

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA
DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MÁRMOL EN EL
DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

Por:

Bach. SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO

Asesor:

Dr. LAGOS MANRIQUE ALEJANDRO CLAUDIO

Cajamarca – Perú

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador : SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO
DNI : 70190957
Escuela Profesional : INGENIERÍA DE MINAS
2. Asesor : ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE
Facultad : INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MÁRMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN
6. Fecha de evaluación: 30 DE DICIEMBRE DE 2024
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 15%
9. Código Documento: oid:3117:419048241
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 30 DE DICIEMBRE DE 2024

 Ing. Alejandro C. Lagos Manrique	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz DIRECTORA
<hr/> FIRMA DEL ASESOR Alejandro Claudio Lagos Manrique DNI: 09224934	<hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MÁRMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN."

ASESOR : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0024-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 08 de enero de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **diez días del mes de enero de 2025**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MÁRMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN" presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas LUIS RODRIGO SALDAÑA ABANTO, asesorado por el Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique, 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 :³..... PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA :¹¹..... PTS.
EVALUACIÓN FINAL :¹⁴..... PTS ^{CATORCE}..... (En letras)

En consecuencia, se lo declara ^{APROBADO}..... con el calificativo de ^{CATORCE}..... acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las¹¹..... horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Asesor



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



EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería de Minas: LUIS RODRIGO SALDAÑA ABANTO.

RUBRO	PUNTAJE
	Máximo/Calificación
2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	
2.1. Capacidad de síntesis	3
2.2. Dominio del tema .	3
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	3
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	2
PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)	11

Cajamarca, 10 de enero de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zeñón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Asesor



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



EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería de Minas: LUIS RODRIGO SALDAÑA ABANTO.

RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	3
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	11
EVALUACIÓN FINAL	
EN NÚMEROS (A + B)	14
EN LETRAS (A + B)	CATORCE
- Excelente 20 - 19	BUENO
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 10 de enero de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Asesor

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a la UNC por abrirme las alas a ser un mejor profesional, así mismo a todos los docentes de la EPIM y en especial a mi asesor, Dr. Alejandro Claudio Lagos Manrique por su constante entrega y asesoramiento durante la elaboración de la presente tesis.

LRSA

DEDICATORIA

A mis padres Héctor y Manuela y familiares que me apoyaron, confiaron en mí y nunca me dieron la espalda.

A mis amigos quienes me han ayudado de una u otra forma a ser mejor persona y profesional.

LRSA

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1 General.....	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.4 ALCANCES O DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.6 OBJETIVOS	3
1.6.1 General.....	3
1.6.2 Específico	3

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS	4
2.1.1 Internacionales.....	4
2.1.2 Nacionales	4
2.1.3 Locales.....	5
2.2 BASES TEÓRICAS	5
2.2.1 Marmol	5
2.2.2 Geomecánica.....	7
2.2.3 Macizo rocoso	7
2.2.4 Clasificaciones geomecánicas	7
2.2.5 Criterio de ruptura Hoek y Brown.....	13
2.2.6 Criterio de Mohr-Coulomb.....	14

	Pág.
2.2.7 Martillo Schmidt	16
2.2.8 Resistencia a la compresión uniaxial	18
2.2.9 Parámetros para determinar el método de explotación	20
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	21

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
3.1.1 Geografía	23
3.1.2 Política	23
3.2 ACCESIBILIDAD.....	23
3.3 GEOLOGÍA LOCAL	24
3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	25
3.4.1 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación	25
3.4.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	26

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	27
4.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	27
4.2.1 Peso específico.....	28
4.2.2 Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)	29
4.2.3 Cartografiado geomecánico.....	33
4.3 DETERMINACIÓN DE ÁNGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN.....	49
4.4 ANÁLISIS CINEMÁTICO.....	53
4.4.1 Análisis cinemático EG-01	54
4.4.2 Análisis cinemático EG-02	59
4.4.3 Análisis cinemático EG-03	64
4.4.4 Análisis cinemático EG-04	69
4.5 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DEL MARMOL	74
4.5.1 Secuencia de explotación del marmol	74
4.5.2 Parámetros de diseño del marmol	76
4.5.3 Métodos en la extracción del marmol	81
4.5.4 Secuencia de explotación del marmol.....	82

	Pág.
4.5.5 Etapas de explotación del marmol	84
4.5.6 Tipo de marmol - Cantera Jorge Chávez.....	87
4.6 ESTUDIO PETROGRÁFICO	88
4.7 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	93

**CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1. CONCLUSIONES	94
3.2. RECOMENDACIONES.....	95

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
----------------------------------	----

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS	101
ANEXO B: PANEL FOTOGRÁFICO	108
ANEXO C: CÁLCULO DE PESO ESPECÍFICO	112
ANEXO D: ANÁLISIS QUÍMICO.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Estimación del Índice GSI en base a descripciones geológicas Fuente: González de Vallejo, 2002.	12
Figura 2.2 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb. Fuente: Suarez, 2019.	15
Figura 2.3. Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes. Fuente: Lozano, 2009.	17
Figura 2.4. Principio de funcionamiento del martillo Fuente: Lozano, 2009.	17
Figura 2.5. Ábaco para la resistencia a compresión simple de una roca. Fuente: Miller, (1966). Mejorado Rodríguez, 2024.	18
Figura 3.1. Columna estratigráfica del Departamento de Cajamarca. Fuente: Reyes, 1980.	24
Figura 4.1. a) Falla planar, b) Falla en cuña y c) Falla por vuelco. Fuente: Gonzalez de Vallejo, 2002.	28
Figura 4.2. Secuencia que se siguió en la elaboración de la tesis.	28
Figura 4.3. Martillo de Schmidt CONTROLS, tipo L, Modelo 45- 561.	29
Figura 4.4. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 01 (EG-01).	34
Figura 4.5. Cálculo del GSI, EG-01.	36
Figura 4.6. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 02 (EG-02).	37
Figura 4.7. Cálculo del GSI, EG-02.	40
Figura 4.8. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 03 (EG-03).	41
Figura 4.9. Cálculo del GSI, EG-03.	44
Figura 4.10. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 04 (EG-04).	45
Figura 4.11. Cálculo del GSI, EG-04.	48
Figura 4.12. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 01, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.	50
Figura 4.13. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 02, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.	51
Figura 4.14. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 03, aplicando el método equivalencia de áreas –	52

	Pág.
	RocData.
Figura 4.15.	53
	Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 04, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.
Figura 4.16.	55
	Diagrama de rosas de las fracturas – EG-01
Figura 4.17.	55
	Diagrama de polos de las fracturas – EG-01
Figura 4.18.	56
	Probabilidad de ruptura planar 34.78%, englobando al polo de la familia D-2; a favor del talud, EG-01.
Figura 4.19.	57
	Probabilidad de ruptura en cuña con 45.45%, englobando a la intersección de las familias: D-2 y D-1, EG-01.
Figura 4.20.	58
	Probabilidad de ruptura por vuelco con 4.35%, englobando al polo de la familia D-4, EG-01.
Figura 4.21.	60
	Diagrama de rosas de las fracturas – EG-02
Figura 4.22.	60
	Diagrama de polos de las fracturas – EG-02.
Figura 4.23.	61
	Probabilidad de ruptura planar 33.33%, englobando al polo de la familia D-1; a favor del talud, EG-02.
Figura 4.24.	62
	Probabilidad de ruptura en cuña con 37.78%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2, EG-02.
Figura 4.25.	63
	Probabilidad de ruptura por vuelco con 25.00%, englobando al polo de la familia D-3, EG-03.
Figura 4.26.	65
	Diagrama de rosas de las fracturas – EG-03
Figura 4.27.	65
	Diagrama de polos de las fracturas – EG-03
Figura 4.28.	66
	Probabilidad de ruptura planar 28.00%, englobando al polo de la familia D-2; a favor del talud, EG-03.
Figura 4.29.	67
	Probabilidad de ruptura en cuña con 37.46%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2, EG-03.
Figura 4.30.	68
	Probabilidad de ruptura por vuelco con 28.00%, englobando al polo de la familia D-4, EG-03.
Figura 4.31.	70
	Diagrama de rosas de las fracturas – EG-04
Figura 4.32.	70
	Diagrama de polos de las fracturas – EG-04
Figura 4.33.	71
	Probabilidad de ruptura planar 33.33%, englobando al polo de las familias: D-2 y D-1; a favor del talud, EG-04.
Figura 4.34.	72
	Probabilidad de ruptura en cuña con 34.19%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2, EG-04.
Figura 4.35.	73
	Probabilidad de ruptura por vuelco con 18.52%, englobando al polo de la familia D-3, EG-04.
Figura 4.36.	74
	Método de explotación adecuado para la

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 2.1.	Clasificación Geomecánica RQD. Fuente: Deere, 1967.	8
Tabla 2.2	Calidad del macizo rocoso según RMR ₈₉ . Fuente: Bieniawski, 1989.	9
Tabla 2.3.	Estimación y clasificación de la resistencia a compresión simple de: Suelos y rocas, a partir de índices de campo. Fuente: González de Vallejo, 2002.	9
Tabla 2.4.	Parámetros de Clasificación Geomecánica RMR ₈₉ . Fuente: Gonzalez de Vallejo, 2002.	10
Tabla 2.5.	Clasificación rocosa con GSI. Fuente: González de Vallejo, 2002.	12
Tabla 2.6.	Valores aproximados para c y ϕ , del macizo rocoso según su calidad. Fuente: González de Vallejo, 2002.	15
Tabla 2.7.	Parámetros de clasificación numérica por geometría del yacimiento y distribución de leyes. Fuente: Nicholas, 1981.	21
Tabla 3.1.	Accesibilidad al área de estudio.	23
Tabla 4.1.	1 Resultado del peso específico promedio del macizo rocoso. Fuente: INGEOCONSULT & LAB. SRL, 2024.	29
Tabla 4.2.	Cálculo del valor promedio de RCU, EG-01.	31
Tabla 4.3.	Cálculo del valor promedio de RCU, EG-02.	31
Tabla 4.4.	Cálculo del valor promedio de RCU, EG-03.	32
Tabla 4.5.	Cálculo del valor promedio de RCU, EG-04.	32
Tabla 4.6.	Resumen de los valores calculados de la resistencia a la compresión uniaxial.	33
Tabla 4.7.	Ubicación de las estaciones geomecánicas.	33
Tabla 4.8.	Cálculo del RQD, EG-01.	34
Tabla 4.9	Calidad del macizo rocoso, EG-01. Fuente: Deere, 1967.	34
Tabla 4.10.	Cálculo del RMR, EG-01.	35
Tabla 4.11.	Valor del RMR del macizo rocoso, EG-01. Fuente: Bieniawski, 1989.	36
Tabla 4.12.	Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-01.	37
Tabla 4.13.	Cálculo del RQD, EG-02.	38
Tabla 4.14.	Calidad del macizo rocoso, EG-02. Fuente: Deere, 1967.	38
Tabla 4.15.	Cálculo del RMR, EG-02.	39
Tabla 4.16.	Valor del RMR del macizo rocoso, EG-02. Fuente: Bieniawski, 1989.	40
Tabla 4.17.	Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-02.	41
Tabla 4.18.	Cálculo del RQD, EG-03.	41
Tabla 4.19.	Calidad del macizo rocoso, EG-03. Fuente: Deere, 1967.	42
Tabla 4.20.	Cálculo del RMR, EG-03.	43

	Pág.
Tabla 4.21. Valor del RMR del macizo rocoso, EG-03. Fuente: Bieniawski, 1989.	44
Tabla 4.22. Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-03.	45
Tabla 4.23. Cálculo del RQD, EG-04.	46
Tabla 4.24. Calidad del macizo rocoso, EG-04. Fuente: Deere, 1967.	46
Tabla 4.25. Cálculo del RMR, EG-04.	47
Tabla 4.26. Valor del RMR del macizo rocoso, EG-04. Fuente: Bieniawski, 1989.	48
Tabla 4.27. Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-04.	49
Tabla 4.28. Valores del RMR y GSI de las 04 estaciones geomecánicas.	49
Tabla 4.29. Valores de la cohesión y ángulo de fricción calculadas de 4 estaciones geomecánicas.	49
Tabla 4.30. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-01.	54
Tabla 4.31. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-02.	59
Tabla 4.32. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-03.	64
Tabla 4.33. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-04.	69
Tabla 4.34. Factores geométricos del yacimiento de marmol.	76
Tabla 4.35. Propiedades geomecánicas del marmol.	76
Tabla 4.36. Clasificación de las rocas según Protodyakonov. Fuente: Montalar, 2009.	79
Tabla 4.37. Resumen de los parámetros calculados.	80
Tabla 3.38. Método convencional. Fuente: Quipe, 2019.	81
Tabla 4.39. Método mecanizado. Fuente: Quipe, 2019.	81
Tabla 4.40. Servicios e instalaciones auxiliares. Fuente: Quipe, 2019.	82
Tabla 4.41. Clasificación del marmol según su composición química. Fuente: López, 2006.	88
Tabla 4.42. Descripción macroscópica de la muestra SA-01.	89
Tabla 4.43. Descripción macroscópica de la muestra SA- 02.	90
Tabla 4.44. Descripción macroscópica de la muestra SA- 03.	91
Tabla 4.45. Descripción macroscópica de la muestra SA- 04.	92
Tabla 4.46. Descripción macroscópica de la muestra SA- 05.	93

LISTA DE ABREVIATURAS

GPS	:	Global Positioning System.
UTM	:	Universal Transversal Mercator.
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero Metalúrgico.
S.A.	:	Sociedad anónima.
IHSN	:	International Household Survey Network.
ISSN	:	Número internacional normalizado de publicaciones seriadas.
AIME	:	Asociación de ingenieros de minas del Ecuador.
UNCP	:	Universidad Nacional del Centro del Perú.
RMR	:	Rock Masing Rating.
GSI	:	Geological Strength Index.
RQD	:	Rock Quality Designations.
M-C	:	Morh-Coulomb.
H-B	:	Hoek-Brown.
σ_c	:	Resistencia a la compresión uniaxial.
$\sigma_3^{\text{máx}}$:	Tensión de confinamiento.
σ^t	:	Resistencia a la tracción.
σ^c	:	Resistencia global.
σ_1	:	Esfuerzo principal mayor.
σ_2	:	Esfuerzo principal intermedio.
σ_3	:	Esfuerzo principal menor.
T	:	Esfuerzo de corte.
σ_n	:	Esfuerzo normal.
σ^c_{cm}	:	Resistencia del macizo rocoso.
σ_0	:	Esfuerzo vertical.
<i>m</i>	:	Constante de Hoek & Brown.
<i>m</i> _b	:	Constante de Hoek & Brown.
<i>s</i> , <i>a</i>	:	Constantes de Hoek & Brown.
<i>c</i>	:	Cohesión.
φ	:	Ángulo de fricción.
<i>v</i>	:	Módulo de poisson.
<i>E_i</i>	:	Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
<i>E_m</i>	:	Módulo de deformación.
D	:	Factor de disturbancia.
EG-01,...	:	Estacion geomecánica.

RESUMEN

La tesis consistió en la realización de la caracterización geomecánica del macizo rocoso donde afloran los minerales de marmol con la finalidad de determinar el método de explotación más idóneo. La investigación se ubica al Sur- Este del Distrito de Jorge Chávez y en afloramientos de las calizas de la Formación Cajamarca. El marmol se originó por un proceso metamórfico debido al contacto de las calizas con un cuerpo ígneo intrusivo caliente. Se seleccionaron cuatro (04) estaciones geomecánicas denominadas SA-01, SA-02, SA-03 y SA-04, en cada una se realizó el análisis geomecánico. El peso específico calculado para cada macizo rocoso en el laboratorio INGEOCONSULT & LAB SRL tiene valor promedio de 2.59 TM/m³. Los valores del RMR de 53 a 59 (TIPO III, regular calidad) y el GSI calculado insitu tiene 51 a 57 siendo una roca regular. La cohesión y el ángulo de fricción calculados con el software ROCDATA tiene entre 4.273 MPa a 4.926 MPa y para el ángulo de fricción entre 22.496° a 24.991°. El método idóneo elegido es el de explotación a cielo abierto en ladera con pendiente empinada, en explotación de bancos de arriba hacia abajo (descendente). Esta caracterización geomecánica permite aplicar la tabla de Protodyakonov para calcular los parámetros de diseño. De dicha tabla, para un macizo rocoso de regular calidad, se eligió el coeficiente de 2, con este valor se realizaron los cálculos de los parámetros de diseño, siendo la profundidad de explotación de 100 m, número de bancos 10, altura de banco 10 m, ángulo de talud de 63°, ángulo de talud final de 39° y ancho de plataforma de 7 m. Los mármoles poseen colores de gris blanquecinos por el alto contenido de CO₃Ca, encima de los 90% y colores gris amarillentos a gris anaranjados por el contenido de óxidos de hierro, Los mármoles de colores blanquecinos son muy cotizados en el mercado.

Palabra claves: caracterización, coeficiente, ángulo de talud, cohesión.

ABSTRACT

The present thesis consisted of the geomechanical characterization of the rock massif where the marble minerals outcrop in order to determine the most suitable method of exploitation. This work was carried out in the south-east of the Jorge Chávez District and within the limestones of the Cajamarca Formation. The marble mineralization originated by a metamorphic process due to the contact of the limestones of the Cajamarca Formation with a hot intrusive igneous body. Five (04) geomechanical stations called SA-01, SA-02, SA-03 and SA-04 were selected, in each of these the respective geomechanical analysis was carried out. The specific gravity calculated for each rock mass by the INGEOCONSULT & LAB SRL laboratory yields an average value of 2.59 MT/m³. The values of the RMR show values of 53 to 59 (TYPE III, fair quality) and the GSI calculated in situ show values of 51 to 57 being a regular rock. The cohesion and friction angle calculated with the ROCDATA software yield values for cohesion between 4,273 MPa to 4,926 MPa and for friction angle between 22,496° to 24,991°. The ideal exploitation method chosen is open-pit mining on a steep slope, with the banks being exploited from top to bottom (see annex). This geomechanical characterization allowed us to apply Protodyakonov's table as suggested by Montalar (2009) to calculate the design parameters. From this table, for a rock mass of regular quality, the coefficient of 2 was chosen, with this value the calculations of the design parameters were made, being: exploitation depth of 100m, number of banks 10, bank height 10m, slope angle of 63°, final slope angle of 39° and platform width of 7 m. This distance is ideal because it avoids excessive expenses in transporting the ore for sale, and the road starts at the deposit itself. The marbles have whitish-gray colors due to the high CO₃Ca content, above 90% and yellowish-gray to orange-gray colors due to the content of iron oxides, as can be seen in the results of chemical analyses. Whitish marbles are highly valued in the market.

Keywords: Characterization, coefficient, slope angle, cohesion.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los yacimientos de marmol más importantes en el mundo se encuentran principalmente en Italia, China, Turquía, Filipinas, Francia, Brasil, Estados Unidos, India, Marruecos, Austria, Rusia, Japón, Portugal y Grecia. Italia cuenta con abundantes recursos de marmol de alta calidad, posicionando a la nación como un productor y exportador clave de marmol en el mundo. El marmol se usa ampliamente en la industria de la edificación y la construcción con fines decorativos y estructurales, desde esculturas al aire libre hasta paredes, revestimientos, pisos, elementos ornamentales, escaleras y pasillos. El marmol encuentra su aplicación en revestimientos de paredes interiores y exteriores, pavimentos interiores y exteriores, revestimientos de chimeneas y hogares, y artículos de novedad. Además de los mercados tradicionales que ya están acostumbrados a usar marmol, los nuevos mercados en el Medio Oriente y el Sudeste Asiático ahora son cada vez más conscientes de los beneficios del marmol.

El distrito de Jorge Chávez se observa la existencia de minerales de marmol que se ha formado por el metamorfismo de las calizas. Estos minerales merecen ser explotados y comercializados por lo que es necesario realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso donde se encuentran estos minerales no metálicos con la finalidad de elegir el método de explotación más idóneo.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 General

¿Cuál es la Caracterización Geomecánica del Macizo Rocoso para determinar el método de explotación más adecuado de los minerales de marmol en el distrito de Jorge Chávez?

1.2.2 Específicos

¿Cuál es el resultado del análisis del macizo rocoso utilizando los parámetros de RMR, RQD y GSI donde se presenta la mineralización de marmol en el distrito de Jorge Chávez- Celendín?

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene la finalidad de determinar la caracterización geomecánica del macizo rocoso con la finalidad de lograr una mejor elección del método de explotación de los minerales de marmol en el distrito de Jorge Chávez. Esta investigación también dará mayores conocimientos de la calidad del macizo rocoso de este sector del distrito de Jorge Chávez.

1.4 ALCANCES O DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se realizará en el distrito de Jorge Chávez ubicada en la provincia de Celendín. La presente investigación comprenderá una extensión de 20 Km².

1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La ausencia de laboratorios para los ensayos de mecánica de rocas podría constituir una limitación.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 General

- Realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para determinar el método de explotación de marmol en el distrito de Jorge Chávez – Celendín.

1.6.2 Específico

- Realizar el cartografiado geológico
- Obtener los parámetros geomecánicos
- Definir el método de explotación

El presente trabajo de investigación está compuesto por cinco capítulos: El Capítulo I que lleva por título: Introducción, contiene todo lo referente a una explicación de cómo está estructurado el presente trabajo de investigación. El Capítulo II, denominado Marco Teórico contiene dos subcapítulos, el primero denominado Antecedentes de la investigación tanto internacionales, nacionales y locales y el segundo denominado Bases Teóricas que van a servir de apoyo para la presente investigación. El capítulo III, denominado Materiales y Métodos, contiene el contexto de la investigación, los procedimientos, la metodología, la identificación de variables, las técnicas utilizadas, los instrumentos y equipos utilizados, además contiene el desarrollo de los objetivos y los resultados de la investigación. En el capítulo IV, denominado como Análisis y discusión de resultados, aquí se relacionan los resultados de la investigación con el planteamiento del problema, se contrata la hipótesis con los resultados obtenidos, para así poder llegar a las conclusiones correspondientes. El capítulo V, denominado Conclusiones y recomendaciones. En este capítulo las conclusiones deberán estar de acuerdo necesariamente, a los objetivos planteados y así mismo las recomendaciones deben corresponder a las partes de la investigación que no se hicieron. Y por último se tienen las referencias bibliográficas de acuerdo con el formato establecido por la Facultad, además están los anexos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1 Internacionales

Trigueros (2013), realizó “Parámetros de viabilidad para la explotación de marmol y calizas marmóreas mediante métodos de explotación subterráneos”. Estableció el conocimiento de la influencia de parámetros de rendimientos de la explotación como: Capacidad de producción, productividad, rentabilidad de utilidad para el tratamiento preliminar del yacimiento de marmol o calizas marmóreas. Las 14 canteras permitieron hacer síntesis geológica y geomecánica de parámetros de capa como: Espesor, buzamiento y calidad de la roca.

Tobón, Aristizábal y Arango (2003), Investigaron “Geología de los mármoles de la concesión minera Rioclaro de Sumucil S.A.”. Los mármoles pertenecen a la era Paleozoica, originándose por depositación primaria de sedimentos bajo ambiente transicional, evidenciándose el metamorfismo dinámico sobreimpuesto al metamorfismo regional. Presentando diaclasas muy abiertas > 16 mm. con tendencia dominantes E-W/ verticales, N30°W/45°NE, N60°E/85°S.

2.1.2 Nacionales

Zegarra (2015), Investigó “Estudio de factibilidad de un proyecto de explotación y transformación de marmol”. Concluye que proyecto de explotación de marmol tiene un costo de operación de 33.04 US\$/m³ con una recuperación de material del 60 % en condiciones más desfavorables. Se calculó la vida útil de 80 años, explotando en promedio 3000 m³ /mes. Además, se determina que la inversión para instalación de la planta, sin considerar costos sociales y administrativos externos es de US\$ 3,802,390. Con una tasa interna de retorno de

37.87 %, que está por encima del costo de oportunidad de 28 %, lo cual indica la rentabilidad del proyecto. Asimismo, la planta propiedad del Proyecto producirá baldosas de alta calidad en diferentes medidas, principalmente las más comerciales: 12"x12", 18"x18", 24"x24" a 1.0 y 29 1.5 cm y también a 2 y 3 cm de espesor.

Aguilar (2019), "Optimización de los procesos de transformación productiva del marmol travertino mediante la filosofía Kaisen en el Instituto Regional del Marmol". Llegó a las siguientes conclusiones. Los procesos de transformación productiva del marmol travertino en el Instituto Regional del Marmol en el periodo 2017- 2018 se han optimizado significativamente mediante la filosofía Kaizen, las herramientas que se utilizaron para la optimización de los procesos de transformación productiva del marmol travertino mediante la filosofía Kaizen fueron: El control de tiempos y movimientos, luego: El diagrama SIPOC en la cual se detallan los proveedores, las entradas, las salidas y los clientes de cada proceso.

2.1.3 Locales

Rimarachín (2016), realizó "Estimación de Reservas de Marmol para su explotación minera en la Concesión Santa Rita en el distrito Jorge Chávez, Provincia Celendín, Región Cajamarca, 2017". Llegó a las siguientes conclusiones: El cálculo de reservas probables se realizó con el apoyo del software ArcGis, considerando una profundidad 30 m., el castigo 30% y la densidad 2.8 TM/m³. Se calculó 3 573 549.29 TM, en los tres bloques estudiados. El método de explotación minera empleado será el de cielo abierto mediante bancos el cual tendrá 7.26 metros de alto con una berma inicial de 10 metros y la segunda de 8 metros, con un ángulo de talud de 63°.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Marmol

El marmol es una roca metamórfica de textura compacta y cristalina que se origina por el contacto de las calizas y un cuerpo intrusivo caliente. Estos procesos

geológicos inducen cambios mineralógicos y estructurales (alto grado de cristalización) tanto en las rocas ígneas como en las rocas sedimentarias carbonatadas. Los principales agentes que producen estas transformaciones son los fluidos mineralizantes, la presión y la temperatura. Los mármoles proceden del metamorfismo de las rocas calizas tras una recristalización de sus minerales. El marmol es considerado una roca ornamental, estas rocas son aquellas que luego de pasar por procesos de corte nos permiten tener un material apto para obras monumentales, escultóricas y además luego de ser debidamente elaborados nos brindan un material de enchape ya sea para interiores o exteriores. Estos mármoles están presentes en una gran cantidad de acabados de obras civiles, desde grandes pedestales, estatuas, columnas, lapidas, así como productos que han sido elaborados y poseen un fino acabado, tales como baldosas, planchas para exteriores, interiores, techados y muchas otras cosas más (Zegarra, 2015).

Cuando mencionamos al marmol se tiene en cuenta su valor en el mercado siendo el color una de las principales características para esta valoración, los mármoles blancos presentan escasa pigmentación; siguen los grises con bandeados decorativos de tonalidad más oscura. Los amarillos deben su color a la presencia de arcilla, llegando hasta el 10 % de contenido. Los mármoles rojos deben su gradación del rosa pálido al rojo intenso, a la dispersión del óxido de hierro o hematita. La presencia de material carbonatado da lugar a diversas tonalidades de marrón y la presencia de compuestos de magnesio origina mármoles de coloración violeta, variando su coloración desde el gris en diversos grados, hasta el negro intenso. La variedad de mármoles verdes debe su coloración a la presencia de serpentina, clorita, mica u óxidos ferrosos (Zegarra, 2015).

Se clasifican de acuerdo con el color, los mármoles se agrupan en: blancos, turquesas, amarillos, rosas, negros y verdes diversos. Los mármoles tienen los siguientes grados de calidades:

- **Calidad 1:** Marmol de grano uniforme y fresco, fácilmente laborable, exento de manchas u otros defectos (Zegarra, 2015).
- **Calidad 2:** Marmol de pequeñas venillas o manchas de color capecino, debido a la presencia de granates (Zegarra, 2015).

- **Calidad 3:** Marmol con machas y venas continuas de color cafecino; puede contener manchas gris negruzcas de sulfuros (Zegarra, 2015).

2.2.2 Geomecánica

Se ocupa del estudio de las propiedades y comportamiento mecánico de los macizos rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico. Los ensayos de laboratorio son los que permiten determinar las propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa que definen su comportamiento mecánico, del mismo modo que los ensayos in situ las propiedades de los macizos rocosos en su estado y condición natural y a escalas representativas (González de Vallejo, 2002).

2.2.3 Macizo rocoso

El estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso se debe tener en cuenta las propiedades tanto de la matriz como de las discontinuidades. Es un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo conformado en conjunto tanto por bloques de matriz rocosa y distintos tipos de discontinuidades que afectan al medio rocoso, mecánicamente los macizos rocosos pueden considerarse que presentan resistencia a la tracción nula. El conjunto de discontinuidades y bloques de matriz gobiernan el comportamiento mecánico global del macizo rocoso, es así, que para el estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso se debe analizar las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades. La heterogeneidad que se presenta en el macizo rocoso se relaciona a la variabilidad de propiedades físicas y mecánicas en distintas zonas del macizo rocoso controlado por cambios de la matriz rocosa y las discontinuidades geológicas (González de Vallejo, 2002).

2.2.4 Clasificaciones geomecánicas

Existen métodos cualitativos y cuantitativos para clasificar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos. Con la utilización de software se establece mejor las relaciones entre las distintas teorías. Los mas conocidos son: RQD (Rock Quality Designation), (Geological Strength Index), RMR

(Rock Mass Rating), entre otros.

- **Rock Quality Designation (RQD)**

El índice RQD (Rock Quality Designation) fue desarrollado en (1964-1967) por Deere. Establece la calidad del macizo rocoso in situ a partir del grado de fracturación, de manera cuantitativa. Definiendo la siguiente fórmula:

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

Donde: $\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ discontinuidades}}{\text{longitud total del macizo rocoso}}$

Tabla 2.1. Clasificación Geomecánica RQD.

RQD (%)	Calidad de la roca
100-90	Muy buena
90-75	Buena
75-50	Mediana
50-25	Mala
25-0	Muy mala

Fuente: Deere, 1967.

En la actualidad, el índice RQD se utiliza como parámetro estándar en el registro de testigos de perforación y es un elemento básico de los principales sistemas de clasificación de masa: el sistema de clasificación geomecánica de Bienawiski (RMR) y el sistema Q Barton. (SGS, 2021).

- **Clasificación de la Masa Rocosa Rock Mass Rating (RMR)**

Según Gonzales de Vallejo (2004), el RMR es una clasificación geomecánica de los macizos rocosos desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.

- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación (túneles).

Tabla 2.2 Calidad del macizo rocoso según RMR₈₉.

Clase	Calidad	Calidad de la roca
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

Tabla 2.3. Estimación y clasificación de la resistencia a compresión simple de: Suelos y rocas, a partir de índices de campo.

Clas e	Descripción	Identificación de campo.	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
S1	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	<0.025
S2	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0.025- 0.05
S3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0.05- 0.1
S4	Arcilla rígida	Se necesita alta presión para hincar el dedo.	0.1- 0.25
S5	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0.25- 0.5
S6	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	>0.5
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0.25-1.0
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta el martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1.0- 5.0
R2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo	5.0- 25
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25- 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla	50- 100
R5	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes del martillo para fracturarla	100- 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearlas con el martillo solo saltan esquirlas	>250

Fuente: González de Vallejo, 2002.

Tabla 2.4. Parámetros de Clasificación Geomecánica RMR₈₉.

Parámetro		Rango de valores				
Resistencia de la roca intacta	Ensayo de carga puntual	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	
	Compresión simple (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 – 50	5-25 1-5 <1
	Puntuación	15	12	7	4	2 1 0
		90 - 100	75 - 90	50 – 75	25 – 50	< 25
RQD (%)	Puntuación	20	17	12	8	3
Espaciado de las discontinuidades		> 2m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	6 – 20 cm	< 6 cm
	Puntuación	20	15	10	8	5
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
	Valor	6	4	2	1	0
	Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
	Valor	6	5	3	1	0
	Rugosidad	Muy rugosa	rugosa	Ligeramente rugosa	ondulada	Suave
	Valor	6	5	3	1	0
	Relleno	Ninguno	duro < 5 mm	duro > 5 mm	blando < 5 mm	blando > 5 mm
	Valor	6	4	2	1	0
	Alteración	Sana	Lig. Alt.	Mod. Alt.	Muy alterada	Descompuesta
	Valor	6	5	3	2	0
	Puntuación	30	23	13	6	0
	Agua freática	Caudal por 10 m de Túnel	Nulo	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125l/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: Gonzalez de Vallejo, 2002.

- **Geological Strenght Index (GSI)**

El GSI estima la disminución de la resistencia que presenta un macizo rocoso (González de Vallejo, 2002). Es un sistema de caracterización de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, a través de la evaluación visual de las propiedades geológicas en el campo. Las observaciones se basan en la apreciación del macizo a nivel estructural y de las condiciones presentes en su superficie (discontinuidades), por lo cual, el criterio toma en cuenta el nivel de alteración- meteorización de las rocas, su historia geológica y condiciones de formación, estado de

fracturación presente en ellas, así como la disposición de las juntas o discontinuidades.

El GSI, presenta una puntuación final comprendida dentro del intervalo 0-100. Con idéntica ponderación entre los distintos parámetros que lo componen. La clasificación de GSI, pese a ser más moderna, tiene asociado, a la misma, un criterio de rotura, no lineal, implementado en una gran cantidad de software de ingeniería. Por ello, durante los últimos años diversos autores han derivado grandes esfuerzos en recoger una relación entre ambas magnitudes. Entre los que destaca: Hoek et al. (1995), cuya propuesta, de carácter general, índice de resistencia geológica fue presentado por Hoek et al (1995) como complemento del criterio de falla generalizado en roca, para la estimación de los parámetros “s” y “m”, ya que el sistema RMR se había vuelto altamente inadecuado para el caso específico de rocas débiles (se obtenían valores de s y m poco representativos de la realidad). Los valores de las constantes se obtienen como se muestra a continuación: El valor de m, se obtiene con la siguiente expresión:

$$S = \text{Exp}\left(\left(\frac{GSI-100}{9}\right)\right)$$

Los valores de s y α se obtienen de distintas expresiones, dependiendo de si el valor de GSI es mayor o menor que 25 (valor arbitrario) donde los valores mayores a 25 representan macizos rocosos de media a buena calidad y los menores a 25 de mala a muy mala calidad. Las expresiones son las siguientes:

Para macizos rocosos con GSI > 25

$$S = \text{Exp}\left(\left(\frac{GSI-100}{9}\right)\right)$$

$\alpha = 0.5$ para macizos rocosos con GSI < 25

S = 0

$$\alpha = 0.65 - \left(\frac{GSI}{200}\right)$$

Para macizos rocosos con un valor de GSI mayor a 25 establece una relación entre GSI y el RMR 89seco con la siguiente ecuación:

$$GSI = RMR89 - 5$$

Tabla 2.5. Clasificación rocosa con GSI.

Calidad del macizo rocoso	Clase	Valor de GSI
Muy mala	V	0 - 20
Mala	VI	21 - 40
Regular	III	41 - 60
Buena	II	61 - 80
Excelente	I	81 - 100

Fuente: González de Vallejo, 2002.

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>)		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies raras ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50		
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Figura 2.1. Estimación del Índice GSI en base a descripciones geológicas
Fuente: González de Vallejo, 2002.

- **Relaciones entre RMR y GSI**

Las relaciones existentes entre GSI y RMR, dependiendo del RMR utilizado, se detallan a continuación: Para el caso de RMR76:

RMR76 >18 → GSI = RMR76

RMR76 <18 → No se puede utilizar el RMR89 para la obtención del GSI

RMR89 > 23 → GSI = RMR89 – 5

RMR89 < 23 → No se puede utilizar el RMR89 para la obtención del GSI.

2.2.5 Criterio de ruptura Hoek y Brown

El criterio de ruptura de Hoek y Brown, se utiliza con el propósito de valorar la resistencia del macizo rocoso y las propiedades de deformación; para predecir con anticipación los esfuerzos que se generan en el macizo rocoso con la puesta en marcha del diseño de explotación. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde:

σ'_1 y σ'_3 : Esfuerzos efectivos principales máximos y mínimos respectivamente.

s y a: Constantes que dependen de las condiciones estructurales del macizo rocoso.

m_b : Valor reducido de la constante m_i para macizos rocosos

El Criterio de Hoek y Brown en su última versión tiene la misma expresión que la versión generalizada del año 1997, pero introduce un nuevo parámetro, el factor de alteración (D), dando lugar a una distinta formulación para la obtención de los valores m_b , s y a.

El factor D representa un factor reductor de la resistencia que depende del grado de alteración que ha sufrido el macizo rocoso por efecto de voladuras o descompresión, es decir por efectos antrópicos. Adopta valores desde 0 para la roca no alterada en condiciones in situ, hasta el valor de 1 para roca muy alterada.

Los autores presentan una tabla con valores estimados del factor de alteración D para distintos estados del macizo rocoso.

El valor m_b es el valor reducido del correspondiente al material intacto m_0 y viene dado por la siguiente expresión:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

Los valores s y a vienen dados por las siguientes expresiones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Con esta expresión se produce una transición suave de los parámetros del modelo tanto en función del GSI como de la incidencia de la alteración, perturbación, de origen humano.

2.2.6 Criterio de Mohr-Coulomb

Introducido por primera vez en el año 1973, inicialmente realizado para el estudio de suelos. A partir de una serie de pruebas de compresión, llevadas a cabo sobre muestras idénticas de suelo, con presiones de confinamiento diferentes, representadas por un conjunto de círculos de Mohr que representan la falla. Se ha definido en la práctica que una envolvente de falla es tangente a estos círculos, representándose como una línea recta sobre un amplio rango de tensiones. La ecuación de la envolvente se puede expresar de la misma forma que la ley de coulomb.

$$t = c' + \tan\phi'$$

Dónde:

c' : cohesión efectiva. Es una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.

ϕ' : el ángulo de rozamiento interno.

t : Tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.

σ : Tensión normal que actúa en el plano de rotura.

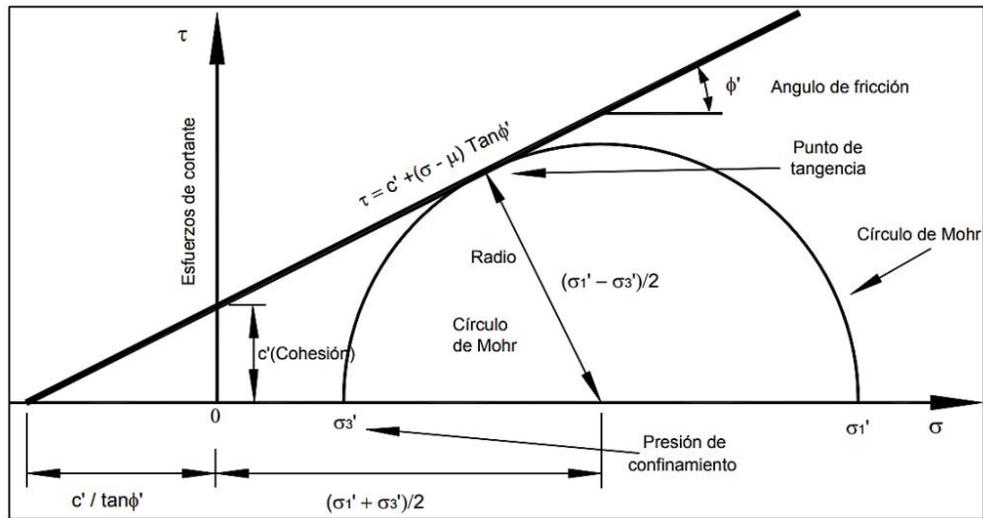


Figura 2.2 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb.
Fuente: Suarez, 2019.

La ventaja del criterio de Mohr-Coulomb es su simplicidad. Sin embargo, presenta inconvenientes para el caso de la matriz rocosa, sobre todo los relacionados con el comportamiento tensión-deformación no lineal de los macizos rocosos, por lo que no es un criterio adecuado para la estimación de su resistencia. No obstante, en determinados casos el criterio puede ser empleado para macizos rocosos resistentes en los que la rotura se produzca a favor de superficies de discontinuidad, teniendo en cuenta que deben adoptarse valores para la cohesión y para el ángulo de rozamiento representativo del macizo rocoso. Bieniawski (1979), propone unos valores orientativos para ambos parámetros, en función de la calidad del macizo rocoso dada por el índice RMR (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2.6. Valores aproximados para c y ϕ , del macizo rocoso según su calidad.

Clase de roca	I	II	III	IV	V
RMR	> 80	61- 80	41- 60	21- 40	< 20
Cohesión (Mpa)	> 0.4	0.3- 0.4	0.2- 0.3	0.1- 0.2	< 0.1
Angulo de rozamiento interno	> 45°	35°- 45°	25°- 35°	15°- 25°	< 15°

Fuente: González de Vallejo, 2002.

2.2.7 Martillo Schmidt

También llamado martillo de rebote consiste en un pistón de acero que se impulsa por un resorte contra la superficie de la roca a medir. El rebote de este pistón sobre la superficie indica un valor adimensional entre dureza y resistencia de la muestra de roca. El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca. La medida del rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano ensayado. Su uso es muy frecuente dada la manejabilidad del aparato, pudiendo aplicarse sobre roca matriz y sobre las discontinuidades.

El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada. La medida del rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico debido a Miller (1966) que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano ensayado.

- **Tipos de Martillo**

Se utilizan dos tipos de martillo, el tipo L con una energía de impacto de 0.735 N.m y el tipo N con una energía de impacto de 2.207 N.m. Los rebotes medidos con estos martillos se denotan con los símbolos RL y RN, respectivamente. Ambos martillos proporcionan buenos resultados para valores de compresión simple de la roca o la discontinuidad ensayada dentro del rango 20-150 MPa.

- **Descripción y Principio de Funcionamiento**

El martillo de Schmidt es un dispositivo mecánico usado para realizar ensayos no destructivos en materiales como las rocas. Se aplica presionando la punta del mismo sobre una superficie de roca hasta que salte el muelle, el cual golpea la roca a través de una punta cilíndrica. En función de la dureza de la roca o superficie de ensayo, el muelle sufre un mayor o menor rebote. A mayor rebote mayor resistencia de la roca.

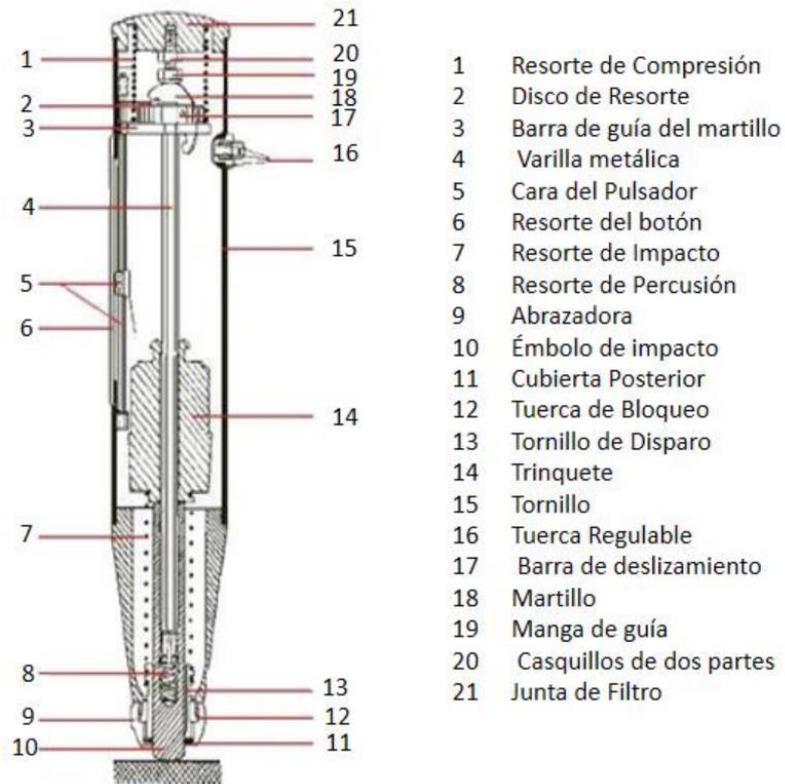


Figura 2.3. Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes.
Fuente: Lozano, 2009.

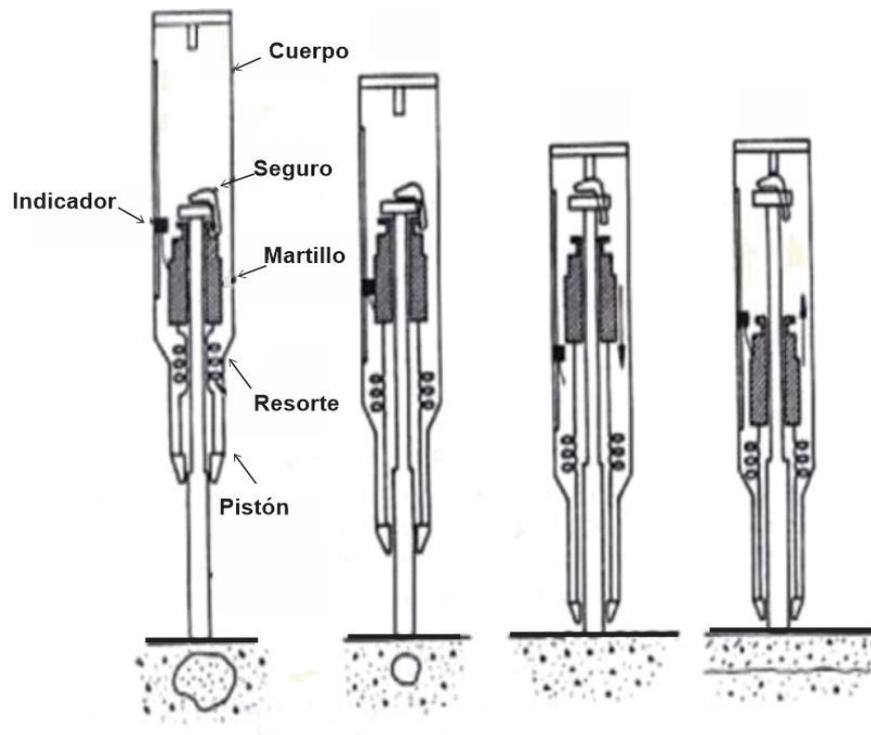


Figura 2.4. Principio de funcionamiento del martillo
Fuente: Lozano, 2009.

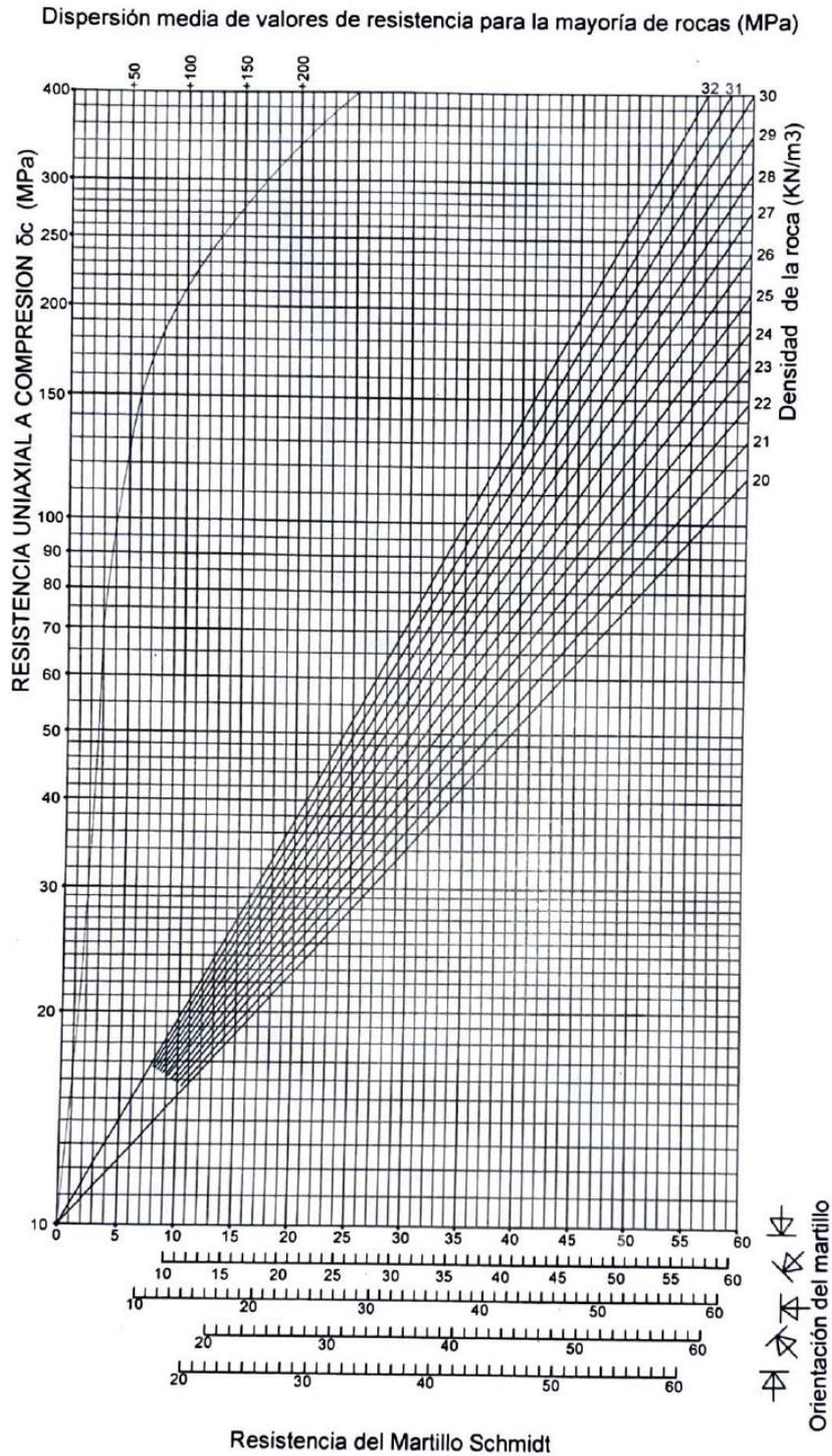


Figura 2.5. Ábaco para la resistencia a compresión simple de una roca.
Fuente: Miller, (1966). Mejorado Rodríguez, 2024.

2.2.8 Resistencia a la compresión uniaxial

La resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se mide en probetas de roca sin confinar se

denomina resistencia a compresión simple, y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas (Lozano, 2009).

Cálculo de la Resistencia a la Compresión Uniaxial

La resistencia a compresión simple de los lados de las discontinuidades o JCS se puede obtener mediante la aplicación del martillo de Schmidt tipo L sobre la discontinuidad y utilizando el ábaco. Este Aparato consiste básicamente en un vástago que lleva conectado un muelle. Se coloca el vástago sobre la roca y se introduce en el martillo empujando este contra la roca lo que da lugar a que se almacene energía en un muelle que se libera automáticamente cuando esa energía elástica alcanza un cierto nivel y lanza una masa contra el vástago. La altura que alcanza esta marca al rebotar que se mide en una escala graduada de 0 a 60 es directamente proporcional a la dureza y por tanto a la resistencia a compresión simple de la superficie de roca (Miller, 1966).

Para obtener el valor de esta resistencia o JCS, conociendo el número de rebotes, R, el resultado medio de varios ensayos, se aplica la siguiente expresión:

$$RCU = 10^{0.00088 \cdot \gamma \cdot R + 1,01}$$

Donde γ es el peso específico de la roca expresado en kN/m^3 y R es el número de rebotes del martillo de Schmidt. Este número se debe corregir en el caso de que el martillo no se aplique verticalmente y hacia abajo (Miller, 1966).

En general el valor de RCU que se obtenga para una determinada discontinuidad deberá ser inferior a la resistencia a compresión simple de la roca sana, de forma que en general se podría estimar JCS como la resistencia a compresión simple del material sano dividida entre una

constante que se aproximará a 2,5 para rocas densas, a 5 para rocas intermedias y que llegara a 10 para el caso de rocas porosas (Miller, 1966).

$$\text{Log (RCU)}= 0.00088* \text{ densidad unitaria de la roca}^* (\text{LMS})+1.01\text{MN/m}^2$$

Siendo:

LMS= Lectura del martillo de Schmidt

$$\text{Log(RCU)}= 0,00088*2.6*30$$

2.2.9 Parámetros para determinar el método de explotación

Los parámetros que se utilizan para la determinación del método de explotación son:

Banco: Escalón comprendido entre dos niveles que constituyen la rebanada que se explota puede ser de estéril y/o mineral, y que es objeto de excavación desde un punto del espacio hasta una posición final preestablecida (Gómez, 2010).

Altura de banco: Distancia vertical entre dos niveles, desde el pie del banco hasta la parte más alta o cresta (Gómez, 2010).

Talud de banco: Ángulo delimitado entre la horizontal y la línea de máxima pendiente de la cara del banco (Gómez, 2010).

Talud de trabajo: Ángulo determinado por los pies de los bancos entre los cuales se encuentra alguno de los tajos o plataformas de trabajo. Es, en consecuencia, una pendiente provisional de la excavación (Gómez, 2010).

Berma: Son aquellas plataformas horizontales existentes en los límites de la excavación sobre los taludes finales, que coadyuvan a mejorar la estabilidad de un talud y las condiciones de seguridad frente a deslizamientos o caídas de rocas. (Gómez, 2010).

Cantera: Se refiere a las explotaciones de rocas industriales, ornamentales y de materiales de construcción. Constituyen el sector más importante en cuanto a

número, ya que desde la antigüedad se han venido explotando para la extracción y abastecimiento de materias primas con uso final en la construcción y en obras de infraestructura (Trigueros, 2013).

Tabla 2.7. Parámetros de clasificación numérica por geometría del yacimiento y distribución de leyes.

1. FORMA
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equidimensional o masivo: todas las dimensiones son similares en cualquier dirección ▪ Tabular: dos de las dimensiones son mucho mayor que la tercera ▪ Irregular: las dimensiones varían a distancias muy pequeñas .
2. POTENCIA DEL YACIMIENTO
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrecha < a 10m ▪ Intermedia: 10- 30m ▪ Potente: 30- 100m ▪ Muy potente > mayor a 100m
3. INCLINACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Echado < a 20° ▪ Intermedio 20 a 55° ▪ Inclinado > a 55°
4. PROFUNDIDAD DESDE LA SUPERFICIE
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pequeña < a 150 m ▪ Intermedia de 150 a 600m ▪ Alta > a 600m
5. DISTRIBUCIONES DE LEYES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uniforme: la ley del yacimiento se mantiene prácticamente constante en cualquier punto del yacimiento mineralizado ▪ Graduado o diseminado: las leyes tienen una distribución zonal, identificándose cambios graduales de un punto a otro ▪ Errático: no existe una relación entre las leyes, ya que estas cambian radicalmente de un punto a otro en distancias muy pequeñas

Fuente: Nicholas, 1981.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Clasificación Geomecánica: Descripción sistemática de la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de naturaleza subjetiva y objetiva, expresado en cantidades, denominado índice de clasificación (Berrocal, 2015).

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

Zonas críticas. Delimitación espacial que hace referencia del estado actual respecto a variables físicas y temporales (Dávila, 2011).

Diaclasa: Son fracturas en rocas a lo largo de las cuales apenas o ningún movimiento ha tenido lugar. (Lisle y Lesión, 2002).

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)

Método minero: Proceso iterativo tanto del punto de vista temporal espacial, que permite llevar a cabo la explotación minera de un yacimiento por medio de conjunto de sistemas, procesos y maquinarias que operan de forma ordenada, repetitiva y rutinaria (Herrera, 2006). **Fracturación del macizo:** Relación con el número y características de las fracturas: Espaciado, tipo y estado, etc. (Rodríguez, 2007).

Fracturación del macizo: Relación con el número y características de las fracturas: Espaciado, tipo y estado, etc. (Rodríguez, 2007).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Geografía

El área de estudio se encuentra ubicado al NW del Distrito de Sucre en la provincia de Celendín a una altura de 2800m.s.n.m. Dentro de las siguientes coordenadas UTM: (A: N9232100, E822500; B: N9232100, E823100; C: N9231200, E823100 y D: N9231200, E822500)

3.1.2 Política

Políticamente se ubica en el distrito de Jorge Chávez, provincia de Celendín, Región de Cajamarca.

3.2 ACCESIBILIDAD

A la zona de estudio se accede por varias vías siguiendo las vías provinciales y distritales, siendo en algunos casos: Trochas carrozables y vías asfaltadas; ocasionando tardanzas de llegada a la zona de investigación, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Accesibilidad al área de estudio.

TRAMO	TIPO DE VÍA	DISTANCIA (Km.)	TIEMPO (H.)
Cajamarca- Celendín	Asfaltada	200	2.5
Celendín- Jorge Chávez	Herradura	10	0.6
Jorge Chávez- zona de estudio	Herradura	0.5	0.4

3.3 GEOLOGÍA LOCAL

Dentro del área de estudio afloran secuencias sedimentarias del cretácico inferior al reciente. Las secuencias sedimentarias están formando el flanco oriental de un sinclinal y que posee una orientación preferencial del NW al SE. por lo que los estratos presentan buzamiento promedio de 30° al SW.

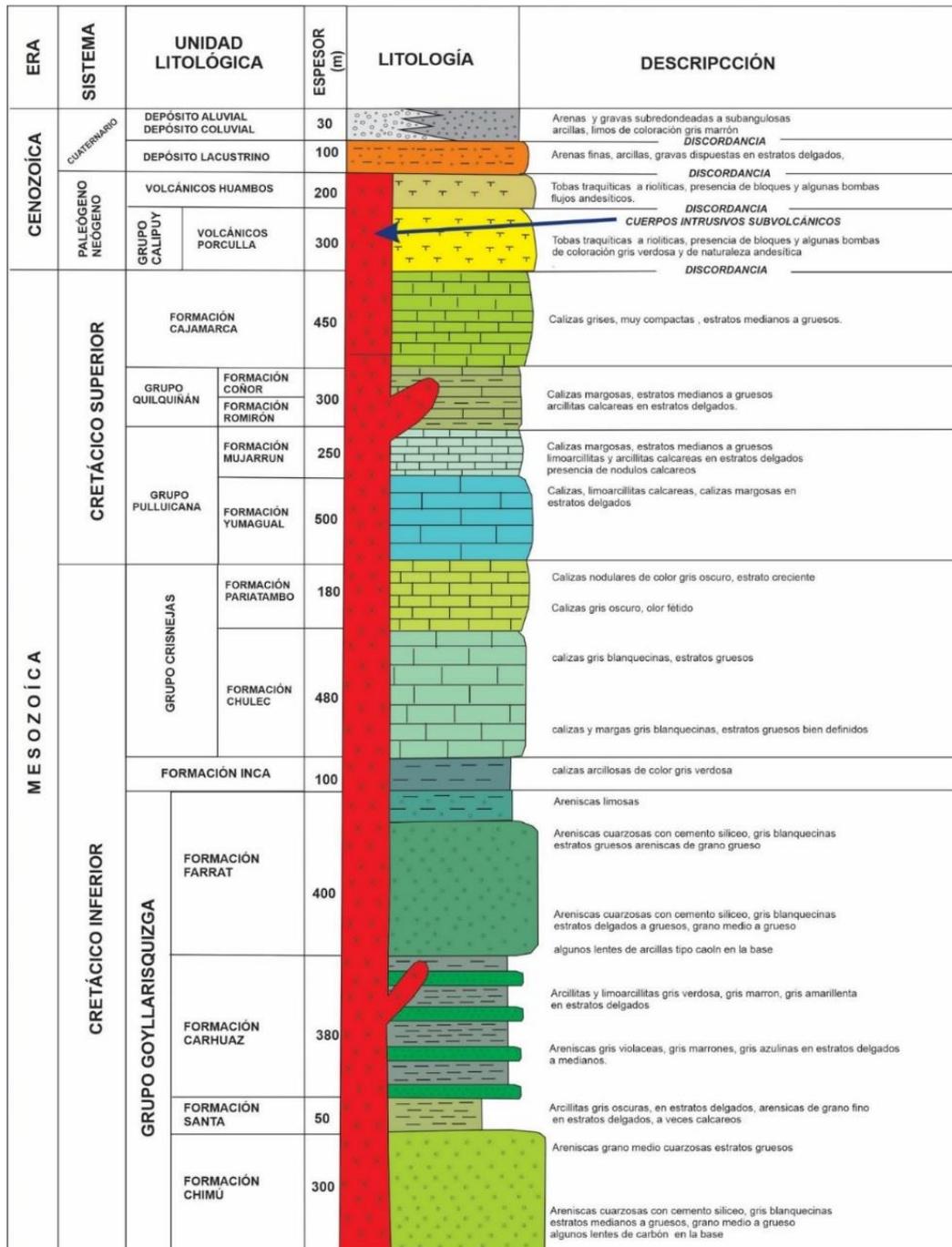


Figura 3.1. Columna estratigráfica del Departamento de Cajamarca.
Fuente: Reyes, 1980.

3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación empleada en la tesis:

3.4.1 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

- **Tipo de investigación:** Exploratoria, descriptiva, explicativa, basada en observaciones y toma de datos directamente del macizo rocoso. Tomando datos como: Dirección de buzamientos (Dip Direction), buzamiento (Dip), fallas, pliegues, diaclasas y los parámetros geomecánicos que se requieren para la caracterización del macizo rocoso.
- **Nivel de investigación:** Es de carácter descriptivo y cuantitativo donde se determinará el diseño de los parámetros de explotación mediante la caracterización geomecánica.
- **Diseño de investigación:** Es de carácter transversal debido a que se estudia en un lapso determinado de inicio al término.
- **Método de investigación:** El método de investigación es carácter deductivo porque con la determinación de la caracterización geomecánica se logrará deducir la calidad del macizo rocoso.
- **Población de estudio:** Los macizos rocosos que se ubican en el distrito de Jorge Chávez en un área de 10 km².
- **Muestras:** Las muestras corresponden a las obtenidas en los macizos rocosos donde se encuentra el reemplazamiento de marmol en el distrito de Jorge Chávez.
- **Unidad de análisis:** Se refiere a las características del macizo rocoso (grado de mineralización alteración, tipo de roca, presencia de agua) del macizo rocoso donde se ubican los minerales de marmol.

3.4.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- **Técnicas:** Este trabajo de investigación se empezará con una recopilación bibliográfica de todos los trabajos referidos al tema. Posteriormente se realizarán salidas al campo para obtener datos del macizo rocoso. Estos datos serán plasmados en formatos según las tablas geomecánicas existentes.
- **Instrumentos y equipos:** Para la presente investigación se utilizarán los siguientes instrumentos: Brújula tipo Brunton, GPS Garmin, picota de geólogo, lupas de 20x, rayador, ácido clorhídrico diluido 10%, lápices de colores, flexómetro de 5m., plano topográfico y geológico en sistema UTM, Datum WGS- 84 escala 1/100000, protactor a escala 1/500 a 1/1000, cámara fotográfica digital 16MP, bolsas de muestreo, wincha de 30 m., fichas o formatos de evaluación geomecánica para registrar los datos obtenidos durante la etapa de campo.
- **Análisis e interpretación de datos:** Todos los datos del macizo rocoso (fracturamientos, grado de alteración, persistencia, presencia de agua), obtenidos en campo serán analizados y procesados mediante los métodos RQD, GSI y RMR. El resultado de estos tres métodos dará la calidad del macizo rocoso y de esta manera se podrá elegir el diseño y planeamiento de explotación más idóneo de los minerales de marmol.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La caliza roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, que modifican el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita y reacciona con efervescencia en presencia.

4.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

Se ubicaron 04 estaciones geomecánicas denominadas: EG-01, EG-02, EG-03 y EG-04, las cuales fueron evaluadas mediante el RQD, RMR y GSI. La secuencia de análisis efectuado fue de la siguiente manera: en primer lugar, se determinó el peso específico mediante cálculo en laboratorio, luego la resistencia a la compresión uniaxial de la roca mediante la utilización del martillo de Schmidt, seguidamente la calidad del macizo rocoso mediante la aplicación del RQD, RMR, GIS, y por último la cohesión y el ángulo de fricción determinados por el software Rocdata. Con los datos así calculados se procedió al análisis cinemático a las 5 estaciones geomecánicas determinadas en el área de estudio. Dicho análisis consistió en representar las orientaciones de las fracturas medidas por el método de la mano derecha (DIP y DIPDIR) con la finalidad de determinar las orientaciones preferenciales de las fracturas, además de la determinación de los esfuerzos tectónicos que generaron las fracturas. Así mismo se analizó las fallas planares, fallas en cuña y fallas por volcamiento con el apoyo del software Dip.

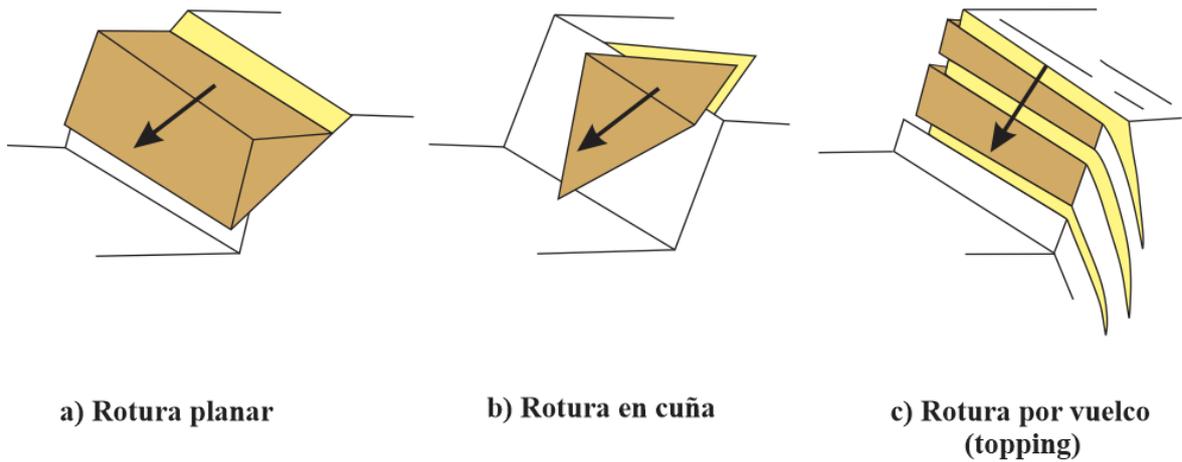


Figura 4.1. a) Falla planar, b) Falla en cuña y c) Falla por vuelco.
Fuente: Gonzalez de Vallejo, 2002.

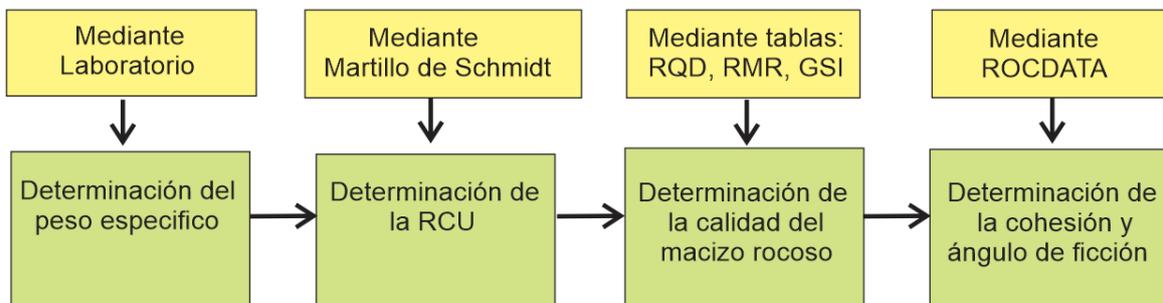


Figura 4.2. Secuencia que se siguió en la elaboración de la tesis.

4.2.1 Peso específico

Los valores del peso específico de las cuatro (04) muestras de las calizas marmolizadas fueron determinadas por el laboratorio INGEOCONSULT & LAB. SRL. Aplicado las siguientes formulas:

$$VH20_{desp} = (VolH20 + Frag. Roca) - (VolH20 \text{ sin } Frag. Roca)$$

VH20 desp. = Volumen de agua desplazado (cm³)

Vol H₂O = Volumen de H₂O

Frag. Roca = Fragmento de roca

Para la determinación del peso específico (PE):

$$PE = \frac{\text{Peso de la masa de roca (gr)}}{\text{Diferencia de volúmenes (cm³)}}$$

El informe proporcionado por el laboratorio se encuentra en el anexo y cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.1. 2 Resultado del peso específico promedio del macizo rocoso.

Muestra	Peso específico gr/cm ³
SA-01	2.62
SA-02	2.59
SA-03	2.60
SA-04	2.57
Promedio	2.60

Fuente: INGEOCONSULT & LAB. SRL, 2024.

4.2.2 Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)

La determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de las 05 estaciones se determinó utilizando el martillo de Schmidt CONTROLS, tipo L, Modelo 45- 561.



Figura 4.3. Martillo de Schmidt CONTROLS, tipo L, Modelo 45- 561.

- **Número de Rebotes (NR):** Para calcular el número de rebotes (NR) se ha utilizado el Martillo de SCHMIDT. Se han realizado 08 rebotes para cada estación. Luego para obtener los valores de la Resistencia a la compresión uniaxial se ha utilizado el ábaco en donde se plotea el valor promedio de los 08 rebotes vs densidad de la roca caliza en KN/m^3 , obteniéndose un promedio general de la resistencia a la compresión uniaxial en MPa para cada estación, cuyo valor se observa en la parte izquierda del ábaco.

Tabla 4.2. Cálculo del valor promedio de RCU, EG-01.

Ubicación: Distrito: Jorge Chávez			Coordenadas: N=9231854.765 m. E=822709.867 m.			Numero de rebote por estación 8		
Macizo rocoso			Especificaciones del martillo de Schmidt			Ensayo de campo		
Estación	Litología	Peso específico (PE) (KN/m3)	Tipo de martillo	Fecha	Orientación	Valor del disparo (VD)	Valor de la división del intervalo RCU (MPa) $\text{Log(RCU)}=(0.00088*PE*VD) + 1.01$	RCU promedio (MPa)
EG- 01	Caliza marmolizada	25.9	L	14/06/24	Horizontal	50	141	123.40
					Horizontal	47	120	
					Horizontal	39	79	
					Horizontal	46	114	
					Horizontal	38	75	
					Horizontal	45	108	
					Horizontal	49	134	
					Horizontal	38	75	

Tabla 4.3. Cálculo del valor promedio de RCU, EG-02.

Ubicación: Distrito: Jorge Chávez			Coordenadas: N=9231721.415 m. E=822758.551 m.			Numero de disparo por estación 8		
Macizo rocoso			Especificaciones del martillo de Schmidt			Ensayo de campo		
Estación	Litología	Peso específico (PE) (KN/m3)	Tipo de martillo	Fecha	Orientación Horizontal	Valor del disparo (VD)	Valor de la división del intervalo RCU (MPa) $\text{Log(RCU)}=(0.00088*PE*VD) + 1.01$	RCU promedio (MPa)
EG- 02	Caliza marmolizada	25.9	L	14/06/24	Horizontal	51	149	126.60
					Horizontal	50	141	
					Horizontal	39	79	
					Horizontal	47	121	
					Horizontal	46	114	
					Horizontal	37	71	
					Horizontal	45	109	
					Horizontal	39	79.23	

Tabla 4.4. Cálculo del valor promedio de RCU, EG-03.

Ubicación: Distrito: Jorge Chávez			Coordenadas: N=9231818.782 m. E=822811.468 m.			Numero de disparo por estación 8		
Macizo rocoso			Especificaciones del martillo de Schmidt			Ensayo de campo		
Estación	Litología	Peso específico (PE) (KN/m3)	Tipo de martillo	Fecha	Orientación	Valor del disparo (VD)	Valor de la división del intervalo RCU (MPa) $\text{Log(RCU)}=(0.00088*\text{PE}*VD) + 1.01$	RCU promedio (MPa)
EG- 03	Caliza Marmolizada	25.9	L	14/06/24	Diagonal hacia abajo	45	109	123.5
					Diagonal hacia abajo	43	98	
					Diagonal hacia abajo	39	79	
					Diagonal hacia abajo	37	71	
					Diagonal hacia abajo	50	141	
					Diagonal hacia abajo	49	134	
					Diagonal hacia abajo	47	121	
					Diagonal hacia abajo	38	75	

Tabla 4.5. Cálculo del valor promedio de RCU, EG-04.

Ubicación: Distrito: Jorge Chávez			Coordenadas: N=9231687.548 m. E=822851.684 m.			Numero de disparo por estación 8		
Macizo rocoso			Especificaciones del martillo de Schmidt			Ensayo de campo		
Estación	Litología	Peso específico (PE) (KN/m3)	Tipo de martillo	Fecha	Orientación	Valor del disparo (VD)	Valor de la división del intervalo RCU (MPa) $\text{Log(RCU)}=(0.00088*\text{PE}*VD) + 1.01$	RCU promedio (MPa)
EG- 04	Caliza marmolizada	25.9	L	14/06/24	Horizontal	36	68	124
					Horizontal	46	114	
					Horizontal	47	121	
					Horizontal	40	84	
					Horizontal	49	134	
					Horizontal	35	64	
					Horizontal	48	127	
					Horizontal	38	75	

Tabla 4.6. Resumen de los valores calculados de la Resistencia a la compresión uniaxial.

Estaciones geomecánicas	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)
EG- 01	123.40
EG- 02	126.60
EG- 03	123.50
EG- 04	124.00
EG- 05	126.75

4.2.3 Cartografiado geomecánico

Los datos obtenidos se calcula la calidad del macizo de las 05 estaciones. Se empezó realizando una descripción geológica de cada estación, luego se calcula el RQD, el RMR y GSI en ese orden.

Tabla 4.7. Ubicación de las estaciones geomecánicas.

Estaciones geomecánicas	Coordenadas UTM	
	Norte (m.)	Este (m.)
EG-01	9231854.765	822709.867
EG-02	9231721.415	822758.551
EG-03	9231818.782	822811.468
EG-04	9231687.548	822851.684

4.2.3.1 Estación geomecánica-01 (EG-01)

La estación geomecánica denominada EG- 01, se encuentra ubicada en rocas calizas de la Formación Cajamarca de edad cretácico superior. Las calizas son de color gris oscuras, poseen superficies de erosión denominadas lapiáz. Estas rocas se muestran fracturadas y se observan abundantes vetillas de calcitas. Estas calizas han sido afectadas por un proceso de metamorfismo de contacto aparentemente de regular intensidad. La orientación general de las calizas es N40°O- S40°E y un ángulo de buzamiento promedio de 30° al SW.

- **Cálculo RQD**

Tabla 4.8. Cálculo del RQD, EG-01.

Nº de disc.	Long. (m)	λ	$e^{(-0.1*\lambda)}$	$(0.1*\lambda)+1$	RQD
21	1.5	14	0.247	2.4	59.28
Calidad de la roca (75- 50)					Regular

Tabla 4.9 Calidad del macizo rocoso, EG-01.

RQD (%)	Calidad de la roca
100-90	Muy buena
90-75	Buena
75-50	Mediana
50-25	Mala
25-0	Muy mala

Fuente: Deere, 1967.



Figura 4.4. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 01 (EG-01).

- **Cálculo RMR**

Tabla 4.10. Cálculo del RMR, EG-01.

A. Parámetros de clasificación con sus valores								Valor
Parámetros		Rango de valores						
1	Índice Resistencia Carga Puntual (MPa)	> 10	4-10	2 - 4	1 - 2	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión (MPa)		
	Resistencia de la roca intacta	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
	Puntaje	15	12	7	4	2	1	0
	RQD	90-100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
2	Puntaje	20	17	13	8	3		
	Espaciado del estrato	> 2 m	0.6 - 2 m	200- 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
3	Puntaje	20	15	10	8	5		
B. Guías para la clasificación según las condiciones de las discontinuidades (Promedio del Estrato y discontinuidades)								
	Longitud (Persistencia) (m)	< 1	1 -3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
	puntaje	6	4	2	1	0		
	Separación (abertura)	Cerrada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1- 5mm	> 5 mm		
	Puntaje	6	5	4	1	0		
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Superficies pulidas		
4	Puntaje	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	duro < 5 mm	duro > 5 mm	Blando < 5mm	Blando > 5 mm		
	Puntaje	6	4	2	1	0		
	Meteorización	Inalt.	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta		
	Puntaje	6	5	3	1	0		
Suma de condición de discontinuidades								9
5	flujo por cada 10m. De longitud del túnel (1/min)	Ninguno	< 10	10 a 25	25 - 125	> 125		
	(Presión de agua en la diacl.) (Tensión principal mayor o1)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	puntaje	15	10	7	4	0		
c. Tipos de macizos determinados a partir de la valuación total								
	Puntaje	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21		70
	Tipos de rocas	I	II	III	IV	V		II
	Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala		Buena

Sumatoria= 12+13+10+9+10=54

RMR= 54

Este valor se comparó con la tabla de Bieniawski 1989, dando como resultado el valor de roca tipo III (roca regular)

Tabla 4.11. Valor del RMR del macizo rocoso, EG-01.

Clase	Calidad	Calidad de la roca
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

- **Cálculo GSI**

Este método es muy simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa en términos de bloques y de las condiciones superficiales de las discontinuidades indicadas por la rugosidad, alteración de las discontinuidades. La combinación de estos dos parámetros proporciona un rango amplio de tipos de macizos rocosos. La determinación de los parámetros del GSI se basa en las descripciones de la calidad del macizo rocoso. El GSI es principalmente útil para macizos rocosos más blandos con RMR menor a 20.

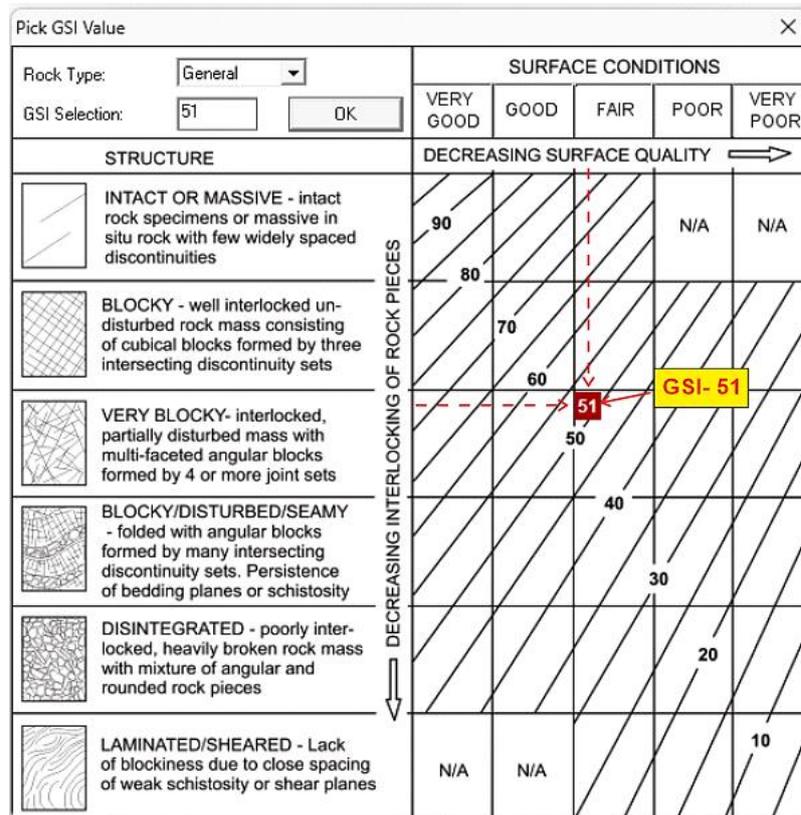


Figura 4.5. Cálculo del GSI, EG-01.

Tabla 4.12. Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-01.

	Puntuación	53
RMR	Clase	III
	Descripción	Regular
	Rango	51
GSI	Calidad	Regular

4.2.3.2 Estación geomecánica-02 (EG-02)

Esta estación geomecánica denominada EG- 02, se encuentra ubicada en rocas calizas de la Formación Cajamarca del Cretácico superior. Estas rocas se muestran fracturadas, se observan marmolizaciones como consecuencia de un proceso metamórfico de contacto aparentemente de regular intensidad. La orientación general de las rocas es N35°W- S35°E y un ángulo de buzamiento de 30° al SW.



Figura 4.6. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 02 (EG-02).

- **Cálculo RQD**

Tabla 4.13. Cálculo del RQD, EG-02.

Nº de disc.	Long. (m)	λ	$e^{(-0.1*\lambda)}$	$(0.1*\lambda)+1$	RQD
20	1.5	16	0.264	2.33	61.6
Calidad de la roca (75- 50)					Regular

Tabla 4.14. Calidad del macizo rocoso, EG-02.

RQD (%)	Calidad de la roca
100-90	Muy buena
90-75	Buena
75-50	Mediana
50-25	Mala
25-0	Muy mala

Fuente: Deere, 1967.

- **Cálculo RMR**

Tabla 4.15. Cálculo del RMR, EG-02.

A. Parámetros de clasificación con sus valores								Valor	
Parámetros		Rango de valores							
Resistencia de la roca intacta	Índice Resistencia Carga Puntual (MPa)	> 10	4-10	2 - 4	1 - 2	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión (MPa)			
	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1	
1	Puntaje	15	12	7	4	2	1	0	12
	RQD	90-100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
2	Puntaje	20	17	13	8	3			13
3	Espaciado del estrato	> 2 m	0.6 - 2 m	200- 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
	Puntaje	20	15	10	8	5			8
B. Guías para la clasificación según las condiciones de las discontinuidades (Promedio del Estrato y discontinuidades)									
4	Longitud (Persistencia) (m)	< 1	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
	puntaje	6	4	2	1	0			4
	Separación (abertura)	Cerrada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1- 5mm	> 5 mm			
	Puntaje	6	5	4	1	0			1
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Superficies pulidas			
	Puntaje	6	5	3	1	0			3
	Relleno	Ninguno	duro < 5 mm	duro > 5 mm	Blando < 5mm	Blando > 5 mm			
	Puntaje	6	4	2	1	0			4
	Meteorización	Inalt.	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta			
	Puntaje	6	5	3	1	0			3
Suma de condición de discontinuidades								15	
5	Agua subterránea	flujo por cada 10m. De longitud del túnel (1/min)	Ninguno	< 10	10 a 25	25 - 125	> 125		
		(Presión de agua en la diacl.) (Tensión principal mayor o1)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
	puntaje	15	10	7	4	0		10	
c. Tipos de macizos determinados a partir de la valuación total									
	Puntaje	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21		70	
	Tipos de rocas	I	II	III	IV	V		II	
	Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala		Buena	

Sumatoria = 12+13+8+15+10=58

RMR = 58

Este valor se comparó con la tabla de Bieniawski, 1989 dando como resultado el valor de roca tipo III (roca regular)

Tabla 4.16. Valor del RMR del macizo rocoso, EG-02.

Clase	Calidad	Calidad de la roca
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

- **Cálculo GSI**

Esta caracterización geomecánica es muy simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa en términos de bloques y de las condiciones superficiales de las discontinuidades indicadas por la rugosidad, alteración de las discontinuidades. La combinación de estos dos parámetros proporciona un rango amplio de tipos de macizos rocosos. En la siguiente figura se muestra como se ha calculado el GSI en campo que fue de 56.

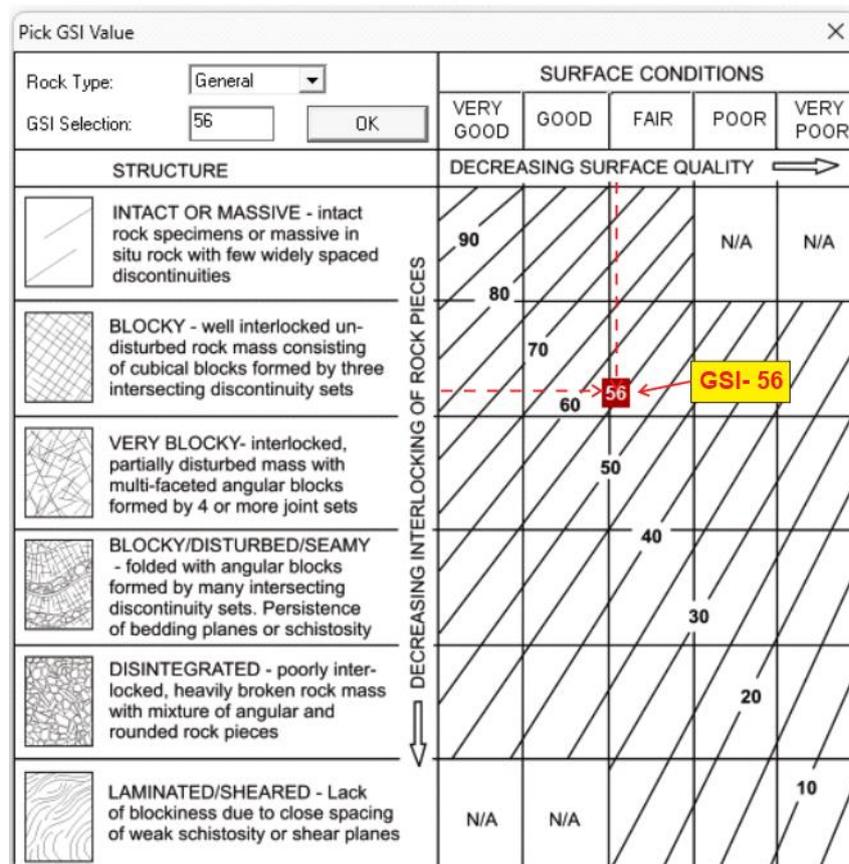


Figura 4.7. Cálculo del GSI, EG-02.

Tabla 4.17. Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-02.

Estación geomecánica SA-02		
RMR	Puntuación	58
	Clase	III
	Descripción	Regular
GSI	Rango	56
	Calidad	Regular

4.2.3.3 Estación geomecánica-03 (EG-03)

Esta estación geomecánica denominada EG-03, se encuentra ubicada en rocas calizas de la Formación Cajamarca del cretácico superior. Estas rocas muestran un fracturamiento, estas calizas poseen abundantes vetillas de calcita. La orientación general de las rocas es N35°W- S35°E y un ángulo de buzamiento de 30° al SW.



Figura 4.8. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 03 (EG-03).

Tabla 4.18. Cálculo del RQD, EG-03.

Nº de disc.	Long. (m)	λ	$e^{(-0.1*\lambda)}$	$(0.1*\lambda)+1$	RQD
23	1.5	15.33	0.216	2.53	54.72
Calidad de la roca (75- 50)					Regular

Tabla 4.19. Calidad del macizo rocoso, EG-03.

RQD (%)	Calidad de la roca
100-90	Muy buena
90-75	Buena
75-50	Mediana
50-25	Mala
25-0	Muy mala

Fuente: Deere, 1967.

- **Cálculo RMR**

Tabla 4.20. Cálculo del RMR, EG-03.

A. Parámetros de clasificación con sus valores								Valor	
Parámetros		Rango de valores							
Resistencia de la roca intacta	Índice Resistencia Carga Puntual (MPa)	> 10	4-10	2 -4	1 -2	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión (MPa)			
	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 2 5	1 - 5	< 1	
1	Puntaje	15	12	7	4	2	1	0	12
	RQD	90-100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
2	Puntaje	20	17	13	8	3			13
3	Espaciado del estrato	> 2 m	0.6 - 2 m	200- 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
	Puntaje	20	15	10	8	5			10
B. Guías para la clasificación según las condiciones de las discontinuidades (Promedio del Estrato y discontinuidades)									
	Longitud (Persistencia) (m)	< 1	1 -3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
	puntaje	6	4	2	1	0			2
	Separación (abertura)	Cerrada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1- 5mm	> 5 mm			
	Puntaje	6	5	4	1	0			0
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Superficies pulidas			
4	Puntaje	6	5	3	1	0			5
	Relleno	Ninguno	duro < 5 mm	duro > 5 mm	Blando < 5mm	Blando > 5 mm			
	Puntaje	6	4	2	1	0			1
	Meteorización	Inalt.	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta			
	Puntaje	6	5	3	1	0			3
Suma de condición de discontinuidades									11
5	Agua subterránea	flujo por cada 10m. De longitud del túnel (1/min)	Ninguno	< 10	10 a 25	25 - 125	> 125		
		(Presión de agua en la diacl.) (Tensión principal mayor o1)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Condiciones generales	Completa. seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	puntaje	15	10	7	4	0			10
c. Tipos de macizos determinados a partir de la valuación total									
	Puntaje	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21			70
	Tipos de rocas	I	II	III	IV	V			II
	Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala			Buena

Sumatoria = 12+13+10+11+10=56

RMR = 56

Este valor se comparó con la tabla de Bieniawski, 1989 dando como resultado el valor de roca tipo III (roca regular).

Tabla 4.21. Valor del RMR del macizo rocoso, EG-03.

Clase	Calidad	Calidad de la roca
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

- **Cálculo GSI**

Esta caracterización geomecánica es muy simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa en términos de bloques y de las condiciones superficiales de las discontinuidades indicadas por la rugosidad, alteración de las discontinuidades. La figura siguiente indica que el GSI determinado es de 53:

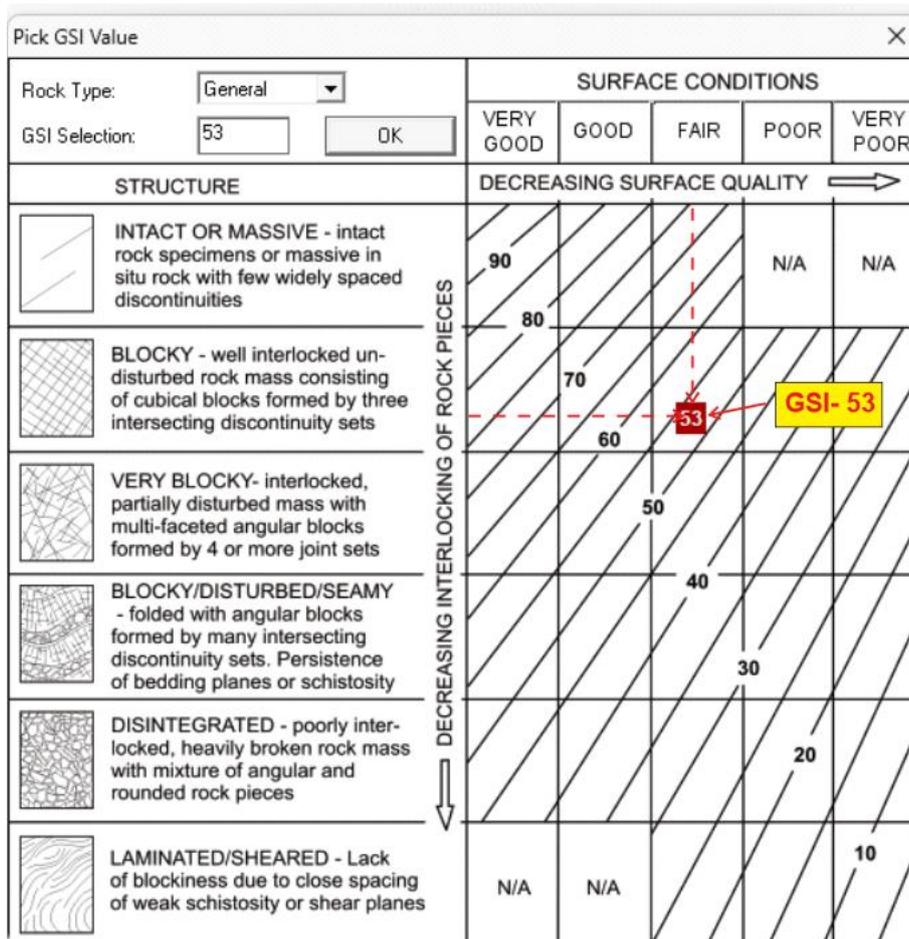


Figura 4.9. Cálculo del GSI, EG-03.

Tabla 4.22. Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-03.

Estación geomecánica SA-03		
RMR	Puntuación	55
	Clase	III
	Descripción	Regular
GSI	Rango	53
	Calidad	Regular

4.2.3.4 Estación geomecánica-04 (EG-04)

Esta estación geomecánica denominada EG- 04, se encuentra ubicada en rocas calizas de la Formación Cajamarca del cretácico superior. Estas rocas se muestran muy fracturadas. Estas calizas. La orientación general de las rocas es N35°O- S35°E y un ángulo de buzamiento de 35° al SW.



Figura 4.10. Macizo rocoso de la Estación Geomecánica 04 (EG-04).

Tabla 4.23. Cálculo del RQD, EG-04.

Nº de disc.	Long. (m)	λ	$e^{(-0.1*\lambda)}$	$(0.1*\lambda)+1$	RQD
24	1.5	16	0.202	2.6	52.52
Calidad de la roca (75- 50)					Regular

Tabla 4.24. Calidad del macizo rocoso, EG-04.

RQD (%)	Calidad de la roca
100-90	Muy buena
90-75	Buena
75-50	Mediana
50-25	Mala
25-0	Muy mala

Fuente: Deere, 1967.

- **Cálculo RMR**

Tabla 4.25. Cálculo del RMR, EG-04.

A. Parámetros de clasificación con sus valores								Valor	
Parámetros		Rango de valores							
Resistencia de la roca intacta	Índice Resistencia Carga Puntual (MPa)	> 10	4-10	2 - 4	1 - 2	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión (MPa)			
	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 2 - 5	1 - 5	< 1	
1	Puntaje	15	12	7	4	2	1	0	12
2	RQD	90-100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
2	Puntaje	20	17	13	8	3			13
3	Espaciado del estrato	> 2 m	0.6 - 2 m	200- 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
3	Puntaje	20	15	10	8	5			10
B. Guías para la clasificación según las condiciones de las discontinuidades (Promedio del Estrato y discontinuidades)									
4	Longitud (Persistencia) (m)	< 1	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
	puntaje	6	4	2	1	0			4
	Separación (abertura)	Cerrada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1- 5mm	> 5 mm			
	Puntaje	6	5	4	1	0			1
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Superficies pulidas			
	Puntaje	6	5	3	1	0			3
	Relleno	Ninguno	duro < 5 mm	duro > 5 mm	Blando < 5mm	Blando > 5 mm			
	Puntaje	6	4	2	1	0			1
Meteorización	Inalt.	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta				
Puntaje	6	5	3	1	0			5	
Suma de condición de discontinuidades								14	
5	Agua subterránea	flujo por cada 10m. De longitud del túnel (1/min)	Ninguno	< 10	10 a 25	25 - 125	> 125		
		(Presión de agua en la diacl.) (Tensión principal mayor o1)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
	puntaje	15	10	7	4	0		10	
c. Tipos de macizos determinados a partir de la valuación total									
	Puntaje	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21		70	
	Tipos de rocas	I	II	III	IV	V		II	
	Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala		Buena	

Sumatoria = 12+13+10+14+10=59

RMR = 59

Este valor se comparó con la tabla de Bieniawski, 1989 dando como resultado el valor de roca tipo III (roca regular).

Tabla 4.26. Valor del RMR del macizo rocoso, EG-04.

Clase	Calidad	Calidad de la roca
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

- **Cálculo GSI**

Esta caracterización geomecánica es muy simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa en términos de bloques y de las condiciones superficiales de las discontinuidades indicadas por la rugosidad, alteración de las discontinuidades. La siguiente figura muestra el método utilizado para calcular el GSI en el campo. Este valor determinado es de 57.

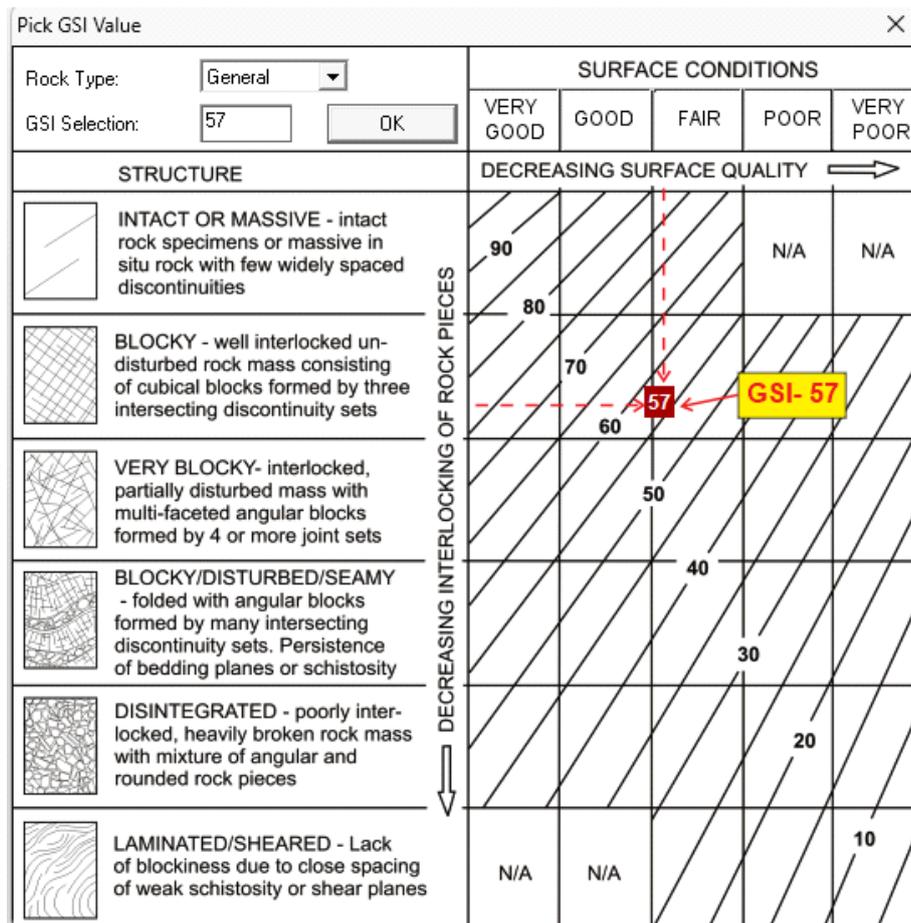


Figura 4.11. Cálculo del GSI, EG-04.

Tabla 4.27. Valor de RMR y GSI del macizo rocoso, EG-04.

Estación geomecánica SA-04		
RMR	Puntuación	59
	Clase	III
	Descripción	Regular
GSI	Rango	57
	Calidad	Regular

Tabla 4.28. Valores del RMR y GSI de las 04 estaciones geomecánicas.

Estación geomecánica	RMR			GSI	
	Puntuación	Clase	Descripción	Rango	Calidad
EG- 01	53	III	Regular	51	Regular
EG- 02	58	III	Regular	56	Regular
EG- 03	55	III	Regular	53	Regular
EG- 04	59	III	Regular	57	Regular

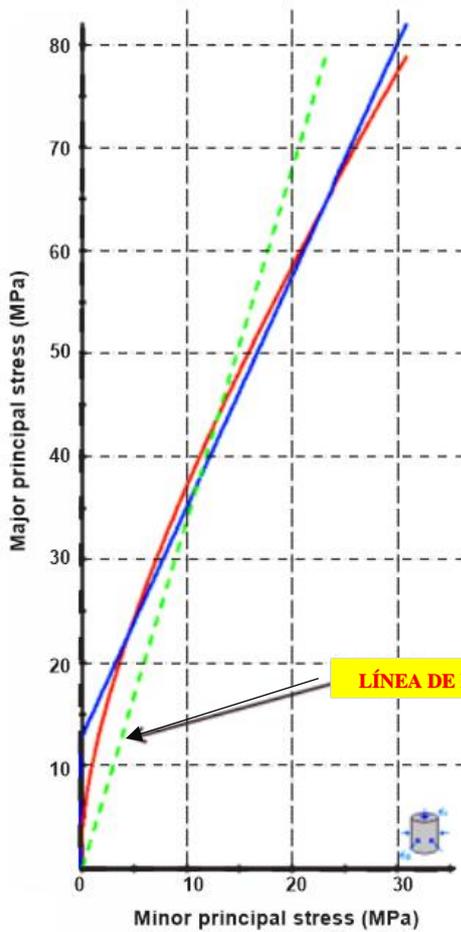
4.3 DETERMINACIÓN DE ÁNGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN

Los valores de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) y el GSI se procedió a calcular los valores del ángulo de fricción y la cohesión mediante el software ROCDATA. Los valores de los macizos rocosos se muestran en una tabla resumen:

Tabla 4.29. Valores de la cohesión y ángulo de fricción calculadas de 4 estaciones geomecánicas.

Estación geomecánica	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)
SA- 01	4.273	22.496°
SA- 02	4.917	24.569°
SA- 03	4.560	23.318°
SA- 04	4.926	24.991°

Los valores del ángulo de fricción de los macizos rocosos de las 05 estaciones geomecánicas están entre 22.496° a 24.991°. La cohesión varía entre 4.273 MPa y 4.926 MPa. Estas pequeñas variaciones se interpretan como macizos rocosos que poseen similares características geomecánicas lo que indica además que las rocas calizas marmolizadas poseen similares composiciones químicas y que han sido afectadas en igual intensidad por los procesos metamórficos y tectónicos.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta (σ_{ci}) = 123.77 MPa

GSI = 51 m_i = 9 Factor de disturbancia = 0.70

Módulo intacto (E_i) = 111,393 MPa

Modulus ratio (MR) = 900

Criterio Hoek - Brown

m_b = 0.610 s = 0.001 a = 0.505

Morh - Coulomb

Cohesión = 4.73 MPa Ángulo de fricción = 22.496°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.167 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 3.420 MPa

Resistencia global = 12.780 MPa

Módulo de deformación = 12,741.384 MPa

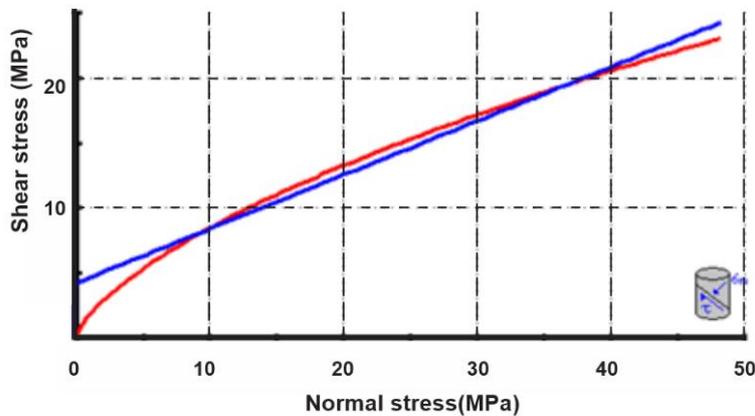
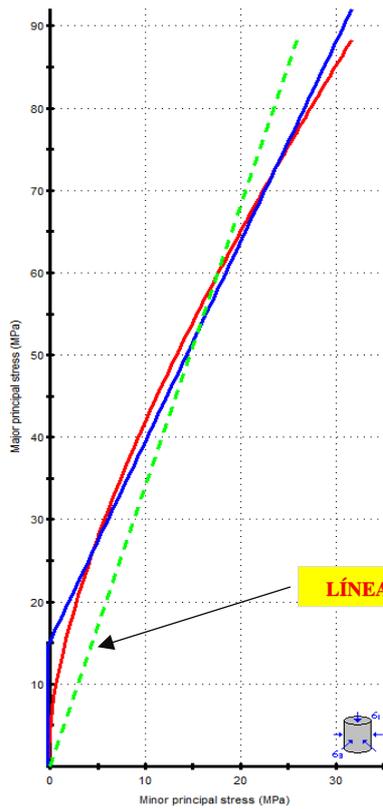


Figura 4.12. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 01, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta (σ_{ci}) = 126.67 MPa

GSI = 56 $m_i = 9$ Factor de disturbancia = 0.70

Módulo intacto (E_i) = 114,003 MPa

Modulus ratio (MR) = 900

Criterio Hoek - Brown

$m_b = 0.802$ $s = 0.002$ $a = 0.504$

Morh - Coulomb

Cohesión = 4.917 MPa Ángulo de fricción = 24.569°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.269 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 5.099 MPa

Resistencia global = 15.308 MPa

Módulo de deformación = 17,924.534 MPa

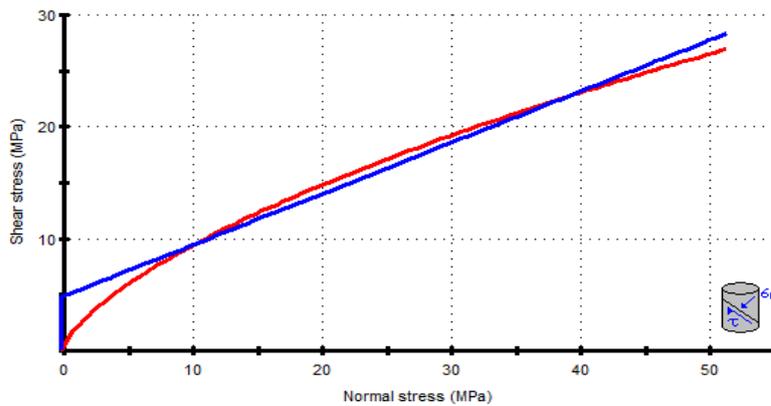
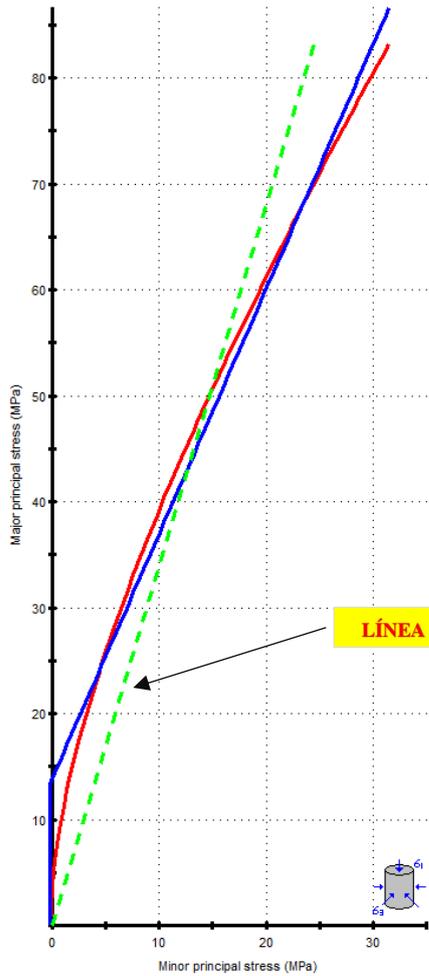


Figura 4.13. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 02, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta (σ_{ci}) = 126.04 MPa

GSI = 53 $m_i = 9$ Factor de disturbancia = 0.70

Módulo intacto (E_i) = 113,436 MPa

Modulus ratio (MR) = 900

Criterio Hoek - Brown

$m_b = 0.680$ $s = 0.001$ $a = 0.505$

Morh - Coulomb

Cohesión = 4.560 MPa Ángulo de fricción = 23.318°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.204 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 4.052 MPa

Resistencia global = 13.864 MPa

Módulo de deformación = 14,748.543 MPa

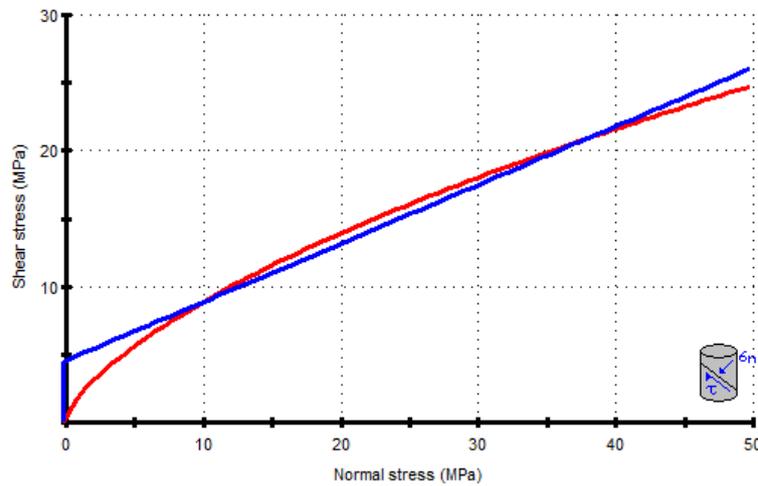
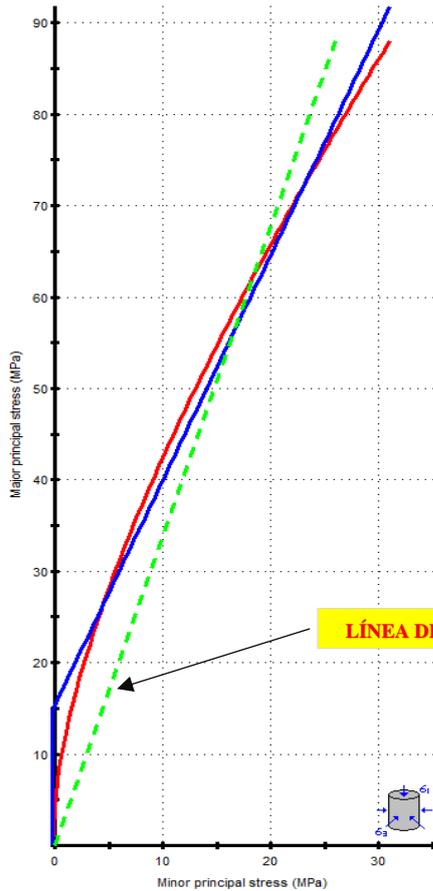


Figura 4.14. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 03, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.



Clasificación Hoek - Brown
 Resistencia comp. uniaxial intacta (σ_{ci}) = 123.97 MPa
 GSI = 57 $m_i = 9$ Factor de disturbancia = 0.70
 Módulo intacto (E_i) = 111,573 MPa
 Modulus ratio (MR) = 900

 Criterio Hoek - Brown
 $m_b = 0.848$ $s = 0.002$ $a = 0.504$
 Morh - Coulomb
 Cohesión = 4.926 MPa Ángulo de fricción = 24.991°
 Parámetros de la masa rocosa
 Resistencia a la tracción = -0.288 MPa
 Resistencia compresión uniaxial = 5.377 MPa
 Resistencia global = 15.462 MPa
 Módulo de deformación = 18,669.335 MPa

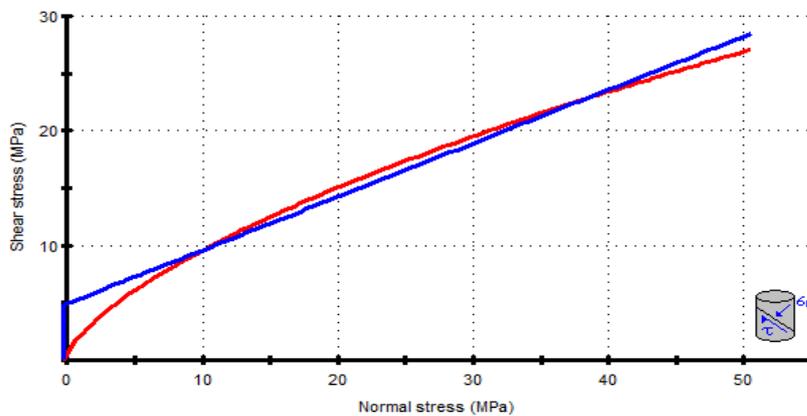


Figura 4.15. Cálculo del ángulo de fricción y cohesión del macizo rocoso de la Estación Geomecánica 04, aplicando el método equivalencia de áreas – RocData.

4.4 ANÁLISIS CINEMÁTICO

Con los valores del ángulo de fricción se procedió a la realización del análisis cinemático con el apoyo del software DIP versión 06. Posteriormente se procedió a

realizar el análisis de deslizamientos por rotura planar, rotura en cuña y rotura por vuelco. El método utilizado fue el de la mano derecha.

4.4.1 Análisis cinemático EG-01

La estación geomecánica EG-01, presenta 30 discontinuidades mediante el método de la mano derecha.

Tabla 4.30. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-01.

N°	Dip	Dip Direction	Familia
1	50°	45°	D-1
2	35°	30°	D-1
3	50°	40°	D-1
4	45°	50°	D-1
5	50°	90°	D-1
6	60°	65°	D-1
7	50°	30°	D-1
8	60°	118°	D-2
9	50°	115°	D-2
10	50°	110°	D-2
11	40°	135°	D-2
12	50°	120°	D-2
13	40°	150°	D-2
14	60°	210°	D-3
15	50°	215°	D-3
16	38°	210°	D-3
17	50°	260°	D-3
18	60°	200°	D-3
19	40°	220°	D-3
20	40°	310°	D-4
21	50°	315°	D-4
22	40°	320°	D-4
23	70°	130°	T

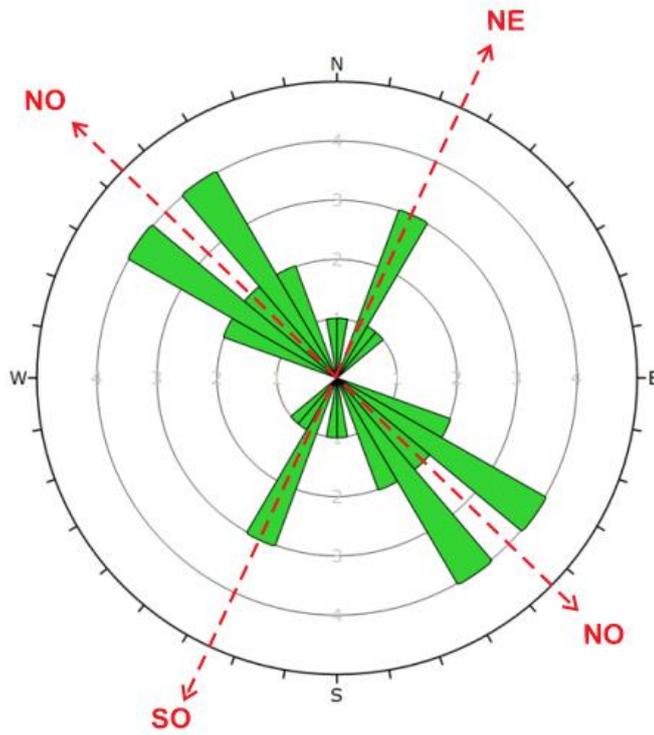
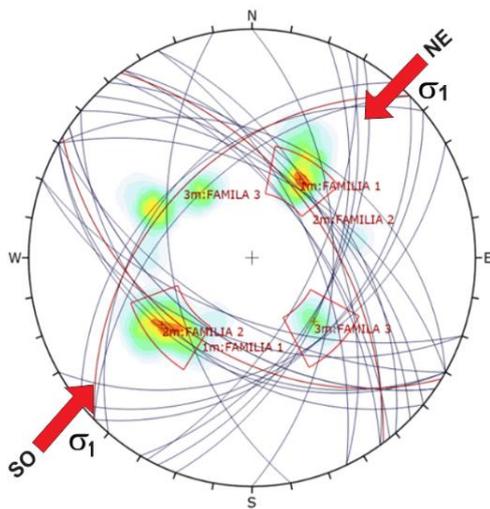


Figura 4.16. Diagrama de rosas de las fracturas - EG-01.



Color	Density Concentrations
	0,00 - 1,40
	1,40 - 2,80
	2,80 - 4,20
	4,20 - 5,60
	5,60 - 7,00
	7,00 - 8,40
	8,40 - 9,80
	9,80 - 11,20
	11,20 - 12,60
	12,60 - 14,00
Maximum Density	13.13%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	30 (30 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 4.17. Diagrama de polos de las fracturas - EG-01.

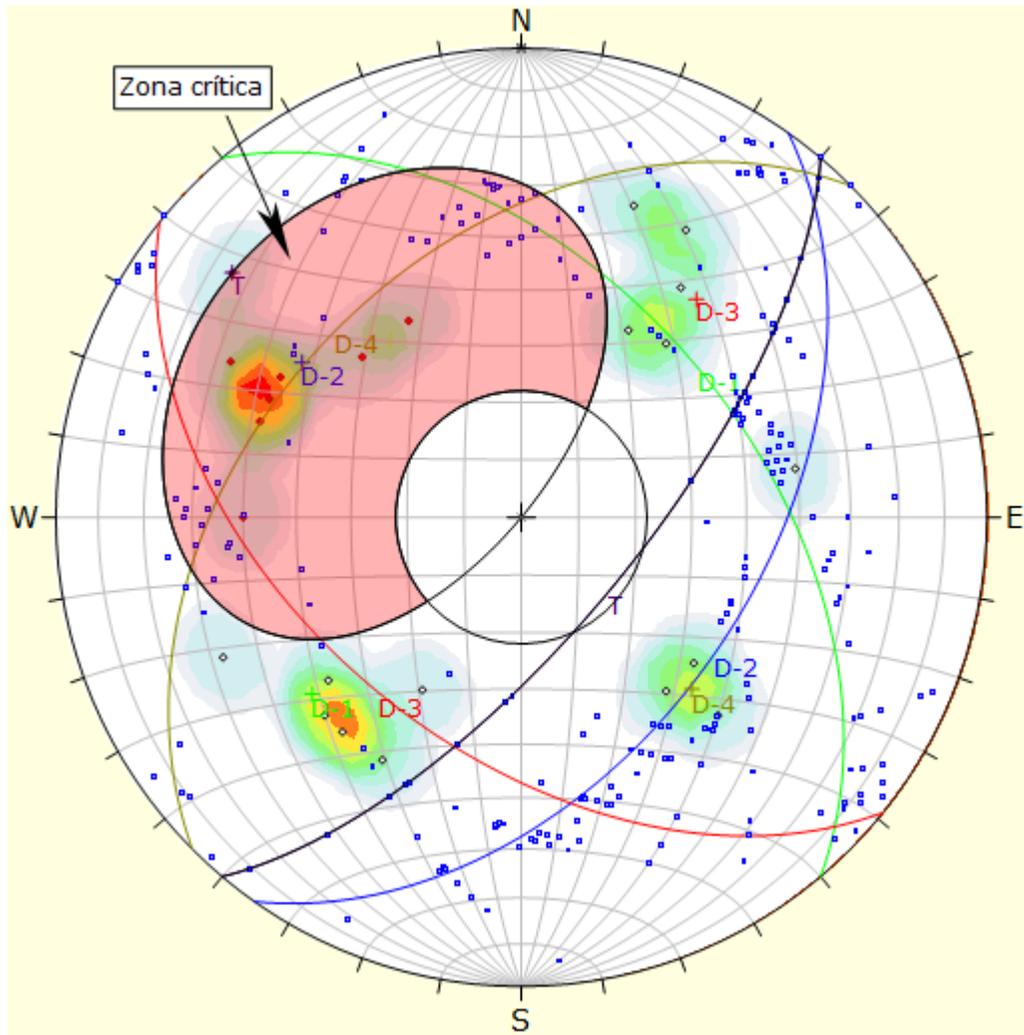


Figura 4.18. Probabilidad de ruptura planar 34.78%, englobando al polo de la familia D-2; a favor del talud, EG-01.

Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.50		
	1.50 – 3.00		
	3.00 – 4.50		
	4.50 – 6.00		
	6.00 – 7.50		
	7.50 – 9.00		
	9.00 – 10.50		
	10.50 – 12.00		
	12.00 – 13.50		
	13.50 – 15.00		
Maximun density	14.57%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Planar siliding		
Slope dip	70°		
Slope Dip direction	130°		
Friction angle	22°		
	Critical	Total	%
Planar siliding (All)	8	23	34.78%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	49°	50° D-1
2	■	48°	125° D-2
3	■	50°	219° D-3
4	■	43°	315° D-4
5	■	70°	130° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	23 (23 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	253		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

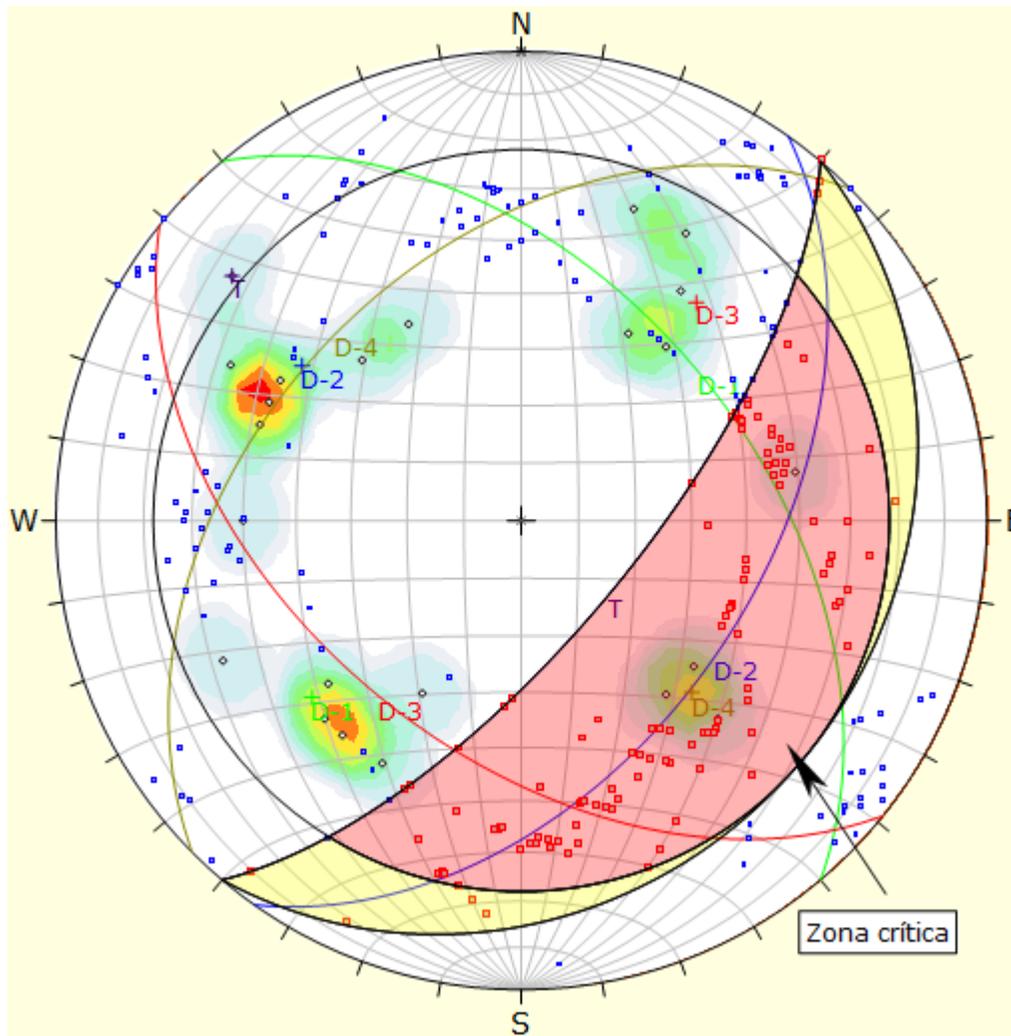


Figura 4.19. Probabilidad de ruptura en cuña con 45.45%, englobando a la intersección de las familias: D-2 y D-1, EG-01.

Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.50		
	1.50 – 3.00		
	3.00 – 4.50		
	4.50 – 6.00		
	6.00 – 7.50		
	7.50 – 9.00		
	9.00 – 10.50		
	10.50 – 12.00		
	12.00 – 13.50		
	13.50 – 15.00		
Maximun density	14.57%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	70°		
Slope Dip direction	130°		
Friction angle	22°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	115	253	45.45%
	Color	Dip	Dip direction
			Label
User planes			
1	■	49°	50°
2	■	48°	125°
3	■	50°	219°
4	■	43°	315°
5	■	70°	130°
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	988		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

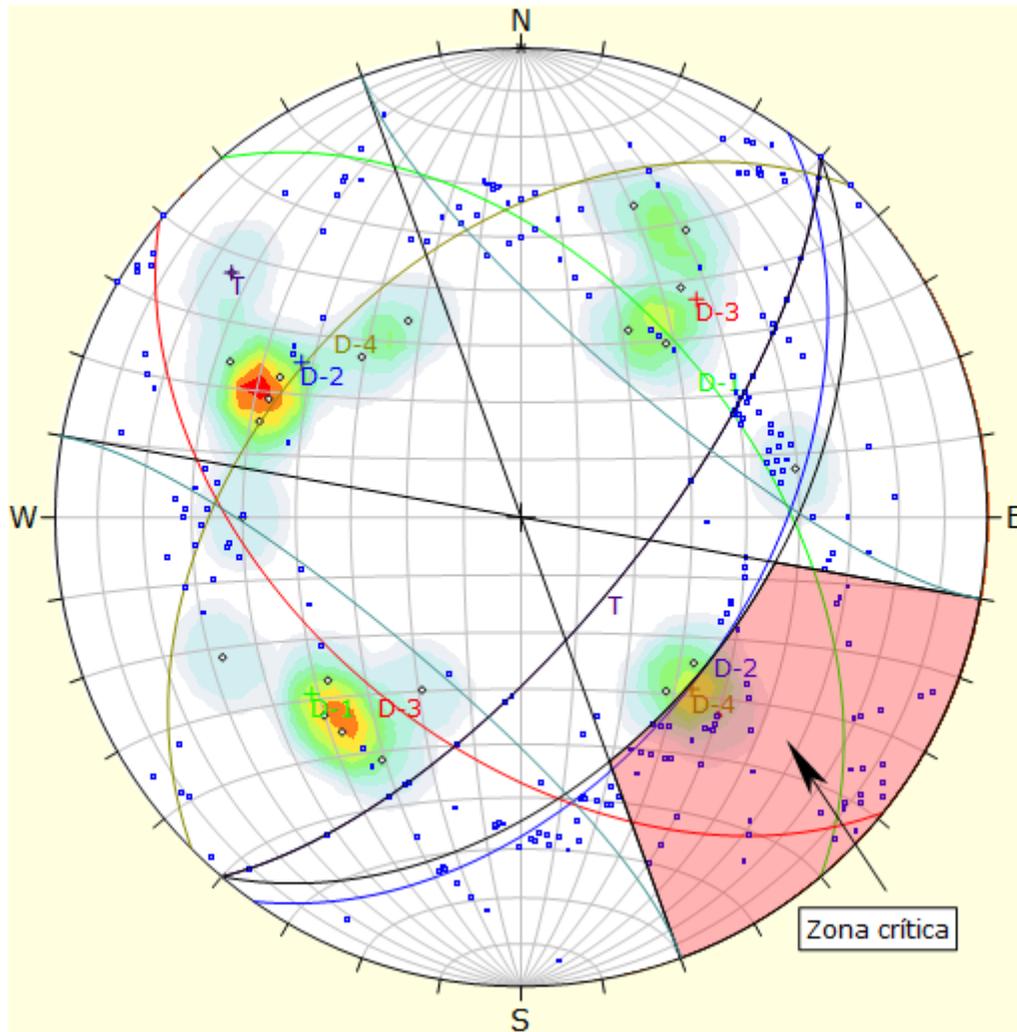


Figura 4.20. Probabilidad de ruptura por vuelco con 4.35%, englobando al polo de la familia D-4, EG-01.

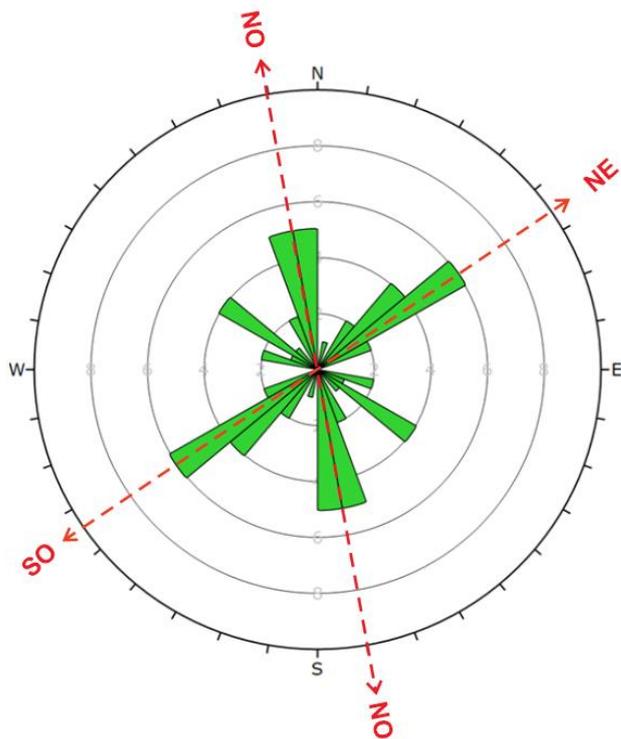
Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.50		
	1.50 – 3.00		
	3.00 – 4.50		
	4.50 – 6.00		
	6.00 – 7.50		
	7.50 – 9.00		
	9.00 – 10.50		
	10.50 – 12.00		
	12.00 – 13.50		
	13.50 – 15.00		
Maximum density	14.57%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Flexural toppling		
Slope dip	70°		
Slope Dip direction	130°		
Friction angle	22°		
Lateral limits	30°		
	Critical	Total	%
Flexural toppling (All)	1	23	4.35%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	49°	50°
2	■	48°	125°
3	■	50°	219°
4	■	43°	315°
5	■	70°	130°
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	23 (23 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	253		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

4.4.2 Análisis cinemático EG-02

La estación geomecánica EG-02, presenta 35 discontinuidades.

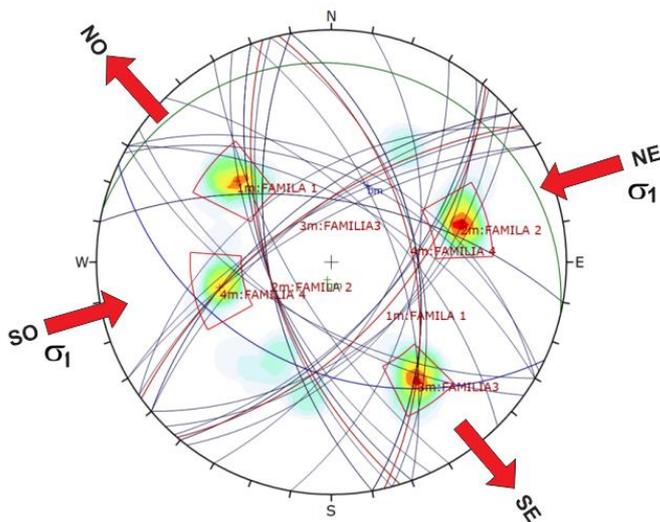
Tabla 4.31. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-02.

N°	Dip	Dip Direction	Familia
1	50°	80°	D-1
2	60°	10°	D-1
3	50°	28°	D-1
4	45°	30°	D-1
5	62°	45°	D-1
6	60°	30°	D-1
7	50°	75°	D-1
8	64°	10°	D-1
9	50°	80°	D-1
10	60°	70°	D-1
11	50°	80°	D-1
12	60°	130°	D-2
13	60°	130°	D-2
14	55°	100°	D-2
15	50°	128°	D-2
16	50°	135°	D-2
17	60°	132°	D-2
18	60°	120°	D-2
19	50°	140°	D-2
20	60°	215°	D-3
21	60°	260°	D-3
22	60°	210°	D-3
23	62°	250°	D-3
24	60°	250°	D-3
25	62°	255°	D-3
26	70°	240°	D-3
27	60°	260°	D-3
28	60°	245°	D-3
29	65°	330°	D-4
30	65°	320°	D-4
31	65°	325°	D-4
32	63°	320°	D-4
33	50°	325°	D-4
34	60°	320°	D-4
34	72°	330°	D-4
35	70°	60°	T



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	35
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figura 4.21. Diagrama de rosas de las fracturas – EG-02.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.50
	1.50 - 3.00
	3.00 - 4.50
	4.50 - 6.00
	6.00 - 7.50
	7.50 - 9.00
	9.00 - 10.50
	10.50 - 12.00
	12.00 - 13.50
	13.50 - 15.00
Maximum Density	14.78%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	35 (35 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 4.22. Diagrama de polos de las fracturas – EG-02.

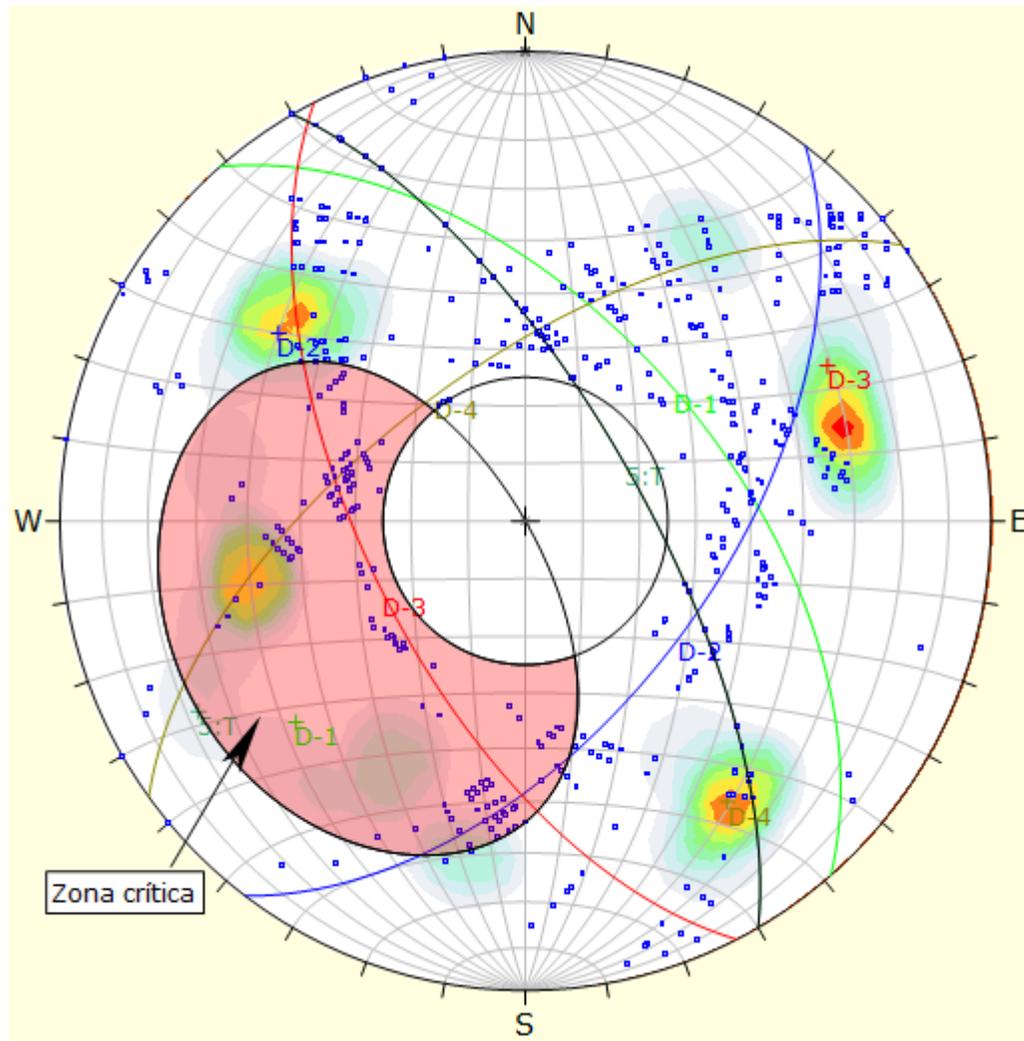


Figura 4.23. Probabilidad de ruptura planar 33.33%, englobando al polo de la familia D-1; a favor del talud, EG-02.

Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 1.50			
	1.50 – 3.00			
	3.00 – 4.50			
	4.50 – 6.00			
	6.00 – 7.50			
	7.50 – 9.00			
	9.00 – 10.50			
	10.50 – 12.00			
	12.00 – 13.50			
	13.50 – 15.00			
Maximun density		14.47%		
Contour data		Polo vectors		
Contour distribution		Fisher		
Counting circle size		1.00%		
Kinematic analysis		Planar siliding		
Slope dip		70°		
Slope Dip direction		60°		
Friction angle		25°		
	Critical	Total	%	
Planar siliding (All)	12	36	33.33%	
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	55°	49°	D-1
2	■	56°	127°	D-2
3	■	62°	243°	D-3
4	■	63°	324	D-4
5	■	70°	60°	T
Plot Mode		Pole vectors		
Vector count		36 (36 entries)		
Intersection mode		Grid data planes		
Intersections count		625		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal area		

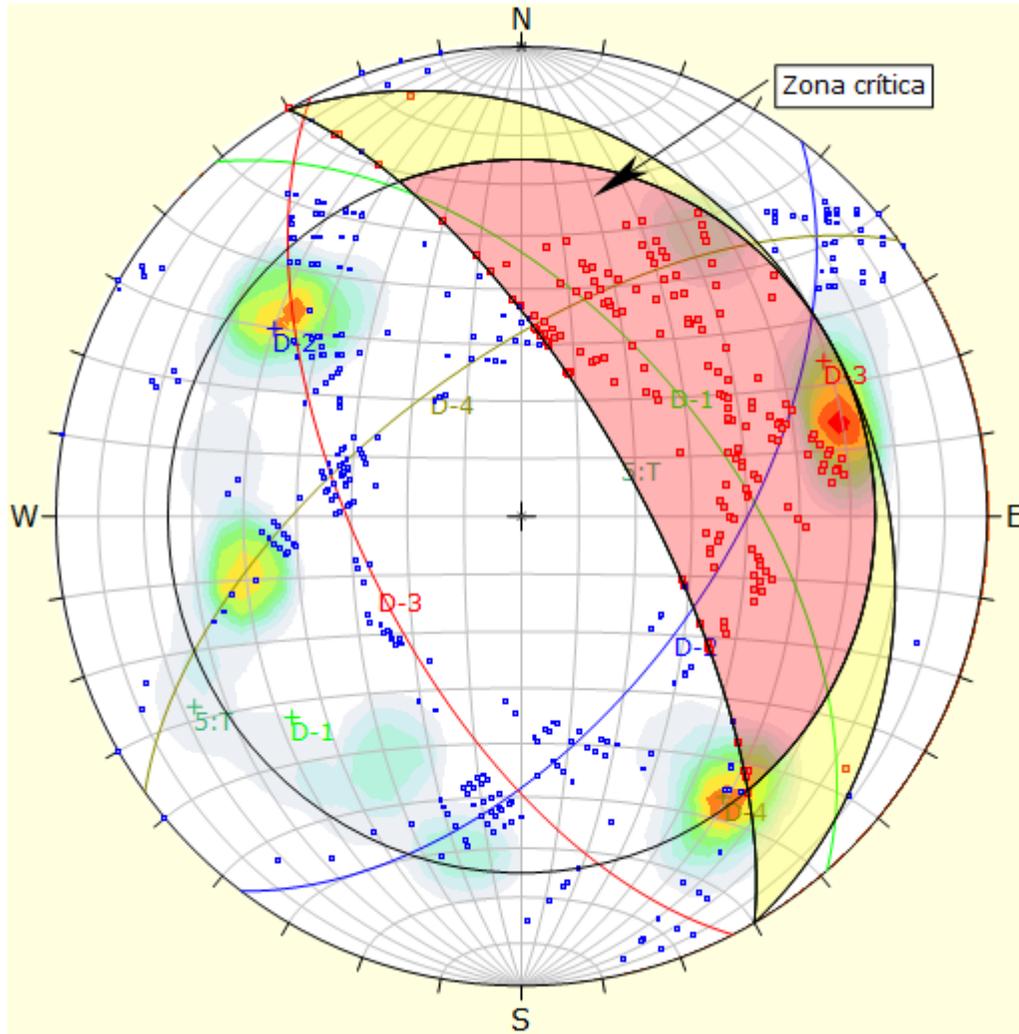


Figura 4.24. Probabilidad de ruptura en cuña con 37.78%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2, EG-02.

Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.50		
	1.50 – 3.00		
	3.00 – 4.50		
	4.50 – 6.00		
	6.00 – 7.50		
	7.50 – 9.00		
	9.00 – 10.50		
	10.50 – 12.00		
	12.00 – 13.50		
	13.50 – 15.00		
Maximum density	14.47%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	70°		
Slope Dip direction	60°		
Friction angle	25°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	236	625	37.76%
	Color	Dip	Dip direction
			Label
User planes			
1	■	55°	49° D-1
2	■	56°	127° D-2
3	■	62°	243° D-3
4	■	63°	324° D-4
5	■	70°	60° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	36 (36 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	625		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

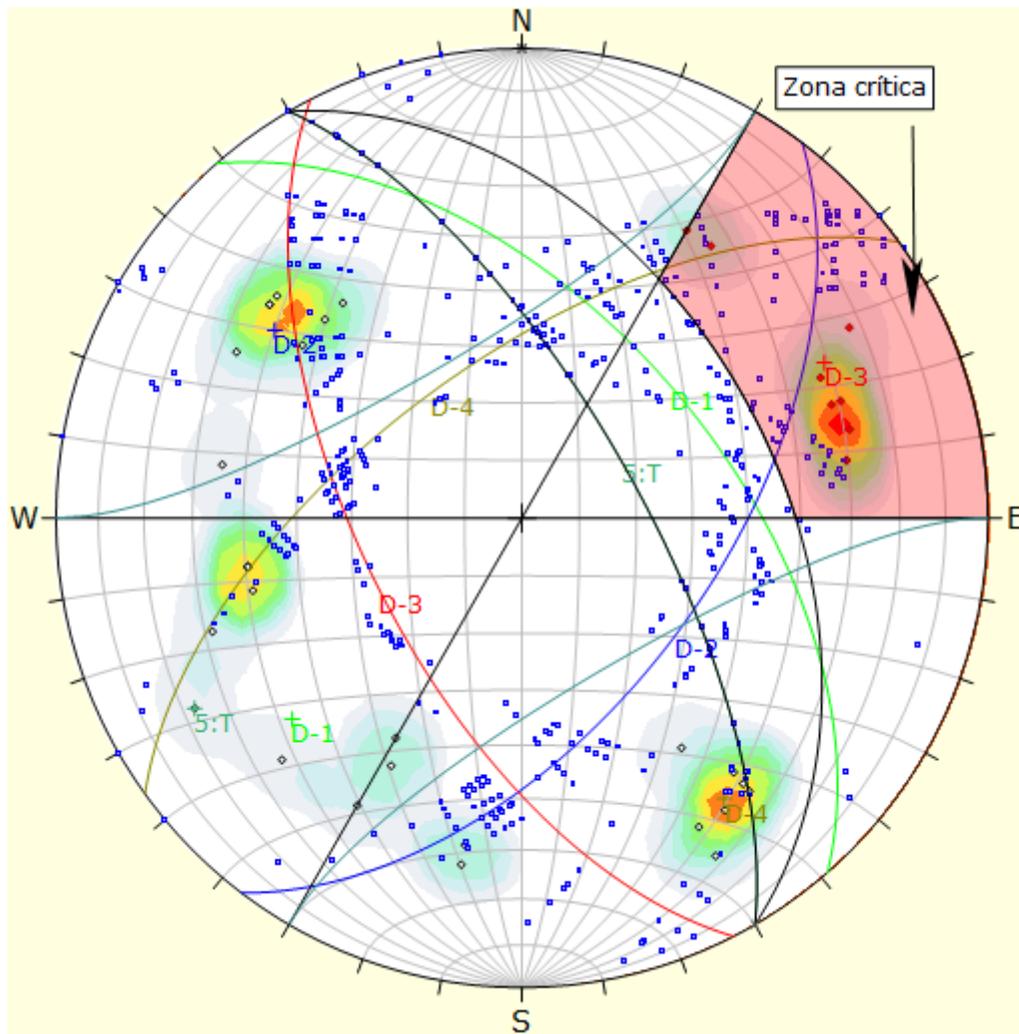


Figura 4.25. Probabilidad de ruptura por vuelco con 25.00%, englobando al polo de la familia D-3, EG-03.

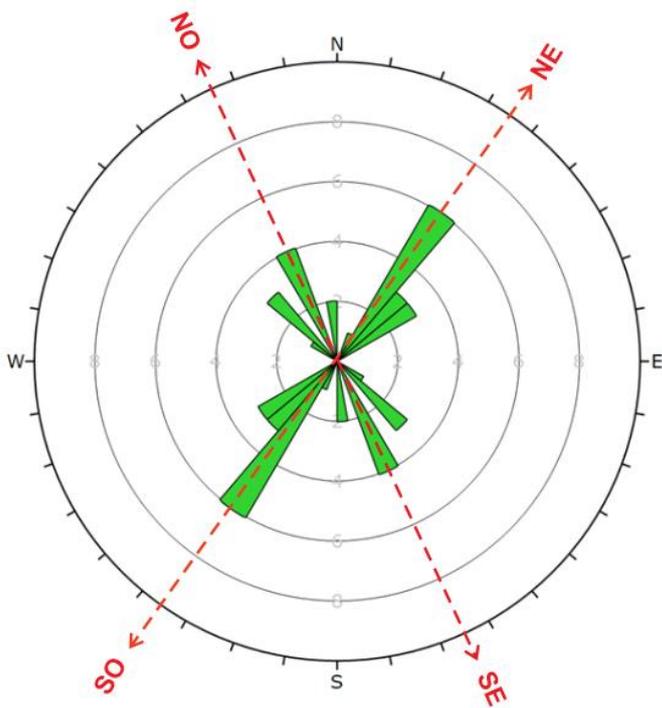
Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.50		
	1.50 – 3.00		
	3.00 – 4.50		
	4.50 – 6.00		
	6.00 – 7.50		
	7.50 – 9.00		
	9.00 – 10.50		
	10.50 – 12.00		
	12.00 – 13.50		
	13.50 – 15.00		
Maximum density		14.47%	
Contour data		Polo vectors	
Contour distribution		Fisher	
Counting circle size		1.00%	
Kinematic analysis		Flexural toppling	
Slope dip		70°	
Slope Dip direction		60°	
Friction angle		25°	
Lateral limits		30°	
	Critical	Total	%
Flexural toppling (All)	9	36	25.00%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	55°	49° D-1
2	■	56°	127° D-2
3	■	62°	243° D-3
4	■	63°	315° D-4
5	■	70°	60° T
Plot Mode		Pole vectors	
Vector count		36 (36 entries)	
Intersection mode		Grid6 data planes	
Intersections count		625	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal area	

4.4.3 Análisis cinemático EG-03

La estación geomecánica EG-03, presenta 30 discontinuidades.

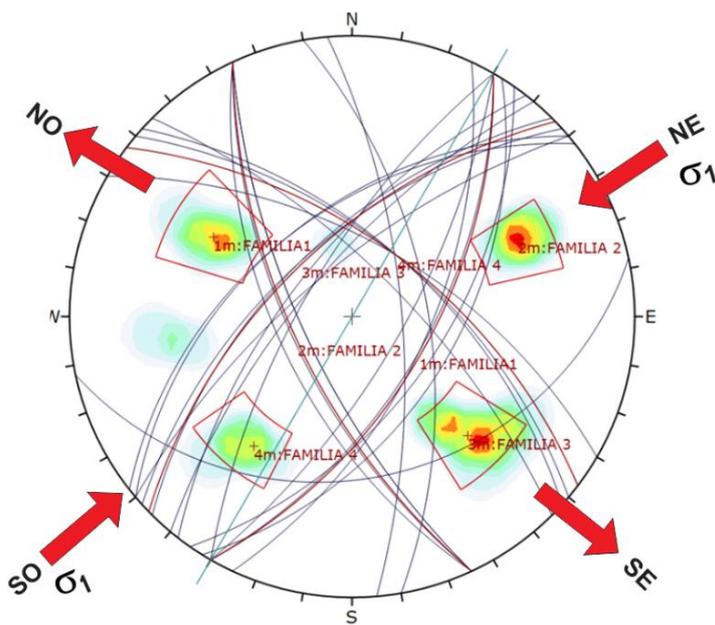
Tabla 4.32. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-03.

N°	Dip	Dip Direction	Familia
1	70°	45°	D-1
2	60°	42°	D-1
3	60°	40°	D-1
4	60°	80°	D-1
5	70°	85°	D-1
6	60°	30°	D-1
7	55°	125°	D-2
8	70°	120°	D-2
9	60°	120°	D-2
10	50°	122°	D-2
11	60°	115°	D-2
12	30°	168°	D-2
13	70°	245°	D-3
14	70°	245°	D-3
15	60°	245°	D-3
16	65°	245°	D-3
17	60°	315°	D-4
18	60°	318°	D-4
19	70°	310°	D-4
20	50°	320°	D-4
21	50°	322°	D-4
22	65°	308°	D-4
23	70°	300°	D-4
24	70°	320°	D-4
25	70°	110°	T



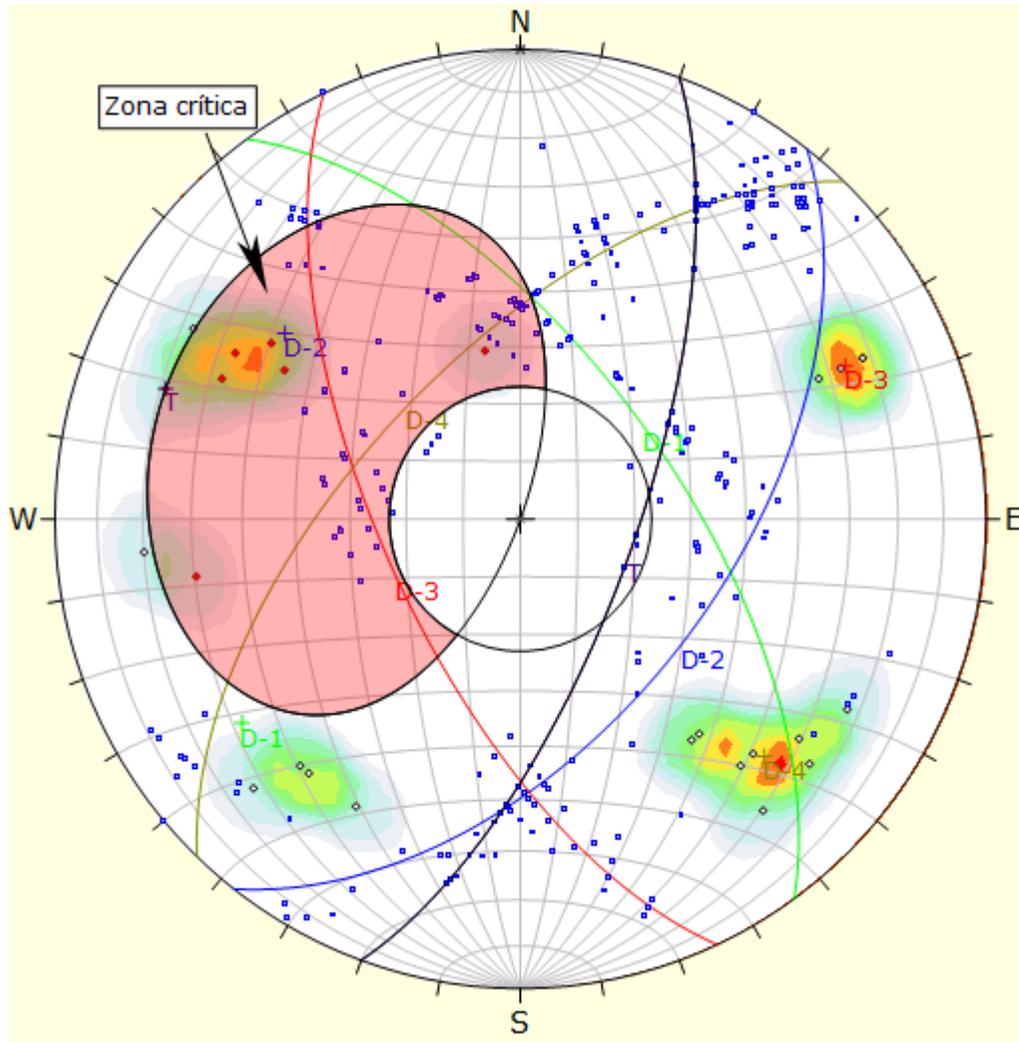
Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	23
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figura 4.26. Diagrama de rosas de las fracturas – EG-03.



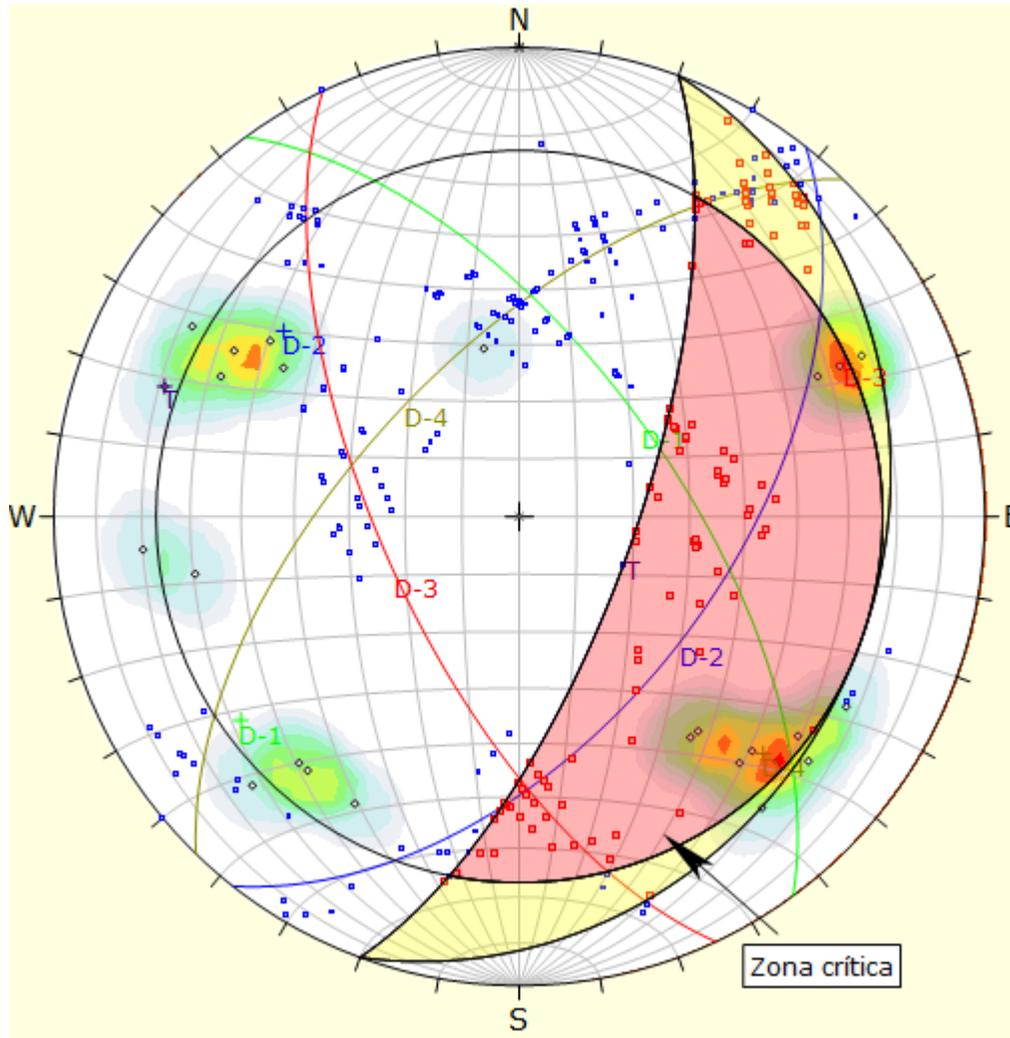
Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.60
	1.60 - 3.20
	3.20 - 4.80
	4.80 - 6.40
	6.40 - 8.00
	8.00 - 9.60
	9.60 - 11.20
	11.20 - 12.80
	12.80 - 14.40
	14.40 - 16.00
Maximum Density	15.62%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	24 (24 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 4.27. Diagrama de polos de las fracturas – EG-03.



Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 1.60			
	1.60 – 3.20			
	3.20 – 4.80			
	4.80 – 6.40			
	6.40 – 8.00			
	8.00 – 9.60			
	9.60 – 11.20			
	11.20 – 12.80			
	12.80 – 14.40			
	14.40 – 16.00			
Maximun density		15.18%		
Contour data		Polo vectors		
Contour distribution		Fisher		
Counting circle size		1.00%		
Kinematic analysis		Planar siliding		
Slope dip		70°		
Slope Dip direction		110°		
Friction angle		23°		
	Critical	Total	%	
Planar siliding (All)	7	25	28.00%	
	Color	Dip	Dip direction	
			Label	
User planes				
1	■	63°	54°	D-1
2	■	54°	128	D-2
3	■	66°	245°	D-3
4	■	62°	314	D-4
5	■	70°	110°	T
Plot Mode		Pole vectors		
Vector count		25 (25 entries)		
Intersection mode		Grid data planes		
Intersections count		299		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal area		

Figura 4.28. Probabilidad de ruptura planar 28.00%, englobando al polo de la familia D-2; a favor del talud, EG-03.



Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.60		
	1.60 – 3.20		
	3.20 – 4.80		
	4.80 – 6.40		
	6.40 – 8.00		
	8.00 – 9.60		
	9.60 – 11.20		
	11.20 – 12.80		
	12.80 – 14.40		
	14.40 – 16.00		
Maximum density		15.18%	
Contour data		Polo vectors	
Contour distribution		Fisher	
Counting circle size		1.00%	
Kinematic analysis		Wedge sliding	
Slope dip		70°	
Slope Dip direction		110°	
Friction angle		23°	
		Critical	Total
Wedge sliding		112	299
		37.46%	
		Color	Dip
User planes			
1	■	63°	54°
2	■	54°	128°
3	■	66°	245°
4	■	62°	314°
5	■	70°	110°
Plot Mode		Pole vectors	
Vector count		25 (25 entries)	
Intersection mode		Grid data planes	
Intersections count		299	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal area	

Figura 4.29. Probabilidad de ruptura en cuña con 37.46%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2, EG-03.

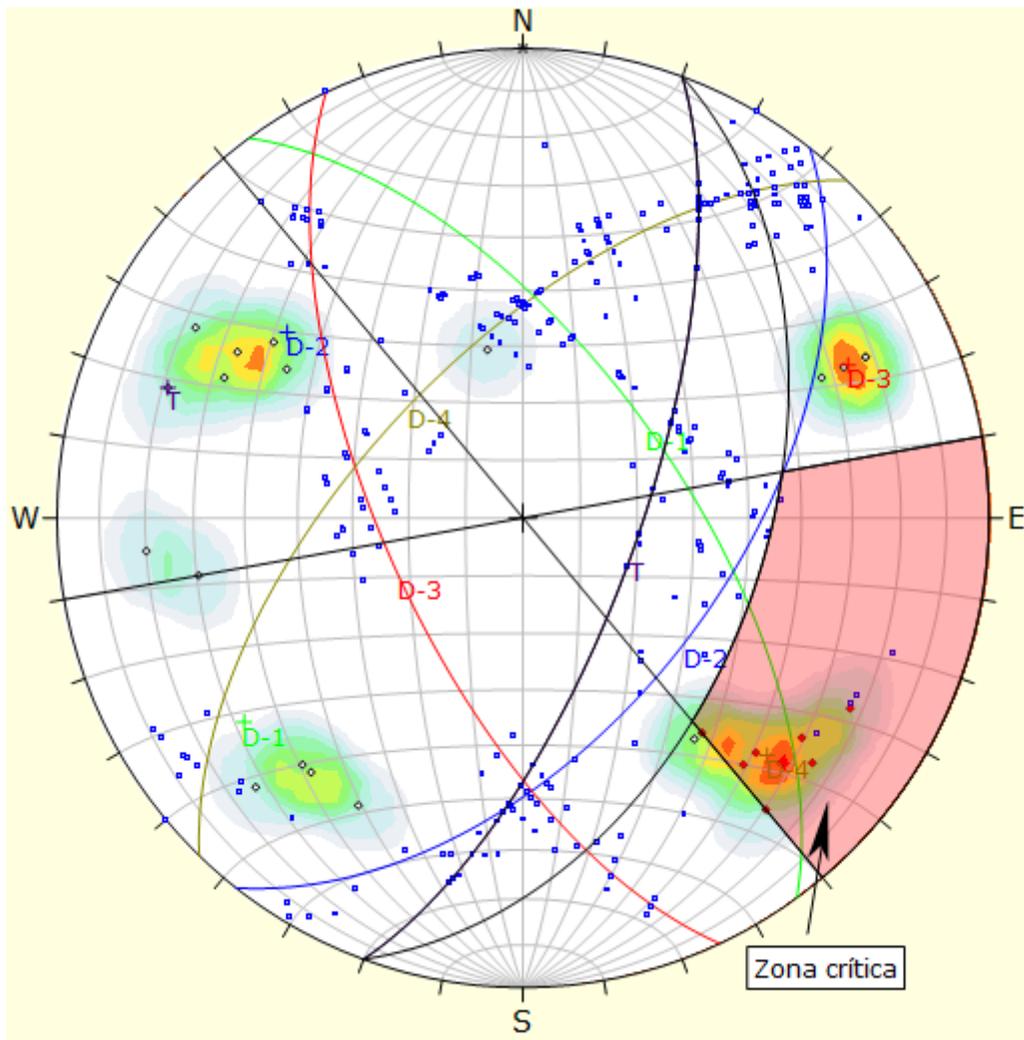


Figura 4.30. Probabilidad de ruptura por vuelco con 28.00%, englobando al polo de la familia D-4, EG-03.

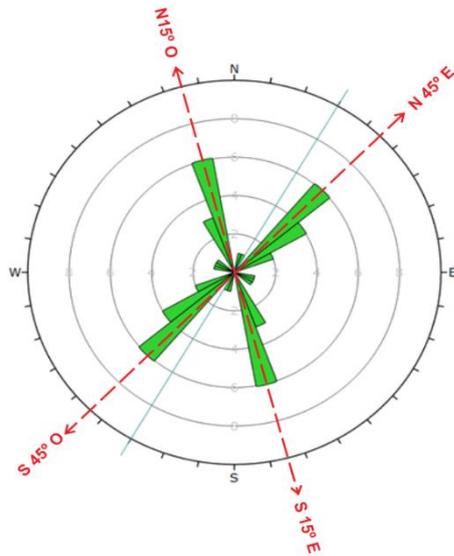
Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.60		
	1.60 – 3.20		
	3.20 – 4.80		
	4.80 – 6.40		
	6.40 – 8.00		
	8.00 – 9.60		
	9.60 – 11.20		
	11.20 – 12.00		
	12.00 – 14.40		
	14.40 – 16.00		
Maximum density		15.18%	
Contour data		Polo vectors	
Contour distribution		Fisher	
Counting circle size		1.00%	
Kinematic analysis		Flexural toppling	
Slope dip		70°	
Slope Dip direction		110°	
Friction angle		23°	
Lateral limits		30°	
	Critical	Total	%
Flexural toppling (All)	7	25	28.00%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	63°	54°
2	■	54°	128°
3	■	66°	245°
4	■	62°	315°
5	■	70°	110°
Plot Mode		Pole vectors	
Vector count		25 (25 entries)	
Intersection mode		Grid6 data planes	
Intersections count		229	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal area	

4.4.4 Análisis cinemático EG-04

La estación geomecánica EG-04, presenta 30 discontinuidades.

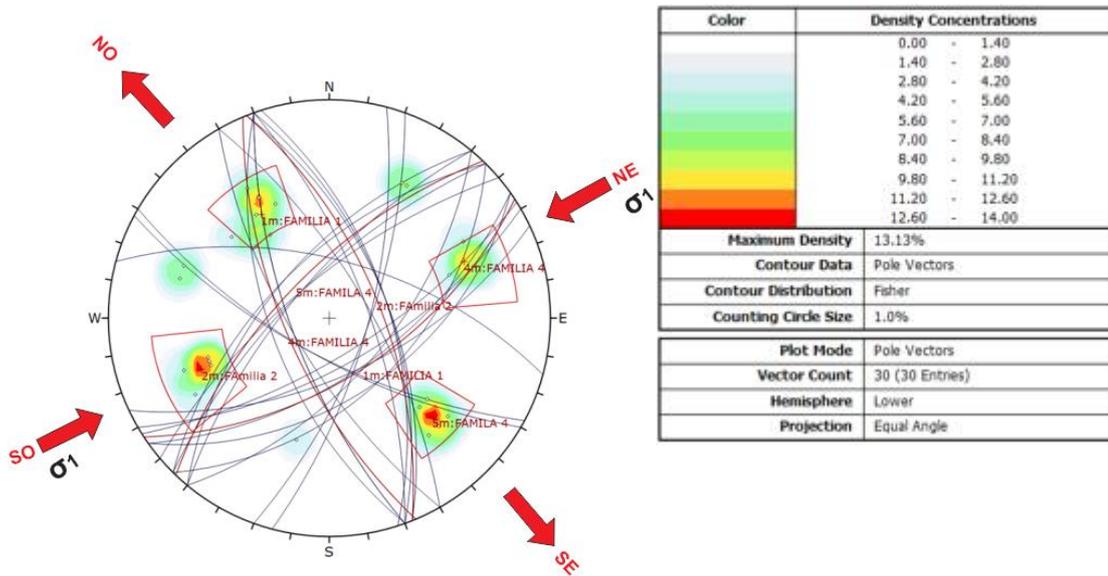
Tabla 4.33. Caracterización geomecánica mediante la orientación de discontinuidades, EG-04.

N°	Dip	Dip Direction	Familia
1	70°	60°	D-1
2	60°	72°	D-1
3	72°	70°	D-1
4	60°	68°	D-1
5	60°	15°	D-1
6	60°	70°	D-1
7	50°	145°	D-2
8	60°	130°	D-2
9	50°	135°	D-2
10	65°	150°	D-2
11	60°	155°	D-2
12	70°	148°	D-2
13	60°	145°	D-2
14	68°	105°	D-2
15	70°	110°	D-2
16	70°	250°	D-3
17	72°	250°	D-3
18	68°	208°	D-3
19	70°	210°	D-3
20	70°	240°	D-3
21	60°	250°	D-3
22	60°	315°	D-4
23	68°	320°	D-4
24	70°	315°	D-4
25	60°	310°	D-4
26	60°	310°	D-4
27	70°	100°	T



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	26
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figura 4.31. Diagrama de rosas de las fracturas – EG-04.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.40
	1.40 - 2.80
	2.80 - 4.20
	4.20 - 5.60
	5.60 - 7.00
	7.00 - 8.40
	8.40 - 9.80
	9.80 - 11.20
	11.20 - 12.60
	12.60 - 14.00
Maximum Density	13.13%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	30 (30 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 4.32. Diagrama de polos de las fracturas– EG-04.

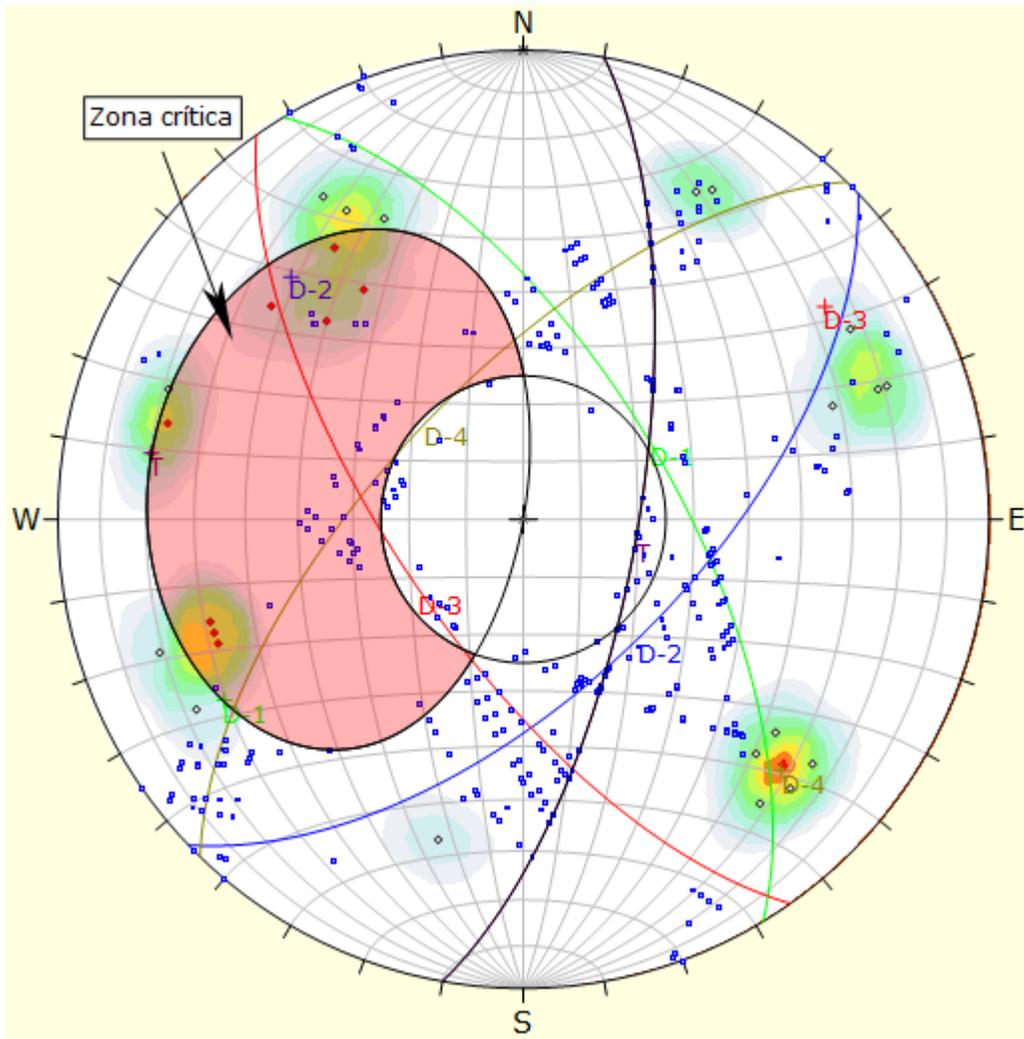


Figura 4.33. Probabilidad de ruptura planar 33.33%, englobando al polo de las familias: D-2 y D-1; a favor del talud, EG-04.

Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 – 1.60		
	1.60 – 3.20		
	3.20 – 4.80		
	4.80 – 6.40		
	6.40 – 8.00		
	8.00 – 9.60		
	9.60 – 11.20		
	11.20 – 12.80		
	12.80 – 14.40		
	14.40 – 16.00		
Maximun density	15.14%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Planar siliding		
Slope dip	70°		
Slope Dip direction	100°		
Friction angle	25°		
	Critical	Total	%
Planar siliding (All)	9	27	33.33%
	Color	Dip	Dip direction
	User planes		
1	■	64°	59°
2	■	61°	136°
3	■	68°	235°
4	■	66°	314°
5	■	70°	100°
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	27 (27 Entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	351		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

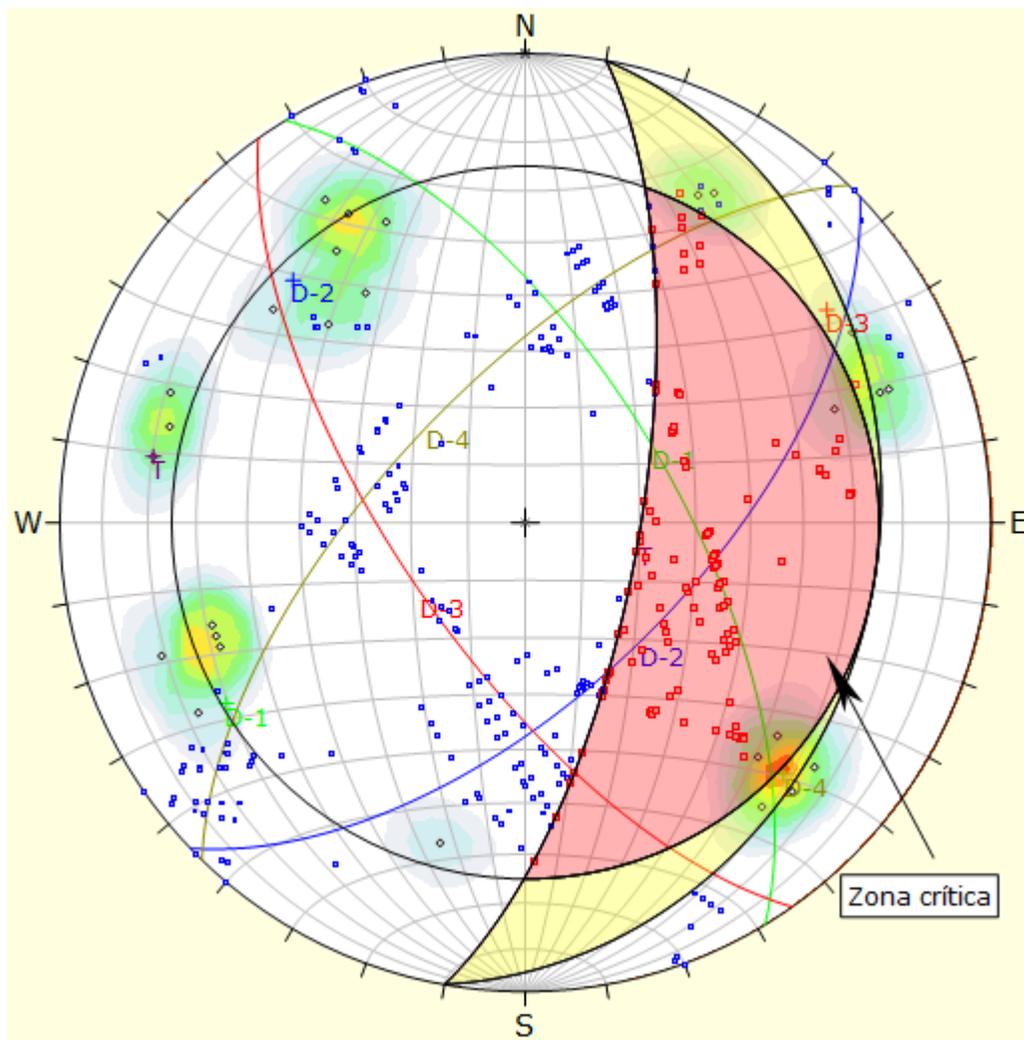


Figura 4.34. Probabilidad de ruptura en cuña con 34.19%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2, EG-04.

Symbol	Feature			
◇	Polo vectors			
■	Critical intersection			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 – 1.60			
	1.60 – 3.20			
	3.20 – 4.80			
	4.80 – 6.40			
	6.40 – 8.00			
	8.00 – 9.60			
	9.60 – 11.20			
	11.20 – 12.80			
	12.80 – 14.40			
	14.40 – 16.00			
Maximun density	15.14%			
Contour data	Polo vectors			
Contour distribution	Fisher			
Counting circle size	1.00%			
Kinematic analysis	Wedge sliding			
Slope dip	70°			
Slope Dip direction	100°			
Friction angle	25°			
	Critical	Total	%	
Wedge sliding	120	351	34.19%	
	Color	Dip	Dip direction	
			Label	
User planes				
1	■	64°	59°	D-1
2	■	61°	136°	D-2
3	■	68°	235°	D-3
4	■	66°	314°	D-4
5	■	70°	100°	T
Plot Mode	Pole vectors			
Vector count	27 (27 entries)			
Intersection mode	Grid data planes			
Intersections count	351			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal area			

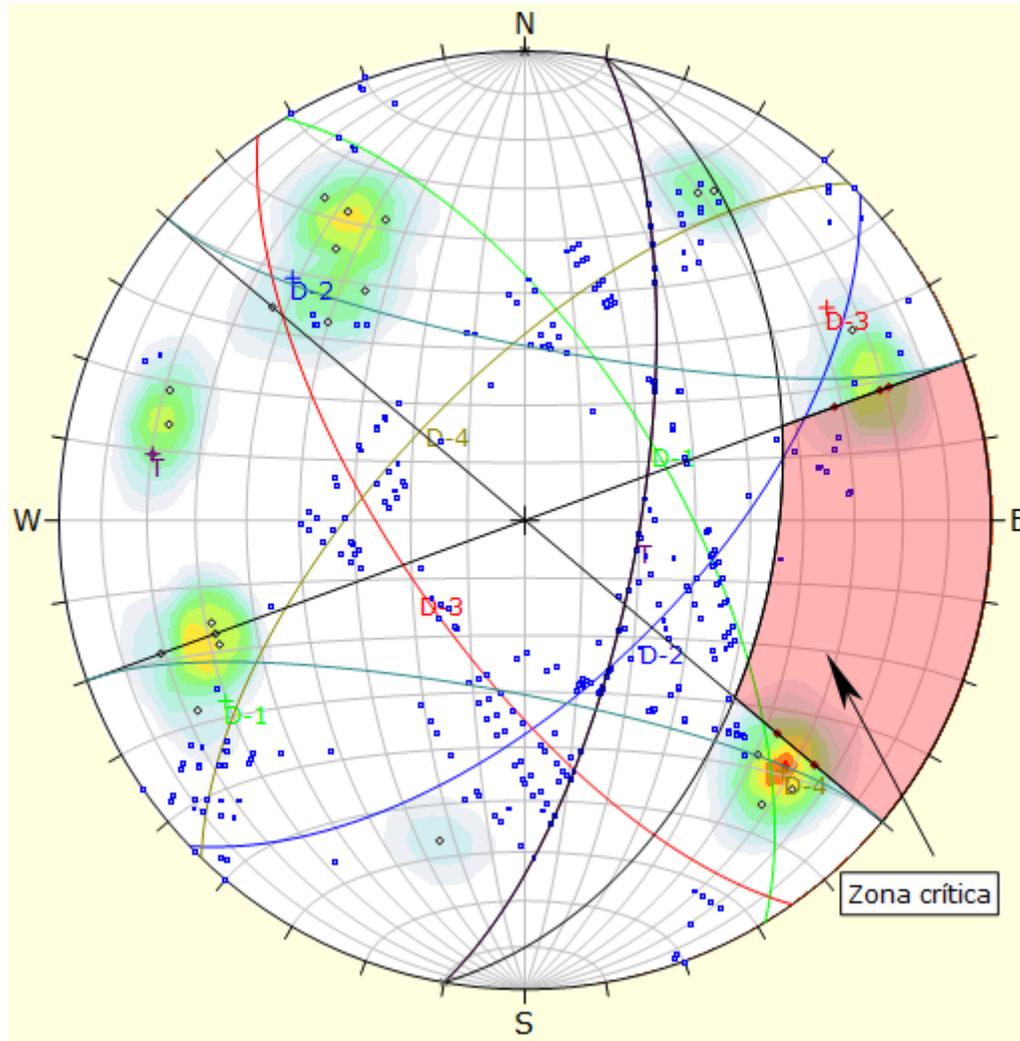


Figura 4.35. Probabilidad de ruptura por vuelco con 18.52%, englobando al polo de la familia D-3, EG-04.

Symbol	Feature				
◇	Polo vectors				
◆	Critical vectors				
■	Intersection				
Color	Density concentrations				
	0.00 – 1.60				
	1.60 – 3.20				
	3.20 – 4.80				
	4.80 – 6.40				
	6.40 – 8.00				
	8.00 – 9.60				
	9.60 – 11.20				
	11.20 – 12.00				
	12.00 – 14.40				
	14.40 – 16.00				
Maximun density		15.14%			
Contour data		Polo vectors			
Contour distribution		Fisher			
Counting circle size		1.00%			
Kinematic analysis		Flexural toppling			
Slope dip		70°			
Slope Dip direction		100°			
Friction angle		25°			
Lateral limits		30°			
		Critical	Total	%	
Flexural toppling (All)		5	27	18.52%	
		Color	Dip	Dip direction	Label
User planes					
1	■	64°	59°	D-1	
2	■	61°	136°	D-2	
3	■	68°	235°	D-3	
4	■	66°	314°	D-4	
5	■	70°	100°	T	
Plot Mode		Pole vectors			
Vector count		27 (27 entries)			
Intersection mode		Grid6 data planes			
Intersections count		351			
Hemisphere		Lower			
Projection		Equal area			

4.5 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DEL MARMOL

La calidad del macizo rocoso (Roca Tipo III, Regular) y realizado el análisis cinemático, se procedió a realizar los cálculos de los parámetros de diseño de la cantera de marmol para su posterior explotación. La explotación del yacimiento de marmol que se ubica al SE del distrito de Jorge Chávez será aplicando el criterio de Quispe Alaya (2019) mediante la explotación a cielo abierto por terrazas, por cortes del terreno comenzando de la parte superior hacia la inferior, mediante bancos, al finalizar el primer corte se inicia con el segundo.

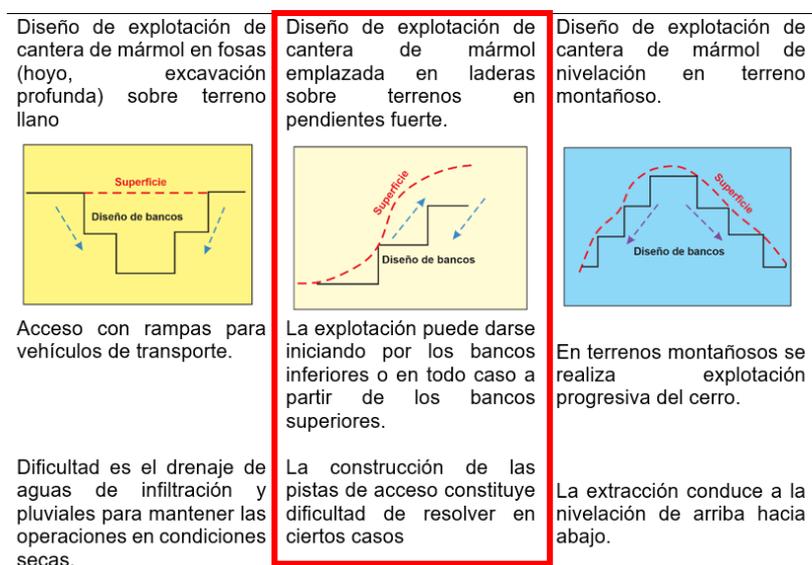


Figura 4.36. Método de explotación adecuado para la cantera de marmol.
Fuente: Quispe, 2019.

4.5.1 Secuencia de explotación del marmol

La secuencia de explotación de marmol consistirá en la explotación de arriba hacia abajo, iniciando con el primer banco representado con el número 1, posteriormente se continuará con el banco 2, banco 3 y banco 4 tal como está representado en la figura de abajo:

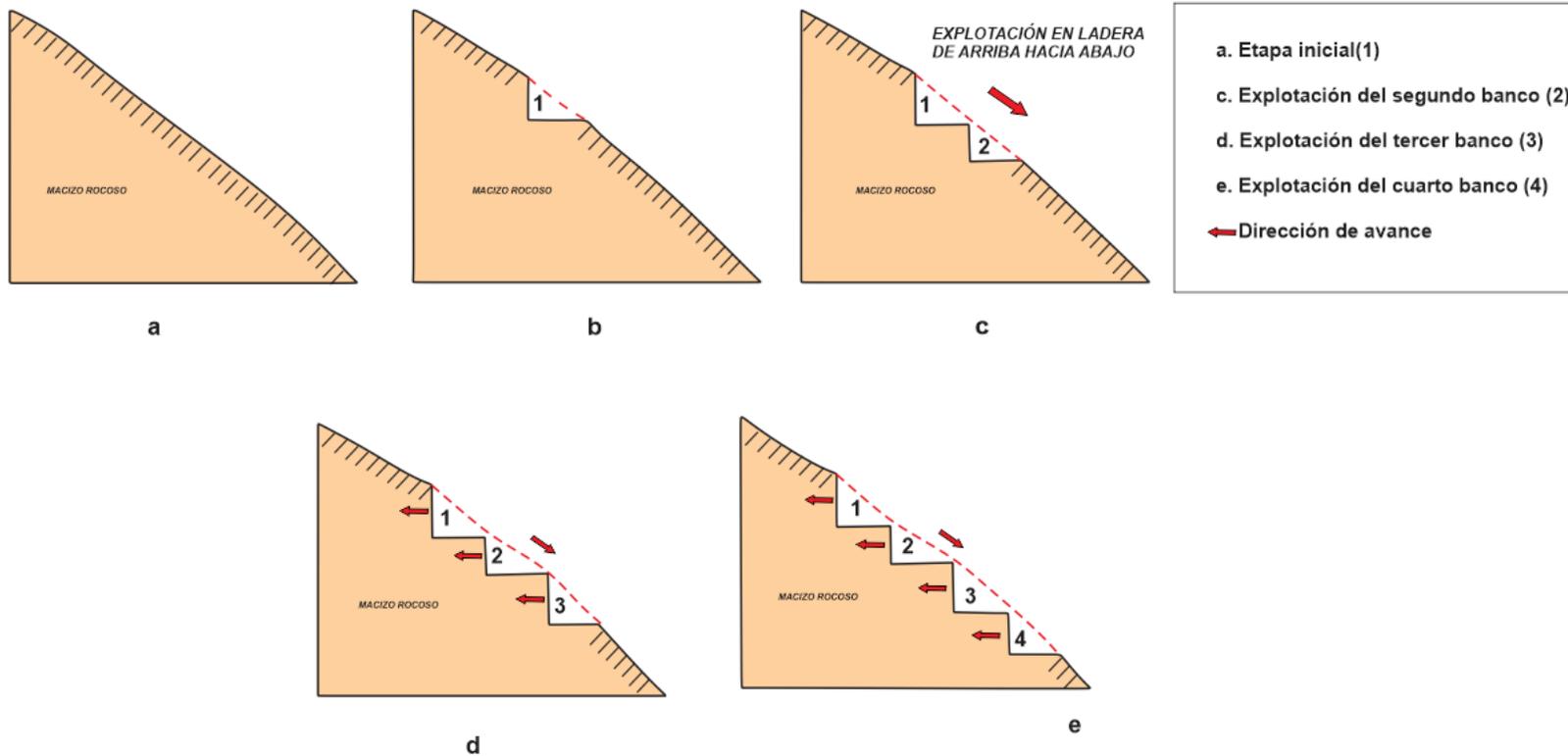


Figura 4.37. Secuencia de explotación de las calizas marmolizadas.

Fuente: Quipe, 2019.

4.5.2 Parámetros de diseño del marmol

El cálculo de los parámetros de diseño de la cantera de marmol ubicados al NE del Distrito de Jorge Chávez, tienen el objetivo de minimizar la remoción de material estéril y lograr la mayor recuperación del mineral por consiguientes con el menor gasto en la excavación. Para ello se analizaron los factores: Geométricos, geomecánicos, operativos y medioambientales:

Tabla 4.34 Factores geométricos del yacimiento de marmol.

Factores geométricos	
Ancho del yacimiento	135 m.
Largo del yacimiento	289 m.
Espesor del yacimiento	130 m.
Forma del yacimiento	Estratificado
Inclinación de tajo	84°

Tabla 4.35. Propiedades geomecánicas del marmol.

Factores geométricos	
Peso específico	2.59 gr/cm ³
Ángulo de fricción	23.73°
Cohesión	4.615 MPa
Resistencia a la compresión uniaxial	124.998 MPa
RMR	56.2 Tipo III (regular)
GSI	54.2 (regular)

Después de conocerse la caracterización del macizo rocoso se procedió al diseño de las diferentes partes que conformarán el diseño de explotación del marmol. El yacimiento no metálico que aflora superficialmente que se proyecta iniciar el proceso de extracción debe tener las siguientes dimensiones:

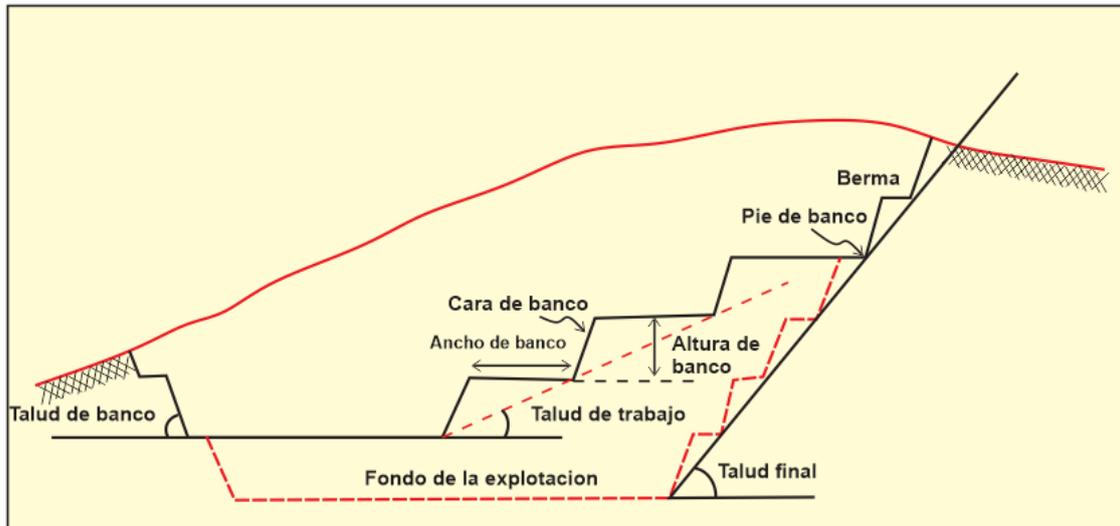


Figura 4.38. Sección transversal de una explotación superficial
Fuente: Herrera, 2007.

- **Altura de explotación del yacimiento (H)**

La altura de explotación del yacimiento de marmol del distrito de Jorge Chávez se calculó teniendo en cuenta las diferencias de cotas existentes entre la cota inferior y superior.

$$H = H_s - H_i$$

Donde:

H = Altura del yacimiento (m)

H_s = Cota superior (m)

H_i = Cota inferior (m)

Para calcular la cota máxima y mínima se realiza un análisis del mapa topográfico y de la imagen digital. Para una primera etapa de la explotación se va a considerar 100 m. de profundidad.

Remplazando datos:

$$H = H_s - H_i = 2550 \text{ m} - 2450 \text{ m} = 100 \text{ m}$$

- **Altura de banco (HB)**

Se denomina altura de banco a la distancia vertical que se mide entre los niveles consecutivos de explotación. Para la explotación del yacimiento de marmol se ha propuesto una altura promedio de 10 m.

- **Numero de bancos**

El número de bancos se determina con la siguiente formula:

$$Nb = \frac{H}{Hb}$$

Donde:

Nb = Numero de bancos

H = profundidad de la cantera (m)

Hb = Altura del banco (m)

Reemplazando:

H= 100 m

Hb= 10m

$$Nb = \frac{100}{10} = 10$$

Se tendrá 10 bancos de 10 m de altura cada uno.

- **Ancho de la plataforma de trabajo**

El ancho de la plataforma de trabajo se determina con la siguiente formula:

$$A = a (0.5 + 1.5 n)$$

Donde:

A = Ancho total de la plataforma (m)

a= Ancho del vehículo (m)

n = Número de carriles deseados

reemplazando tenemos:

Ancho del vehículo= 4m

Número de carriles= 1

Reemplazando:

$$A = 4 (0.5 + 1.5 * 1) = 8m$$

- **Ángulo del talud de los bancos**

El ángulo de los bancos está en función de la calidad de la roca y la altura. Es decir, mientras más resistencia tenga la roca y menos altura el banco, más vertical será el banco. Si la roca tiene menos resistencia y mayor altura el banco, más inclinación tendrá el talud. De acuerdo con el análisis geomecánico se tiene una roca regular por lo que se opta por un factor de 2.

Tabla 4.36. Clasificación de las rocas según Protodyakonov.

Categoría	Descripción	f
Excepcional	Cuarcita, basaltos y rocas de resistencia excepcional	20
Alta resistencia	Granito, areniscas silíceas y calizas muy competentes	15 – 10
Resistencia media	Caliza, granito algo alterado y areniscas.	8 – 6
	Areniscas medias y pizarras	5
	Arcillolitas, areniscas flojas y conglomerados friables	4 3
	Arcillolitas y esquistos, margas compactas	
Resistencia baja	Calizas y arcillolitas blandas, margas, areniscas friables, gravas y morrenas.	2
	Terrazas, arcillolitas fisuradas y rotas, gravas compactas y arcillas preconsolidadas.	1.5
Resistencia muy baja	Arcillas y gravas arcillosas	1
	Suelos orgánicos, turbas y arenas húmedas	0.6
	Arenas y gravas finas	0.5
	Limos, loes y fangos, etc.	0.3

Fuente: Montalar, 2009.

Teniendo en cuenta la tabla de Protodyakonov el ángulo óptimo de los bancos del depósito con la siguiente formula:

$$\varphi = \arctg (f)$$

Donde:

φ = Ángulo del talud del banco

f = Coeficiente de resistencia de Protodyakonov para calizas

Para nuestro caso, considerando los resultados del análisis geomecánicos de RMR y GSI en donde se determinó una roca de tipo III (regular calidad) por lo tanto aplicando el criterio geológico, se asume por seguridad un factor de 2. Por lo tanto, remplazando tenemos:

$$\varphi = \arctg (2) = 63^\circ$$

- **Ángulo de talud final (β)**

Se determina mediante la siguiente ecuación

$$\tan \beta = \frac{10}{B}$$

Siendo:

H= altura de banco (m)

B=B₁+B₂

B₁= ancho de banco (m)

B₂= longitud que genera el ángulo en la cara del banco (m)

$$B_2 = H \tan \theta$$

Datos:

Hb= 10m

Se asume un ancho de banco de trabajo es de 7m

Siendo θ = ángulo que forma la cara de talud con la vertical que es= 27°
(complemento del ángulo de 63°)

$$B_2 = 10 * \tan 27^\circ = 5.095$$

Reemplazando:

$$B = 7 + 5.095 = 12.095$$

Reemplazando en:

$$\tan \beta = \frac{10}{B}$$

$$\tan \beta = \frac{10}{12.095}$$

$$\tan \beta = 0.014$$

$$\beta = 39^\circ$$

Tabla 4.37. Resumen de los parámetros calculados.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
Profundidad de explotación	100 m.
Numero de bancos	10
Altura de banco	10 m.
Angulo de talud	63°
Angulo de talud final	39°
Ancho de la plataforma de trabajo	7 m.

4.5.3 Métodos en la extracción del marmol

Para la extracción del marmol existen dos métodos: El convencional y mecanizado. Para la presente investigación se proponen los dos métodos los cuales serán explicados a continuación:

Tabla 3.38. Método convencional.

Actividades	Procedimiento
Desbroce	Limpiar el material estéril que cubre el marmol, con palas manuales.
Arranque primario	Se aplica la expansión desde las fisuras naturales ocasionalmente con perforación neumática de taladros verticales y horizontales, los bloques naturales son de dimensiones variables.
Desprendimiento	Aplicación de cuñas expansoras explosivos rompedores y pólvoras
Volcado	Aplicación de palancas manuales y cuñas de trozos de roca para provocar el desequilibrio para caer sobre una cara mayor del block.
Carguío	Se emplea cuñas manuales o mecánicas.

Fuente: Quipe, 2019.

Tabla 4.39. Método mecanizado.

Actividades	Procedimiento
Desbroce	Limpieza de la cubierta con pala mecánica o pala sobre orugas.
Preparacion	Preparar el área de corte
Corte con hilo diamantado, rozadoras de brazo y perforación de taladros	Equipos: Grupo motor, chasis móvil con carriles, sistemas de control, hilo diamantado y otros.
Vuelco del bloque	Se desprende del macizo con empujadores hidráulicos.
Subdivisión	Se dividen en bloques aprovechables con equipos rotopercutivos hidráulicos con brocas o perforación neumática
Proceso de traslado	Con palas cargadoras

Fuente: Quipe, 2019.

Tabla 4.40. Servicios e instalaciones auxiliares.

Maquinas o equipos	Tipos, elementos y funciones
Empujadores de bloques	Empujadores de cilindros hidráulicos Empujadores de almohadilla
Grúas	Para tracción de bloques y traslado de maquinaria.
Palas mecánicas o cargadores frontales equipados	Para labores en canteras con implementos básicos Cuchara, horquilla, brazo saneador y de empuje.
Sistema de aire comprimido	Compresoras, tuberías, accesorios

Fuente: Quipe, 2019.

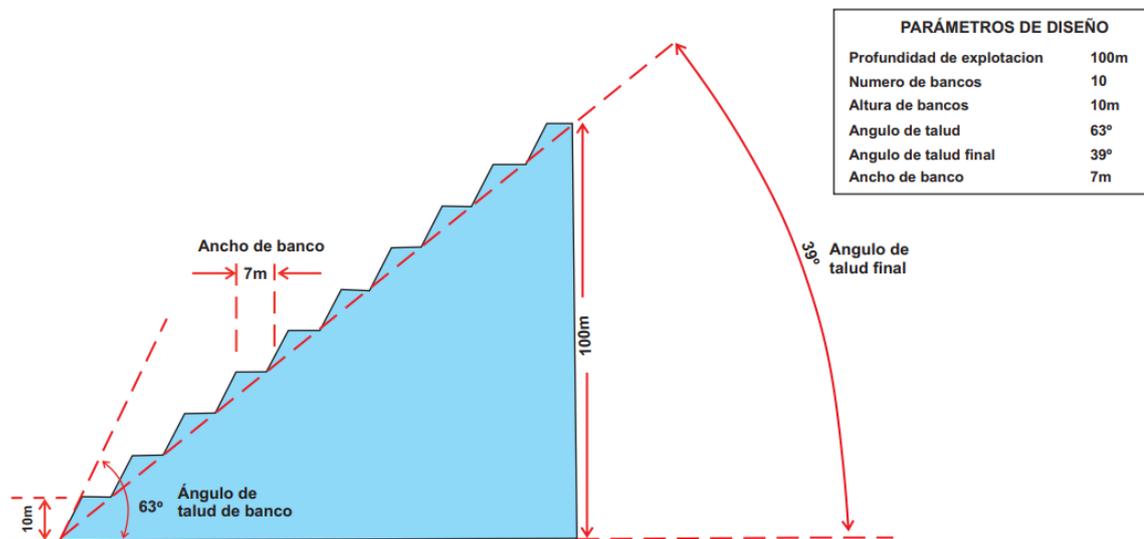


Figura 4.39. Parámetros de diseño calculados.

Fuente: Herrera, 2007.

4.5.4 Secuencia de explotación del marmol

La explotación del marmol se ubica al NE del distrito de Jorge Chávez se realizará siguiendo las siguientes actividades:

- **Desbroce:** Para la explotación del marmol será necesario primero extraer todo el material arcilloso, limoso y materia orgánica que se presenta como cobertura. Este proceso se debe realizar con un cargador Frontal.
- **Arranque primario:** El arranque primario consiste en aplicar la rotura (expansión) desde las fracturas de los bloques de calizas marmolizadas

utilizando la perforación de taladros verticales y horizontales, los bloques extraídos serán de varios tamaños.

- **Desprendimiento:** En esta etapa se realizará la aplicación de cuñas expansoras explosivos rompedores y pólvoras.
- **Volcado:** En esta etapa se aplicarán las palancas manuales y cuñas de trozos de roca para provocar el desequilibrio.
- **Carguío:** En esta etapa se emplean cuñas manuales o mecánicas.
- **Distancia de transporte hasta lugar de venta:** La distancia de transporte desde la cantera de marmol hasta el lugar de venta más cercano, la ciudad de Celendín es de 15 km, lo que representa una distancia bastante aceptable. La carretera es poco sinuosa y parte desde la misma cantera y en 95% es trocha carrozable.

En el desarrollo de las operaciones de explotación se seguirá una secuencia de extracción, la cual se esquematiza de esta manera:

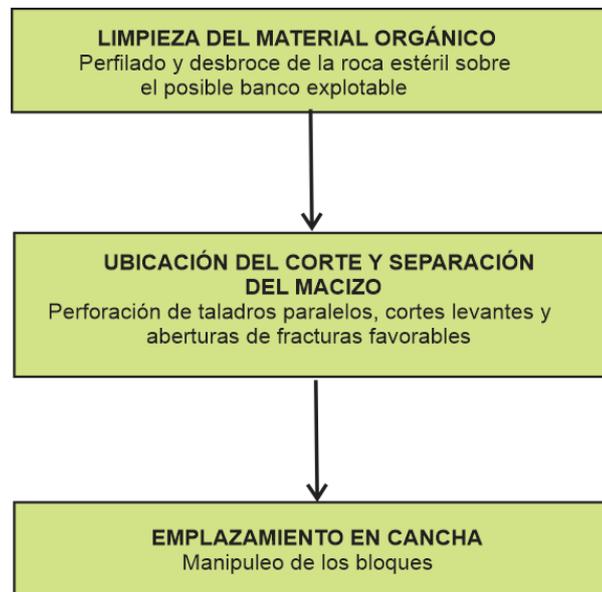


Figura 4.40. Etapas recomendadas para explotación del marmol - Distrito de Jorge Chávez

Fuente: Zegarra, 2015.

Una vez definidos los bancos de explotación se deberá seguir una secuencia de explotación de la cantera de marmol:

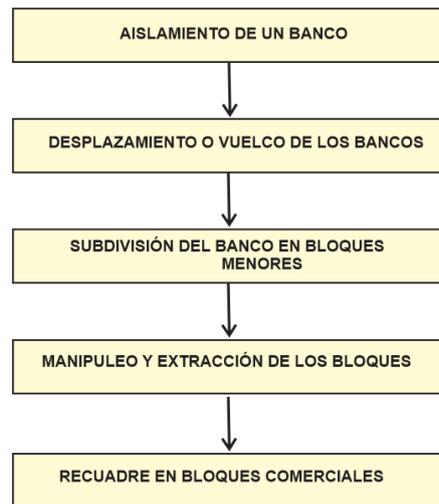


Figura 4.41. Secuencia de extracción de los bloques de marmol- Distrito de Jorge Chávez
Fuente: Zegarra, 2015.

4.5.5 Etapas de explotación del marmol

Las técnicas sugeridas para la subdivisión de los bloques es el de voladuras controladas, teniendo cuidado de no maltratar las caras de los bloques de marmol. De acuerdo con Zegarra (2015), la extracción del marmol se realizará en tres etapas:

- **Primera etapa:** Se realizará el desprendimiento del bloque de marmol mediante técnicas de covado y de volcadura, utilizando técnicas de voladura controlada. Se debe tener cuidado en elegir la dirección de los cortes, el diámetro de los taladros, la longitud y el espaciamiento. El paralelismo de los taladros es fundamental en la obtención de caras lo menos deterioradas posibles.

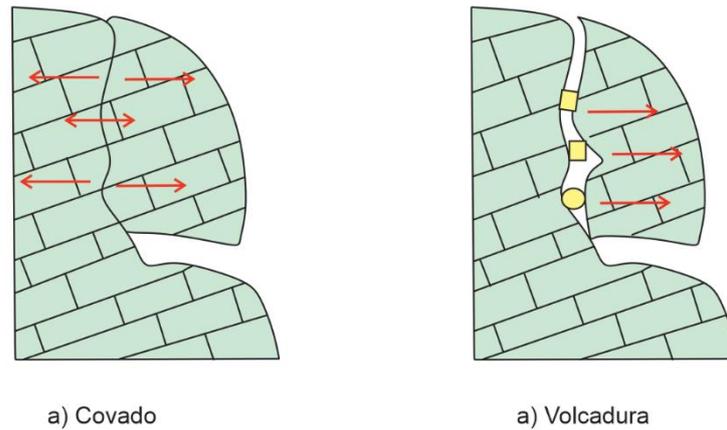


Figura 4.42. Desprendimiento de bloque de marmol mediante técnicas: a) covado y b) volcadura

Zegarra, 2015.

- **Segunda etapa:** Se utilizarán las mismas técnicas que la primera. Se procede a la separación de los bloques en planchas subhorizontales realizando levantes, para luego llevarlos a un lugar a la zona de trabajo donde se podrá subdividirlo en tamaños más pequeños y comercial.
- **Tercera etapa:** Se recuadran todos los bloques que se obtuvieron en la etapa anterior. La profundidad de los taladros para la separación de las caras de los bloques estará en función del tipo de roca y la altura de los bloques requeridos, debido a que los mármoles requieren perforaciones con taladros pasantes donde los taladros empiezan y terminan de cara a cara respectivamente.



Figura 4.43. Extracción del bloque de marmol tercera etapa.
Fuente: López, 2006.

En esta etapa se emplearán las cuñas cuya acción se conseguirá golpeando repetidamente por medio de un martillo de unos 4 kg de peso. También se utilizarán cuñas hidráulicas que están constituidas por una bomba hidráulica de alta presión y por varios cilindros hidráulicos, cada uno unido a la bomba a través de mangueras flexibles reforzadas. La bomba es accionada por un motor diésel, eléctrico o neumático.

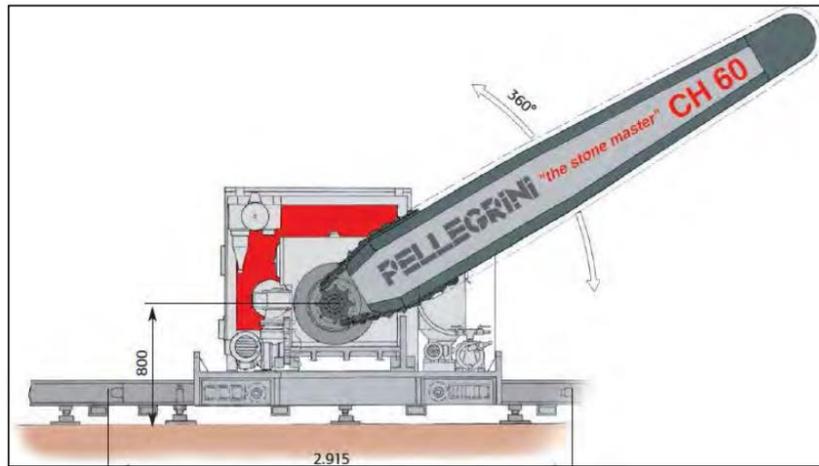


Figura 4.44. Máquina rozadora tipo Pellegrini.

Fuente: Zegarra, 2015.

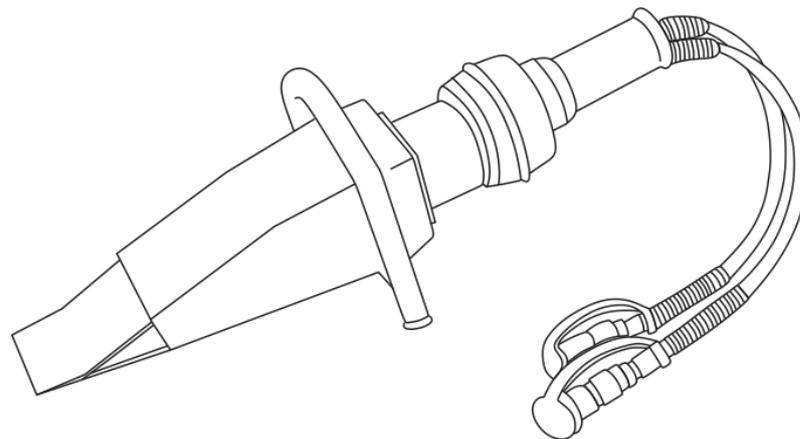


Figura 4.45. Figura Cuña hidráulica.

Fuente: López, 2006.

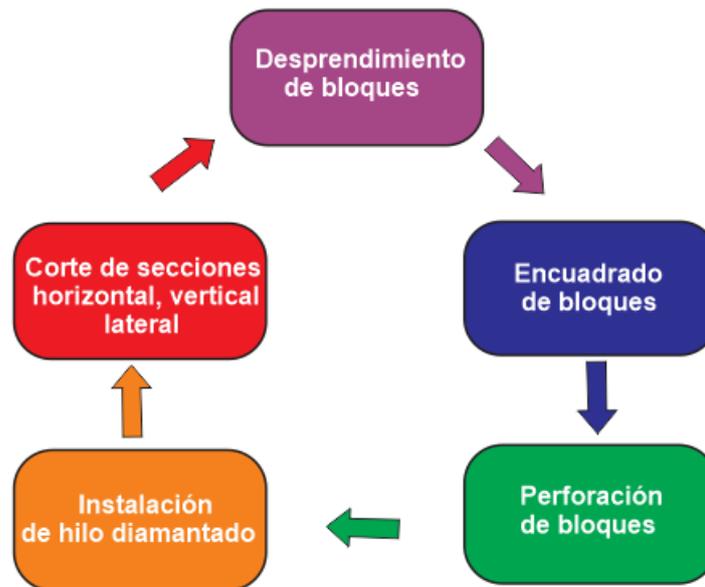


Figura 4.46. Ciclo de extracción de cada bloque de marmol
Fuente: López, 2006.

4.5.6 Tipo de marmol - Cantera Jorge Chávez

Después de realizar el análisis macroscópico de las 05 muestras de marmol obtenidas de la zona de estudio ubicada al SE del Distrito de Jorge Chávez, se determinaron que las coloraciones varían de un gris blanquecina con algunas vetas de calcita a una coloración gris anaranjadas- amarillentas. Las coloraciones gris blanquecinas probablemente por la transformación de las calizas de la Formación Cajamarca las mismas que poseen un alto contenido de CO_3Ca mayores al 90%, y las de coloraciones gros amarillentas a gris anaranjadas debido a que las calizas que tenían impurezas de óxidos de hierro. Los marmoles de coloraciones blanquecinas son muy requeridos en el mercado debido a que, de estos, se extrae el polvo mediante la trituración y luego se procesa para eliminar la mayor cantidad de impurezas. Este polvo se utiliza como agente colorante y relleno en pintura, blanqueado, masilla, plástico, lechada, cosméticos, papel y otros productos manufacturados. También se utiliza como aditivo del calcio como alimentos para animales, productos farmacéuticos y en la agricultura. A continuación, se muestra una tabla de la clasificación de los mármoles de acuerdo con su coloración:

Tabla 4.41. Clasificación del marmol según su composición química.

Colores de marmol	Impurezas
Blanquecinos	Son ricos en CO ₃ Ca suele estar a veces marcado por algunas vetas apenas visibles
Negros y grises	Contienen sustancias carbonosas u orgánicas
Rojos y rosados	Contienen óxidos como hematita, oligistos rojos.
Amarillos, cremas o pardos	Contienen limonita
Verdes	Contienen silicatos de magnesio

Fuente: López, 2006.

Las muestras de marmol que se obtuvieron dentro de la zona de estudio entran en la clasificación de marmol blanquecinos por poseer alto contenido de CO₃Ca y mármoles de coloración rojizos, anaranjados y cremas por el contenido de óxidos de hierro.

4.6 ESTUDIO PETROGRÁFICO

A continuación, se muestra el estudio macroscópico de las 05 muestras de marmol obtenidas de cada una de las 04 estaciones geomecánicas:

Tabla 4.42. Descripción macroscópica de la muestra SA-01.

Descripción macroscópica 01	
Código	SA- 01
Unidad geológica	Formación Cajamarca
Edad	Cretácico Superior
Lugar	Al Sur- Oeste del Distrito de Jorge Chávez
Color roca fresca	Gris marrón, anaranjado
Dureza	Media a alta
Peso específico	Media
Efervescencia al HCl	Alta
Presencia de restos fosiles	No presenta
Comentarios: Roca caliza ha sufrido un proceso de metamorfismo. Presenta además delgadas vetillas de calcita. Las manchas forman extrañas figuras que le proporciona un atractivo especial.	



Marmol de color marrón- anaranjado

Tabla 4.43. Descripción macroscópica de la muestra SA- 02.

Descripción macroscópica 02	
Código	SA- 02
Unidad geológica	Formación Cajamarca
Edad	Cretácico Superior
Lugar	Al Sur- Oeste del Distrito de Jorge Chávez
Color roca fresca	Gris blanquecino
Dureza	Media a alta
Peso específico	Media
Efervescencia al HCl	Alta
Presencia de restos fosiles	No presenta
Comentarios: Roca caliza ha sufrido un proceso de metamorfismo. Presenta varias venillas de calcita dispuestas en forma paralela. El marmol de esta coloración es muy cotizado en el mercado.	



Marmol de color blanquecino

Tabla 4.44. Descripción macroscópica de la muestra SA- 03.

Descripción macroscópica 03	
Código	SA- 03
Unidad geológica	Formación Cajamarca
Edad	Cretácico Superior
Lugar	Al Sur- Oeste del Distrito de Jorge Chávez
Color roca fresca	Gris blanquecino
Dureza	Media a alta
Peso específico	Media
Efervescencia al HCl	Alta
Presencia de restos fosiles	No presenta
Comentarios: Roca caliza ha sufrido un proceso de metamorfismo. Presenta varias venillas de calcita dispuestas en forma paralela. El marmol de esta coloración es muy cotizado en el mercado.	
	
Marmol de color gris blanquecino	

Tabla 4.45. Descripción macroscópica de la muestra SA- 04.

Descripción macroscópica 04	
Código	SA- 04
Unidad geológica	Formación Cajamarca
Edad	Cretácico Superior
Lugar	Al Sur- Oeste del Distrito de Jorge Chávez
Color roca fresca	Gris anaranjado
Dureza	Media a alta
Peso específico	Media
Efervescencia al HCl	Alta
Presencia de restos fosiles	Abundantes restos de pequeños fósiles.
<p>Comentarios: Roca caliza ha sufrido un proceso de metamorfismo. Presenta varias venillas de calcita dispuestas en forma paralela. Las manchas negras representan restos de fosiles. Esta combinación le otorga al marmol una singular belleza.</p>	
	
<p>Marmol de color gris anaranjado</p>	

Tabla 4.46. Descripción macroscópica de la muestra SA- 05.

Descripción macroscópica 05	
Código	SA- 05
Unidad geológica	Formación Cajamarca
Edad	Cretácico Superior
Lugar	Al Sur- Oeste del Distrito de Jorge Chávez
Color roca fresca	Gris marrón
Dureza	Media a alta
Peso específico	Media
Efervescencia al HCl	Alta
Presencia de restos fosiles	Se observa
Comentarios: Roca caliza ha sufrido un proceso de metamorfismo. Presenta varias venillas de calcita. En el centro se muestra una mancha de color gris rojizo.	
	
Marmol de color gris marrón	

4.7 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La caracterización geomecánica determinada en las cuatro (04) estaciones: SA-01, SA-02, SA-03 y SA-04; mediante el cálculo: RQD, RMR, y GSI reportan como resultado un macizo rocoso de calidad regular TIPO III, definiendo el método de explotación a cielo abierto por ser estructura masiva, siendo definido la ladera con pendiente casi empinada. Definiendo que la explotación y extracción de marmol será mediante bancos iniciando de la parte superior de la ladera hacia al pie de la ladera. Acotando además que definió el coeficiente de Protodyakonov tal como lo sugiere Montalar (2009), según la calidad del macizo rocoso, siendo 2 - Muy conservador, con el valor se realizaron los cálculos de los diferentes parámetros de diseño para mejores optimizaciones de explotación, contrastándose positivamente la hipótesis.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se seleccionaron cuatro estaciones geomecánicas denominadas SA-01, SA-02, SA-03, SA-04 y SA-05, a cada una de estas estaciones se realizó el análisis respectivo. El peso específico calculado para cada macizo rocoso por el laboratorio INGEOCONSULT & LAB SRL arroja un valor promedio de 2.59 TM/m³.

Los valores del RMR arrojan valores de 53 a 59 (TIPO III, regular calidad) y el GSI calculado insitu arrojan valores de 51 a 57 siendo una roca regular. La cohesión y el ángulo de fricción calculados con el software RocData 06 arrojan valores para la cohesión entre 4.273 MPa a 4.926 MPa y para el ángulo de fricción entre 22.496° a 24.991°.

El método de explotación idóneo elegido es el de explotación a cielo abierto en ladera con pendiente casi empinada, siendo la explotación por bancos de arriba hacia abajo. Esta caracterización geomecánica permitió aplicar la tabla de Protodyakonov tal como lo sugiere Montalar (2009). De dicha tabla, para un macizo rocoso de regular calidad, se obtuvo el coeficiente de 2, con este valor se realizaron los cálculos de los parámetros de diseño.

La profundidad de explotación calculado fue de 100m, 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 7m.

3.2. RECOMENDACIONES

Las empresas mineras realizar estudios de geofísica con la finalidad de determinar la presencia de un posible yacimiento tipo skarn en profundidad.

Los interesados en la explotación de marmol en poner mayor énfasis en la búsqueda de marmol de color gris blanquecino porque son muy requeridos en el mercado. Estos tipos de marmol se les encuentra dentro de la Formación Cajamarca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, D. 2019. *Optimización de los procesos de transformación productiva del marmol travertino mediante la filosofía Kaisen en el Instituto Regional del Marmol*. Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad Continental. Huancayo - Perú.
- Braja, M. 2001. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Editores S.A. de C.V.
- Baez, J. 2006. *Estudio de Impacto Ambiental por la Explotación de Marmol en la Zona San José de Minas y su Plan de Manejo Ambiental*. Quito- Ecuador. IHSN (International Household Survey Network)
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, 6: 189 236.
- Berrocal, M. 2015. *Estabilidad de Excavaciones Subterráneas*. Lima - Perú: Ventura Graf.
- Cartaya, M. 2021. *Caracterización Geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la Región Oriental del país Cuba*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba.
- Cuyubamba, H. 2019. *Zonificación geomecánica para optimizar el diseño de malla de perforación y voladura Unidad Minera Parcoy Consorcio Minero Horizonte S.A C. tesis para optar el título de Ingeniero de Minas*. Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP). Facultad de Ingeniería de Minas La Libertad Perú.
- Dávila, J. 2011. *Diccionario Geológico*. Ingemmet. Lima, Perú. Euroecuatorial Indgrafsa S.A.
- Díaz, A., Manrique, S., y Siancas, L. 2020. *Compendio de rocas ornamentales en el Perú*. INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica.
- Díaz, J. 2022. *Determinación de inestabilidad geotécnica de taludes entre el Km 34+700 y Km 42+200 de la carretera Ciudad de Dios- Cajamarca*. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Cajamarca.

- GRAMAR. 2021. *Producción del marmol: De la cantera a tus proyectos*. Natural Stones SA de CV. Mexico.
- Garnica, R. 2015. *Propuesta para cambiar el sistema de minado de una cantera de marmol en el municipio de Santiago Acatlán, Puebla*. Tesis de Maestria. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gavilanes, J., y Andrade, H. 2004. *Introducción a la Ingeniería de Túneles: Caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizo rocosos*. Quito – Ecuador: Editorial: AIME.
- Gonzales de Vallejo, L. 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España. Prentice Hall. 715 p.
- Hoek, E., Carranza, T. y Corkum, B. 2000. “*Hoek Brown failure criterion*”. 2002 edition: In R. Hammah, W. Bawden, J. Cur ran & M. Telesnicki (Eds). *Procesdings of NARMS TAC 2002; Mining Innovation and technology*. Toronto 10 July 2002 pp 267 273. University of Toronto.
- Lagos, A., y Quispe Z. 2008. *Modelamiento estructural de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Bolívar*. PERUMIN. 29 convención Minera de Arequipa.
- Lozano, A. 2009. *MATEST S. Geoinstruments. El-Martillo-de-Schmidt*
- López, C. 2006. *Manual de rocas ornamentales*. Madrid, España: Arias Montano.
- López, E. 2020. *Estudio Geotécnico y Diseño del Talud final de una mina a Cielo Abierto aplicando Modelos Numéricos*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica E.A.P. de Ingeniería de Minas. Lima Perú.
- Maquera, D. 2018. *Aplicación de la Geomecánica para el control de Dilución en la Implementación de la Explotación por Cámaras y Pilares en la Unidad Minera Cori Puno S.A.C. UNTACA*. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero de Minas. Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional del Altiplano Perú.
- Miller, R. 1966. *Engineering of shear faiture in rock*. Ph. D. thesis Universidad de Illinois. EEUU
- Montalar, E. 2009. *La Aplicación de la clasificación geomecánica de Protodyaconov*
- Lisle. R., y Lesión, P. 2002. *Técnicas de proyección estereográfica para geólogos e ingenieros civiles, 2da. edición*.

- Parra, A. 2015. *Planificación Minera a Cielo Abierto utilizando Fundamentos Geomecánicos*. Para optar el Grado de Magister en Minería. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería de Minas. Santiago de Chile.
- Pastor, V. 2013. *El increíble proceso de extracción del marmol*. En Blog: Todo sobre marmol.
- Santos, A. 2012. *Residuo de Marmol como Insumo en la Construcción Civil - Diagnóstico de la Comarca Lagunera*. Tesis profesional, 15-30. México.
- Qulispealaya, L. 2019. *Estrategias ambientales en la explotación de canteras de marmol y su influencia en el desarrollo sostenible de comunidades de la Región Junín- Perú*. Tesis para optar el grado de Doctor. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Quinto, J. y Huamanyalli, R. 2017. *Análisis Geomecánico para la Selección Óptima del Método de Explotación de la veta Almiranta Zona profundización de la Mina Quiruvilca Sociedad Minera Quiruvilca Inversiones S.A.* La Libertad. Facultad de Ingeniería de Minas Civil y Ambiental. Escuela profesional de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional de Huancavelica. Perú.
- Tumialan, P., Ríos, E., Perez, E, Vélez. 1982. *Mineralización del yacimiento Polimetálico de Algamarca (Cajamarca)*. XVI Convención de Ingeniero de Minas del Perú, p (1 4), 1 10, (Resumen).
- Tobón, J., Aristizábal E., y Arango, I. 2003. *Geología de los mármoles de la concesión minera Rioclaro de Sumucil S.A.* Boletín de ciencias de la tierra – Numero 15, Medellín-España. ISSN 0120 – 3630.
- Reyes, L. 1980. *Geología de los cuadrángulos de Cajamarca (15-f), San Marcos (15-g) y Cajabamba (16-g)*. Boletín N°31 INGEMMET. Perú.
- 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.
- Rimarachin, R. 2017. *Estimación de Reservas de Marmol para su explotación minera en la Concesión Santa Rita en el distrito Jorge Chávez, Provincia Celendín, Región Cajamarca, 2017. Perú*. Universidad Alas Peruanas.
- Rodríguez, A. 2007. *Ingeniería geológica: Caracterización de macizos rocosos. Facultad de geología (Petrología y geoquímica)*, vol. 1, págs. 1-14. Universidad de Oviedo. Recuperado de

[https://www.academia.edu/7560586/CARACTERIZACION_DE_MACIZOS
_ROCOSOS](https://www.academia.edu/7560586/CARACTERIZACION_DE_MACIZOS_ROCOSOS)

Solís, E. 2013. *Plantas de industrialización de marmol y travertino*. Simposio Internacional Rocas y Minerales Industriales. Trujillo.

Trigueros, E. 2013. *Parámetros de viabilidad para la explotación de marmol y calizas marmóreas mediante métodos de explotación subterráneos*. Universidad de Vigo. España.

Valera, J. 1987. *Geología de los depósitos de Minerales metálicos*. Impreso in Perú.

Zegarra, A. 2015. *Estudio de Factibilidad de un Proyecto de Explotación y Transformación de Marmol*. Tesis profesional, 42-55. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.

ANEXOS

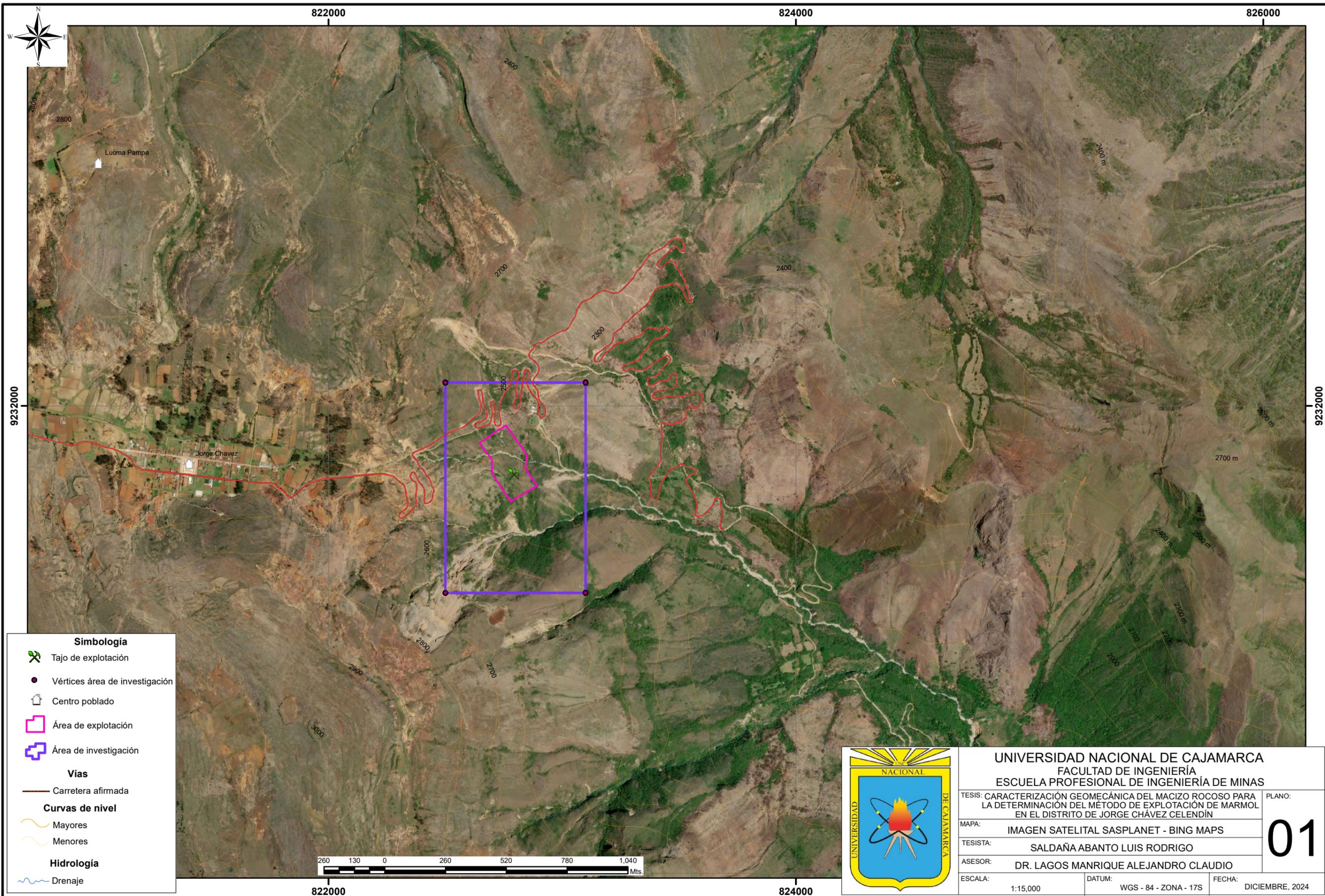
ANEXO A: PLANOS

ANEXO B: PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO C: CÁLCULO DEL PESO ESPECÍFICO EN LABORATORIO

ANEXO D: ANÁLISIS QUÍMICO

ANEXO A
PLANOS



Simbología

- Tajo de explotación
- Vértices área de investigación
- Centro poblado
- Área de explotación
- Área de investigación

Vías

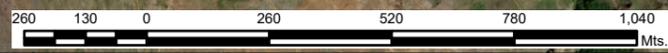
- Carretera afirmada

Curvas de nivel

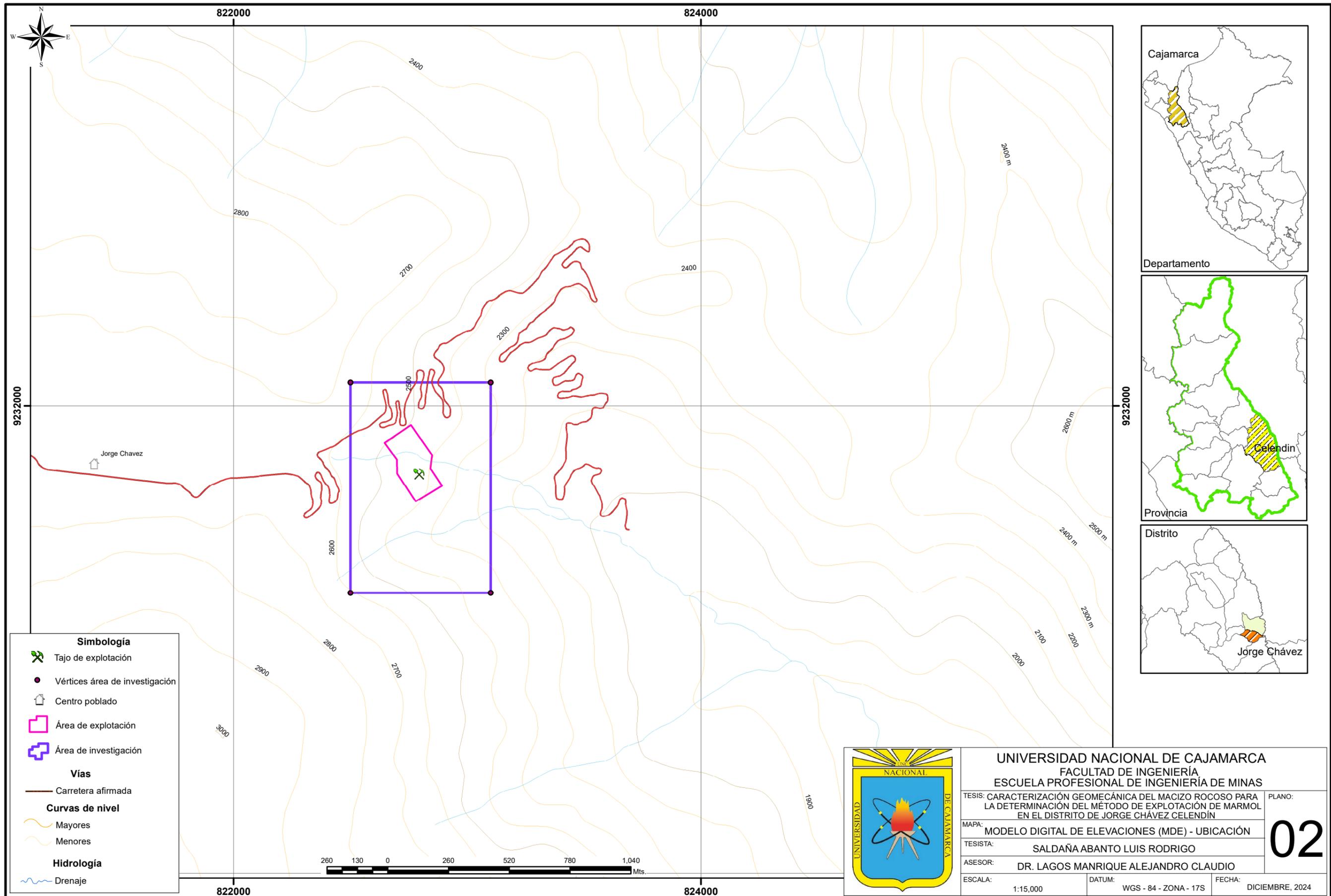
- Mayores
- Menores

Hidrología

- Drenaje



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS: CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN		PLANO:
MAPA: IMAGEN SATELITAL SASPLANET - BING MAPS		01
TESISISTA: SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO		
ASESOR: DR. LAGOS MANRIQUE ALEJANDRO CLAUDIO		
ESCALA: 1:15,000	DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S	FECHA: DICIEMBRE, 2024



Simbología

- Tajo de explotación
- Vértices área de investigación
- Centro poblado
- Área de explotación
- Área de investigación

Vías

- Carretera afirmada

Curvas de nivel

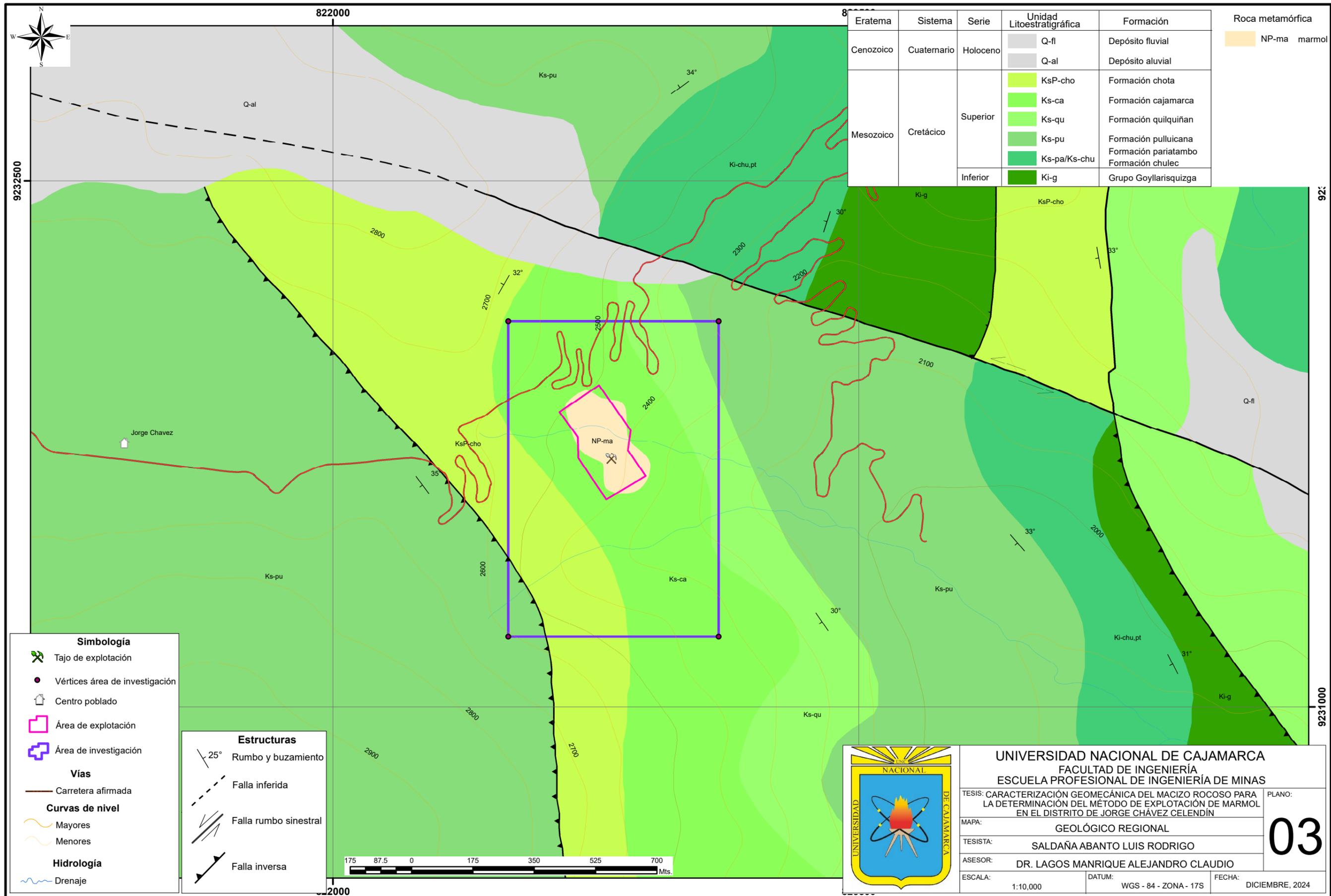
- Mayores
- Menores

Hidrología

- Drenaje



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA		
FACULTAD DE INGENIERÍA		
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS: CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN		PLANO:
MAPA: MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE) - UBICACIÓN		02
TESISTA: SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO		
ASESOR: DR. LAGOS MANRIQUE ALEJANDRO CLAUDIO		
ESCALA: 1:15,000	DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S	FECHA: DICIEMBRE, 2024



Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación	Roca metamórfica
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Q-fl	Depósito fluvial	NP-ma marmol
			Q-al	Depósito aluvial	
Mesozoico	Cretácico	Superior	KsP-cho	Formación chota	
			Ks-ca	Formación cajamarca	
			Ks-qu	Formación quiquiñan	
		Inferior	Ks-pu	Formación pullucana	
			Ks-pa/Ks-chu	Formación pariatambo Formación chulec	
Ki-g	Grupo Goyllarisquizga				

Simbología	
	Tajo de explotación
	Vértices área de investigación
	Centro poblado
	Área de explotación
	Área de investigación
Vías	
	Carretera afirmada
Curvas de nivel	
	Mayores
	Menores
Hidrología	
	Drenaje

Estructuras	
	25° Rumbo y buzamiento
	Falla inferida
	Falla rumbo sinestral
	Falla inversa



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHÁVEZ CELENDÍN

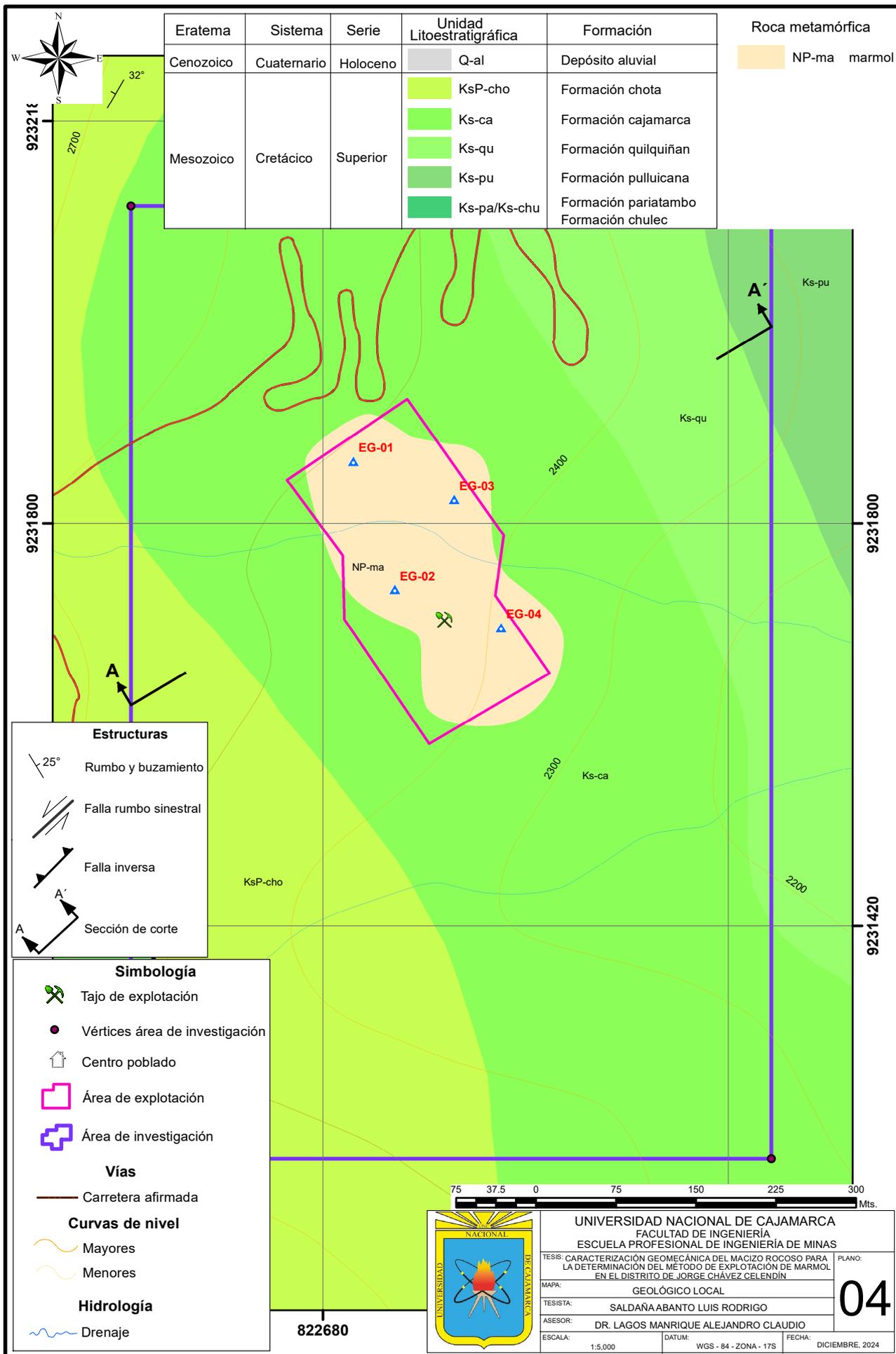
MAPA: **GEOLÓGICO REGIONAL**

TESISTA: **SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO**

ASESOR: **DR. LAGOS MANRIQUE ALEJANDRO CLAUDIO**

ESCALA: 1:10,000 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: DICIEMBRE, 2024

PLANO: **03**



ANEXO B
PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 5.1. Midiendo el espaciamento de las discontinuidades.



Figura 5.2. Midiendo el espaciamento de las discontinuidades.



Figura 5.3. Midiendo la apertura de las discontinuidades.



Figura 5.4. Midiendo la apertura de las discontinuidades.



Figura 5.5. Midiendo el rumbo y buzamiento de las discontinuidades.



Figura 5.6. Utilización del marmol en las escaleras del parque de Jorge Chávez.

ANEXO C
CÁLCULO DE PESO ESPECÍFICO

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LA CALIZA MARMOLIZADA

SOLICITA	:	SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO
TESIS	:	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZOS ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHAVEZ. CELENDIN.
PROCEDENCIA	:	DISTRITO DE JORGE CHAVEZ
UNIDAD	:	FORMACIÓN CAJAMARCA
EDAD	:	CRETÁCICO SUPERIOR
FECHA	:	10/07/2024

I. PROCEDIMIENTOS

A solicitud del Sr. Saldaña Abanto Luis Rodríguez, se realizaron las pruebas de laboratorio de 05 muestras de calizas marmolizadas con la finalidad de conocer su peso específico. La determinación del PE de cada una de las muestras de roca se realizó mediante el siguiente procedimiento:

- 1 Se prepara un trozo de roca caliza con la ayuda del martillo del geólogo, teniendo en cuenta que los fragmentos así obtenidos puedan entrar en el vaso de prueba.
- 2 Se procede a pesar la muestra de caliza en la balanza.
- 3 Se llena el vaso de vidrio con agua hasta la mitad aproximadamente.
- 4 Se mide y se registra el volumen del agua en el vaso.
- 5 Luego se introduce el fragmento de roca dentro del vaso con agua.
- 6 Se mide y se registra el volumen del agua.

Todos estos procedimientos se realizaron para las 05 muestras de calizas.

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. M.º Hugo Mosquera Estraver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

II. DATOS OBTENIDOS

Peso de la masa de roca caliza = 225.02gr

Volumen de H₂O sin muestra de roca= 250.00 cm³

Volumen de H₂O con muestra de roca= 336.04cm³

III. APLICACIÓN DE LAS FÓRMULAS

$$V_{H2O desp} = (Vol_{H2O} + Frag. Roca) - (Vol_{H2O} sin Frag. Roca)$$

VH₂O desp. = Volumen de agua desplazado

Vol H₂O= Volumen de H₂O

Frag. Roca= Fragmento de roca

IV. REEMPLAZANDO DATOS

$$V_f = 336.04\text{cm}^3 - 225.00\text{cm}^3 = 80.04\text{cm}^3 \text{ (diferencia de volúmenes)}$$

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. MSc. Hugo Mosquera Estróver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

V. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LABORATORIO

$$PE = \frac{\text{Peso de la masa de roca (gr)}}{\text{Diferencia de volúmenes (cm3)}}$$

$$PE = \frac{225.02gr}{80.04cm^3}$$

$$PE = 2.62gr/cm^3$$

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. Msc. Hugo Mosquera Estróver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

VI. CALCULO REALIZADOS DE LAS 05 MUESTRAS

Muestra SA- 01	
Peso de la masa de roca arenisca (gr)	225.02
Volumen de H ₂ O sin muestra de roca (cm ³)	250.00
Volumen de H ₂ O con muestra de roca (cm ³)	336.04
Diferencia de volúmenes (cm ³)	86.04
Peso específico (gr/cm³)	2.62

Muestra SA- 02	
Peso de la masa de roca arenisca (gr)	221.33
Volumen de H ₂ O sin muestra de roca (cm ³)	250.00
Volumen de H ₂ O con muestra de roca (cm ³)	335.39
Diferencia de volúmenes (cm ³)	85.39
Peso específico (gr/cm³)	2.59

Muestra SA- 03	
Peso de la masa de roca arenisca (gr)	219.55
Volumen de H ₂ O sin muestra de roca (cm ³)	250.00
Volumen de H ₂ O con muestra de roca (cm ³)	334.49
Diferencia de volúmenes (cm ³)	84.49
Peso específico (gr/cm³)	2.60

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. MSc. Hugo Mosquera Estraver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

Muestra SA- 04	
Peso de la masa de roca arenisca (gr)	211.98
Volumen de H ₂ O sin muestra de roca (cm ³)	250.00
Volumen de H ₂ O con muestra de roca (cm ³)	332.39
Diferencia de volúmenes (cm ³)	82.39
Peso específico (gr/cm³)	2.57

Muestra SA- 05	
Peso de la masa de roca arenisca (gr)	218.12
Volumen de H ₂ O sin muestra de roca (cm ³)	250.00
Volumen de H ₂ O con muestra de roca (cm ³)	334.12
Diferencia de volúmenes (cm ³)	84.12
Peso específico (gr/cm³)	2.59

RESULTADO DEL PESO ESPECÍFICO DE LAS 05 MUESTRAS

MUESTRA	PESO ESPECÍFICO (gr/cm³)
SA- 01	2.62
SA- 02	2.59
SA- 03	2.60
SA-04	2.57
SA- 05	2.59

NOMAS UTILIZADAS:
ASTM C25-96
NTP 334.131- 2008



Ing. Msc. Hugo Mosquera Estraver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

ANEXO D
ANÁLISIS QUÍMICO

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE MARMOL

SOLICITA : SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO
TESIS : CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZOS ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHAVEZ. CELENDIN
PROCEDENCIA : NE DEL DISTRITO JORGE CHAVEZ
COORDENADAS : E822300, N9232000
MUESTRA : SA-02
UNIDAD : FORMACIÓN CAJAMARCA
EDAD : CRETÁCICO SUPERIOR
FECHA : 10/06/2024

III. PORCENTAJE (%) DE CO₂ Ca

MUESTRA	% de CO ₂ Ca
SA-02	94.45

IV. ANÁLISIS QUÍMICO

DETERMINACIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)
%CaO	53.33
%Fe ₂ O ₃	0.046
%MgO	1.29
%SiO ₂	0.70
%Al ₂ O ₃	0.25
%K ₂ O	0.01
Na ₂ O	0.01
%(CO ₂ +H ₂ O) Perdidas	44.34

NOMAS UTILIZADAS:
ASTM C25-96
NTP 334.131-2008

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. MSc. Hugo Alasqueira Estraver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE MARMOL

SOLICITA : SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO
TESIS : CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZOS ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHAVEZ. CELENDÍN
PROCEDENCIA : NE DEL DISTRITO JORGE CHAVEZ
COORDENADAS : E822700, N9231750
MUESTRA : SA-05
UNIDAD : FORMACIÓN CAJAMARCA
EDAD : CRETÁCICO SUPERIOR
FECHA : 10/06/2024

I. PORCENTAJE (%) DE CO₃ Ca

MUESTRA	% de CO ₃ Ca
SA- 05	96.33

II. ANÁLISIS QUÍMICO

DETERMINACIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)
%CaO	53.73
%Fe ₂ O ₃	0.065
%MgO	1.29
%SiO ₂	0.67
%Al ₂ O ₃	0.23
% K ₂ O	0.08
Na ₂ O	0.015
% (CO ₂ +H ₂ O) Perdidas	43.96

NOMAS UTILIZADAS:
ASTM C25-96
NTP 334.131- 2008

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. M.º Hugo Mosquera Estraver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE MARMOL

SOLICITA : SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO
TESIS : CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZOS ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHAVEZ. CELENDIN
PROCEDENCIA : NE DEL DISTRITO JORGE CHAVEZ
COORDENADAS : E822750, N9231900
MUESTRA : SA-03
UNIDAD : FORMACIÓN CAJAMARCA
EDAD : CRETÁCICO SUPERIOR
FECHA : 10/06/2024

V. PORCENTAJE (%) DE CO₂Ca

MUESTRA	% de CO ₂ Ca
SA- 03	94.97

VI. ANÁLISIS QUÍMICO

DETERMINACIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)
%CaO	53.80
%Fe ₂ O ₃	0.050
%MgO	1.33
%SiO ₂	0.68
%Al ₂ O ₃	0.29
% K ₂ O	0.06
Na ₂ O	0.05
%(CO ₂ +H ₂ O)Perdidas	43.79

NOMAS UTILIZADAS:
ASTM C25-96
NTP 334.131- 2008

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. MSc. Hugo Alosqueiro Estrover
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664

Ensayos Físicos, Químicos y de Mecánica de Suelos,
Concreto y Pavimentos, Análisis Químicos de Minerales y Agua.
Estudio de: Mecánica de Suelos y Rocas, Concreto y Pavimentos.
Impacto ambiental, construcción de edificios, obras de Ingeniería Civil.
PROYECTOS- ASESORIA Y CONSULTORIA
RPM: 696826 CELULAR976026950 TELEFONO:354793

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE MARMOL

SOLICITA : SALDAÑA ABANTO LUIS RODRIGO
TESIS : CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZOS ROCOSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL METODO DE EXPLOTACIÓN DE MARMOL EN EL DISTRITO DE JORGE CHAVEZ. CELENDÍN
PROCEDENCIA : NE DEL DISTRITO JORGE CHAVEZ
COORDENADAS : E822450, N9231800
MUESTRA : SA-04
UNIDAD : FORMACIÓN CAJAMARCA
EDAD : CRETÁCICO SUPERIOR
FECHA : 10/06/2024

VII. PORCENTAJE (%) DE CO₂ Ca

MUESTRA	% de CO ₂ Ca
SA- 04	94.88

VIII. ANÁLISIS QUÍMICO

DETERMINACIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)
%CaO	52.99
%Fe ₂ O ₃	0.060
%MgO	1.36
%SiO ₂	0.68
%Al ₂ O ₃	0.26
% K ₂ O	0.07
Na ₂ O	0.03
%(CO ₂ +H ₂ O)Perdidas	44.66

NOMAS UTILIZADAS:
ASTM C25-96
NTP 334.131- 2008

Nota: la muestra fue alcanzada al laboratorio por el interesado para su respectivo análisis.



Ing. Msc. Hugo Mosquera Estróver
JEFE DE LABORATORIO
CIP 27664