1	1	1	1	
9					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	327	19	57	2	3	5	5	1	5	1	1	1	1	
10					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	318	23	48	3	3	4	4	3	3	2	2	1	1	
11					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	327	21	57	2	4	5	5	1	5	1	1	1	1	
12					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	326	16	56	3	4	4	4	3	2	1	1	1	1	
13					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	163	64	253	3	3	1	5	-	-	1	1	1	1	
14					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	158	60	248	3	3	3	4	3	2	2	1	1	1	
15					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	155	58	245	4	2	1	4	1	5	1	1	1	1	
16					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	160	55	250	2	3	4	5	3	2	1	1	1	1	
17					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	162	61	252	3	2	1	4	-	-	1	1	1	1	
18					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	159	52	249	4	3	5	5	1	5	2	1	1	1	
19					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	152	48	242	3	2	3	4	3	2	1	1	1	1	
20					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	154	63	244	4	3	1	5	-	-	2	1	1	1	
21					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	140	59	230	3	3	4	4	1	4	1	1	1	1	
22					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	135	61	225	2	2	4	5	1	5	2	1	1	1	
23					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	146	49	236	3	3	3	5	4	5	1	1	1	1	
24					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	173	56	263	2	2	3	4	4	5	1	1	1	1	
25					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	170	57	260	3	3	1	5	-	-	1	1	1	1	
26					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	124	53	214	2	2	1	4	-	-	2	1	1	1	
27					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	52	80	142	2	1	5	3	1	5	1	1	1	1	
28					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	55	70	145	3	2	5	4	3	2	1	1	1	1	
29					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	47	78	137	2	3	4	5	1	5	2	1	1	1	
30					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	50	65	140	3	1	1	3	-	-	1	1	1	1	
31					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	49	72	139	3	1	4	4	5	2	1	1	1	1	
32					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	51	66	141	3	1	1	3	-	-	2	1	1	1	
33					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	39	71	129	2	2	5	4	3	2	2	1	1	1	
34					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	45	79	135	2	3	4	4	1	5	1	1	1	1	
35					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	50	62	140	2	2	5	5	1	2	2	1	1	1	
36					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	48	78	138	3	2	4	5	3	2	1	1	1	1	
37					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	51	72	141	2	3	1	3	-	-	1	1	1	1	
38					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	39	59	129	3	3	5	4	3	2	2	1	1	1	
39					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	42	70	132	2	2	1	4	-	-	1	1	1	1	
40					1	3	2		R5 (182MPa)	92.12	46	67	136	3	3	5	5	3	2	1	1	1	1	
							Talud				217	76	307											

Diseño Original: M.Sc. Víctor Tolentino

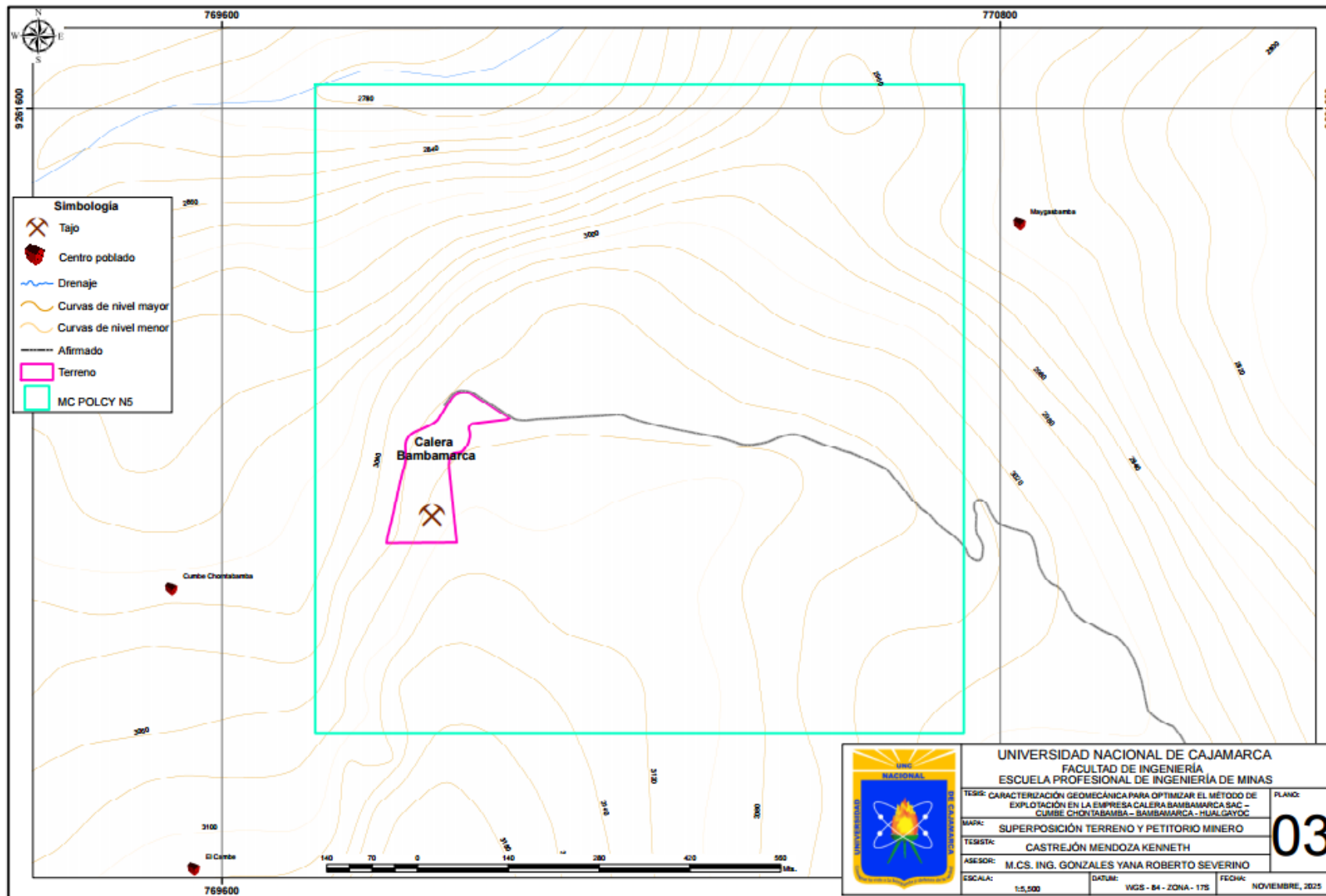
Diseño Modificado: Reinaldo Rodríguez - 2017

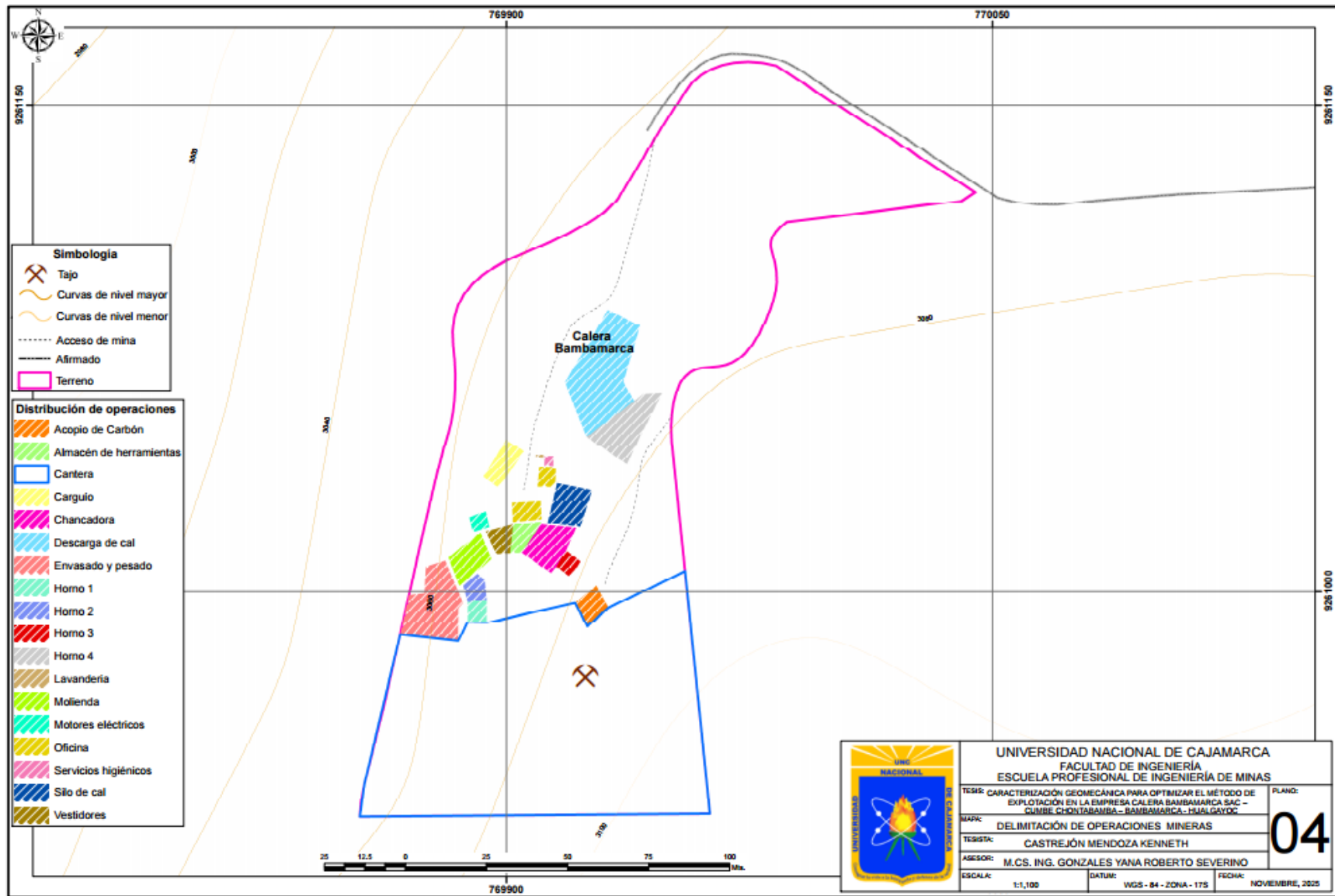
**ANEXO C**  
**PLANOS TEMÁTICOS**

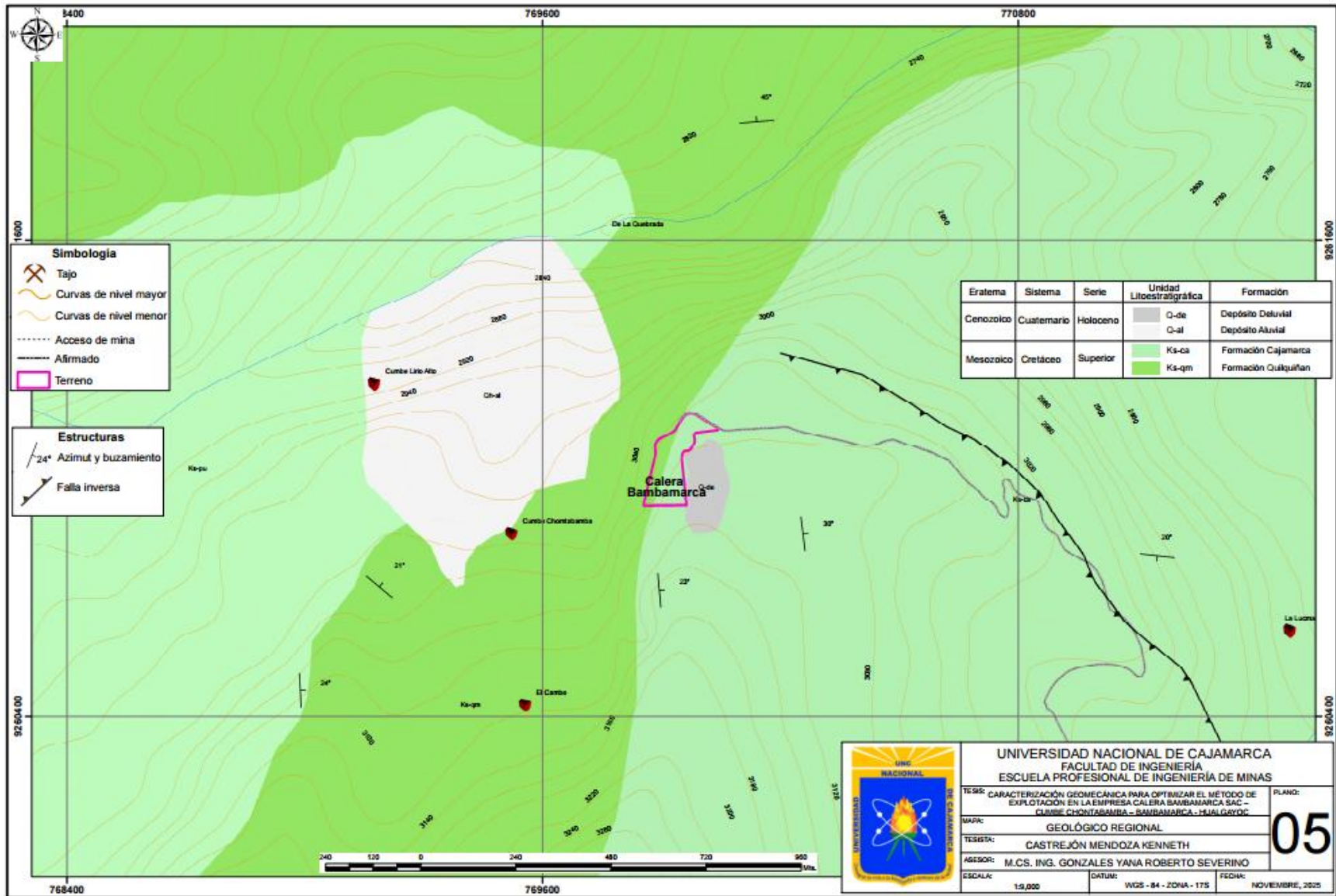


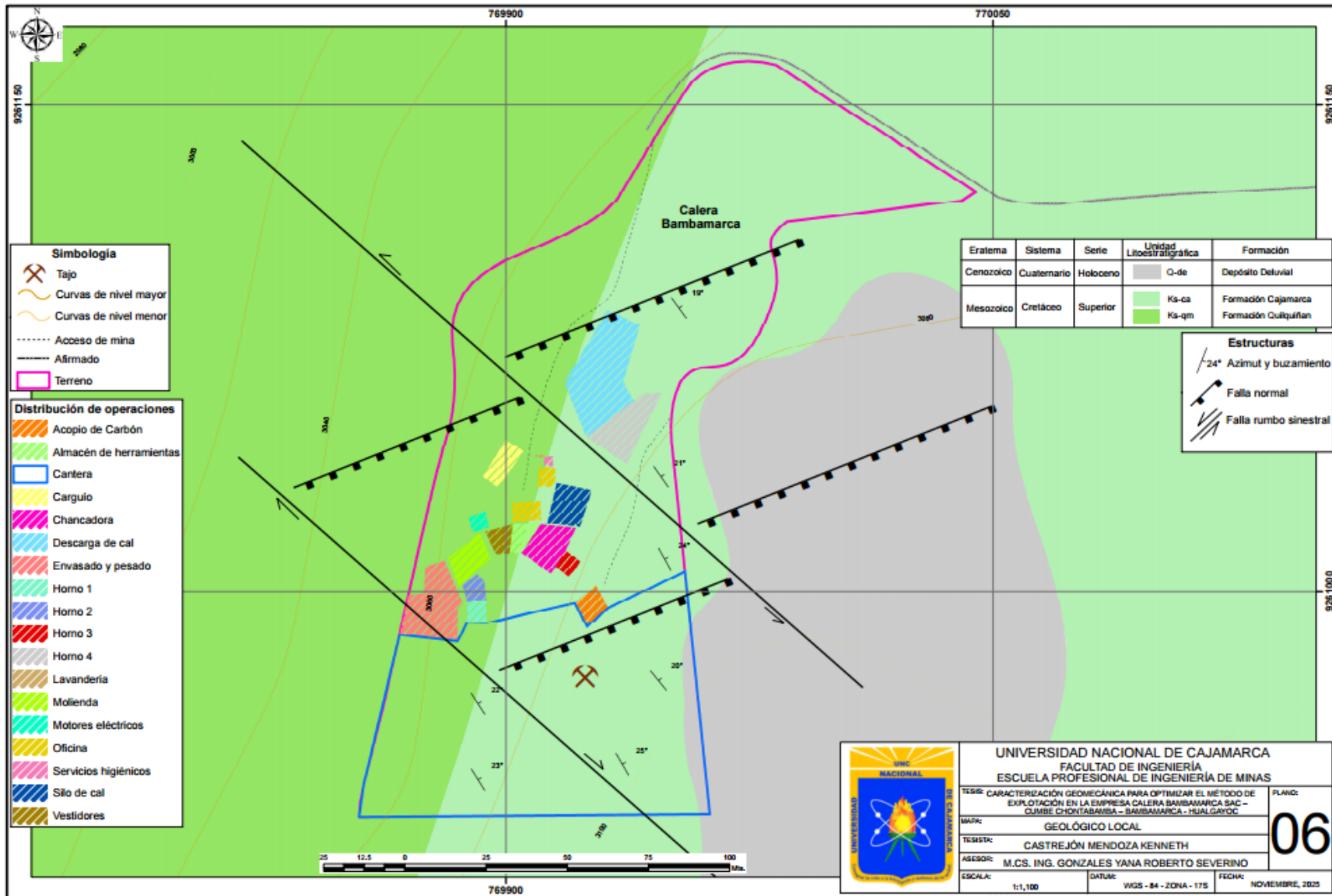


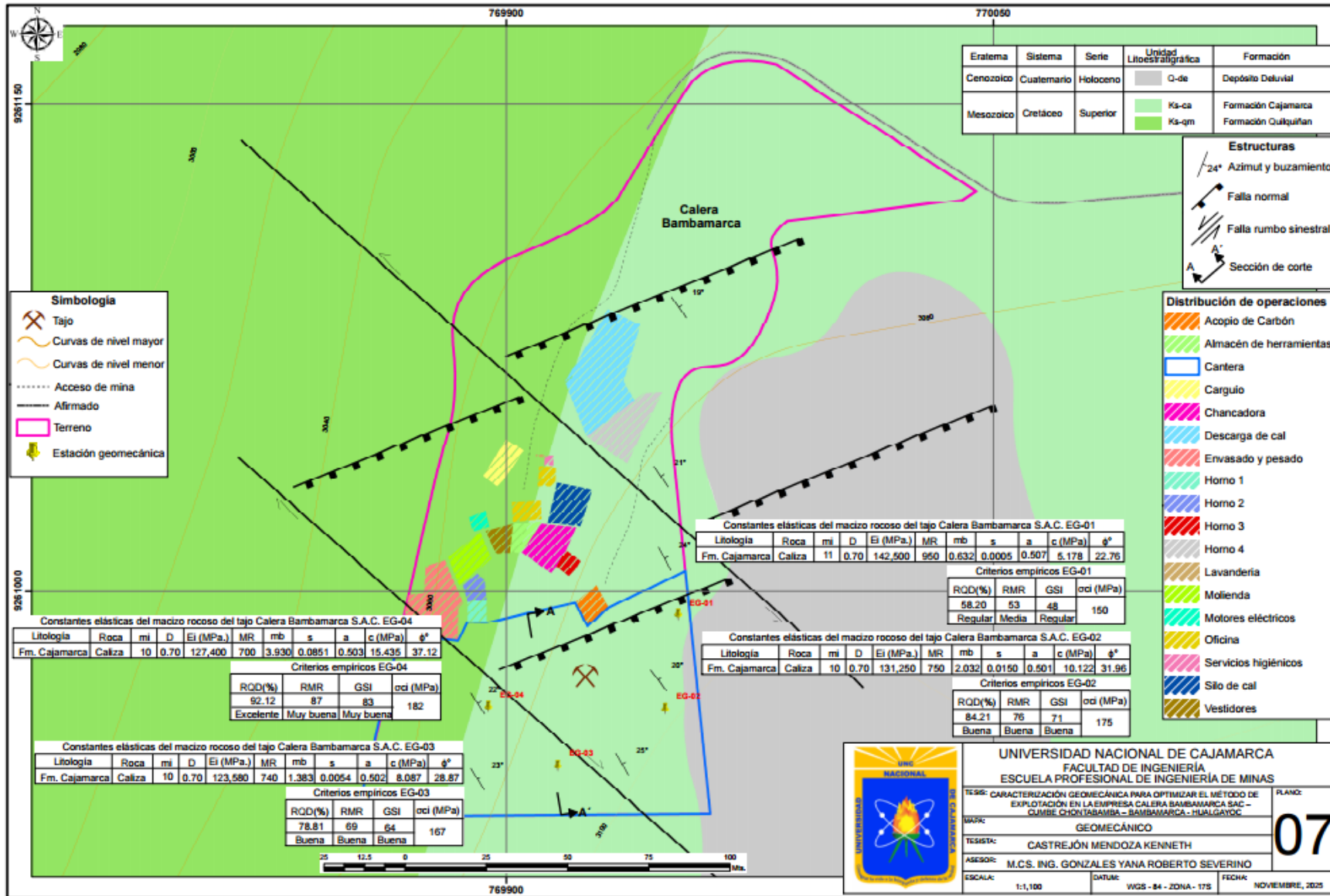
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS	
	TESIS: CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN EN LA EMPRESA CALERA BAMBAMARCA SAC – CUMBRE CHONTABAMBA – BAMBAMARCA – HUAYRAOYOC	PLANO:
	MAPA: UBICACIÓN	<b>02</b>
	TESIS DE: CASTREJÓN MENDOZA KENNETH ASesor: M.C.S. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO	ESCALA: 1:9,000    DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S    FECHA: NOVIEMBRE, 2025

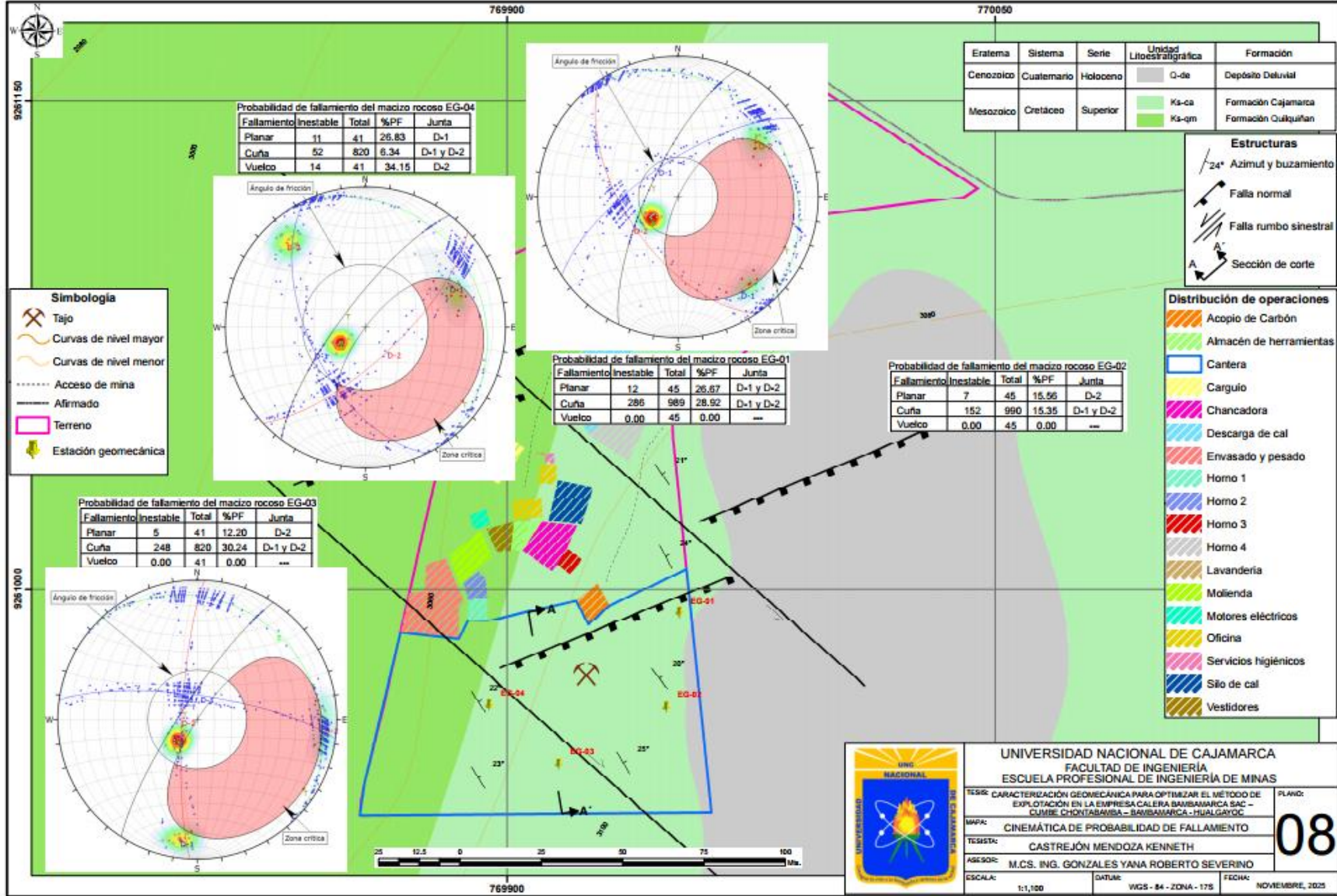












## **ANEXO D**

### **REDISEÑO DE LA CANTERA DE EXPLOTACIÓN**

