

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



TESIS

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL TUNEL DE LA MINA MARÍA ROSA MÍSTICA
SAN JOSÉ - CAJABAMBA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO GEÓLOGO

AUTOR:
Bach. Pizan Rosado Gonzalo

ASESOR:
M.Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** GONZALO PIZAN ROSADO

DNI: 63483925

Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

2. **Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino

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:**

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL TUNEL DE LA MINA MARÍA ROSA MÍSTICA SAN JOSÉ - CAJABAMBA

Fecha de evaluación: 15/09/2025

6. **Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)

7. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 8%

8. **Código Documento:** Oide:3117:499119858

9. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 15/09/2025



FIRMA DEL ASESOR
Roberto Severino Gonzales Yana



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 15/09/2025 20:59:51-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL TUNEL DE LA MINA MARÍA ROSA MÍSTICA SAN JOSÉ - CAJABAMBA.

ASESOR : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0057-2026-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 13 de enero de 2026, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los *dieciséis días del mes de enero de 2026*, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J – 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL TUNEL DE LA MINA MARÍA ROSA MÍSTICA SAN JOSÉ - CAJABAMBA*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica *GONZALO PIZAN ROSADO*, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

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

EVALUACIÓN PRIVADA : 03 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 14 PTS CATORCE (En letras)

En consecuencia, se lo declara 100% con el calificativo de CATORCE acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10:00 hrs 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. Alejandro Claudio Lagos Manrique
Vocal

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

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

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecer a Dios por darme la vida y salud para poder realizar este trabajo de investigación, y brindarme la sabiduría de los conocimientos que adquiere para su posterior aplicación.

Agradezco a mis compañeros Danny Huamán Blanco y Víctor Salazar Julca por el apoyo en la toma de datos, a Maribel Durand Fernández por apoyarme en todo este proceso, a mi alma mater, la UNC y a sus docentes por brindarme sus conocimientos adquiridos durante mucho tiempo en el rubro de la geología.

En especial a mi asesor M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, quien con sus conocimientos ayudó a la realización de este trabajo.

G.P.R

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos por su incondicional apoyo en mi formación académica, y ser la inspiración para seguir esforzándome día tras día.

G.P.R

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO -----	i
DEDICATORIA-----	ii
ÍNDICE DE FIGURAS -----	vii
ÍNDICE DE TABLAS-----	ix
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS -----	xi
LISTA DE ABREVIATURAS -----	xii
RESUMEN -----	xiii
ABSTRACT-----	xiv

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS -----	3
2.1.1. Antecedentes Internacionales -----	3
2.1.2. Antecedentes Nacionales -----	4
2.1.3. Antecedentes Locales -----	5
2.2. BASES TEÓRICAS -----	6
2.2.1. Clasificaciones Geomecánicas -----	6
2.2.1.1. Índice de Calidad de Roca (RQD)-----	6
2.2.1.2. Valoración de la Masa Rocosa (RMR)-----	7
2.2.1.3. Parámetros de clasificación:-----	9
2.2.1.4. Índice RMR-----	12
2.2.1.5. Índice de Resistencia Geológica (GSI) -----	17
2.2.1.6. Índice de Calidad Tunelera (Q De Barton)-----	18
2.2.2. Relación de soporte de excavación (ESR): -----	25

	Pág.
2.2.3. Determinación de Sostenimiento-----	26
2.2.4. Mecanismos de Falla-----	29
2.2.4.1. Mecanismos de Falla controlada por esfuerzos-----	29
2.2.4.2. Mecanismos de Falla por estructuras -----	29
2.2.5. Sostenimiento-----	30
2.2.5.1. Pernos de Roca -----	31
2.2.5.2. Concreto Lanzado (Shotcrete) -----	31
2.2.5.3. Cuadros de madera -----	32
2.2.5.4. Puntales-----	33
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS -----	34

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN-----	35
3.1.1. Ubicación-----	35
3.1.2. Accesibilidad -----	36
3.2. PROCEDIMIENTO-----	37
3.2.1. Primera etapa -----	37
3.2.2. Segunda etapa -----	37
3.2.3. Tercera etapa -----	37
3.2.4. Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación-----	37
3.2.5. Población de Estudio-----	38
3.2.6. Muestra-----	38
3.2.7. Unidad de Análisis-----	38
3.2.8. Identificación de Variables -----	38
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS-----	39
3.3.1. Técnicas de campo: observación -----	39
3.3.2. Técnicas de recopilación de información -----	39
3.3.3. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información -----	39
3.3.4. Equipos y materiales-----	40

3.4. GEOLOGÍA LOCAL-----41

CAPÍTULO IV
ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO -----	42
4.2. ANÁLISIS GEOMECÁNICO – GEOTÉCNICO-----	44
4.2.1. Estación 1 -----	44
4.2.1.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 1 -----	47
4.2.1.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 1 -----	48
4.2.1.3. Análisis mediante el Software Unwedge de la Estación 1 -----	49
4.2.1.4. Análisis mediante el software Phase2 de la Estación 1 -----	50
4.2.1.5. Sostenimiento de la Estación 1 -----	51
4.2.2. Estación 2 -----	53
4.2.2.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 2 -----	56
4.2.2.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 2 -----	57
4.2.2.3. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 2 -----	58
4.2.2.4. Análisis mediante el software Phase2 de la Estación 2 -----	59
4.2.2.5. Sostenimiento de la Estación 2 -----	60
4.2.3. Estación 3 -----	62
4.2.3.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 3 -----	65
4.2.3.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 3 -----	66
4.2.3.3. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 3 -----	67
4.2.3.4. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 3 -----	68
4.2.3.5. Sostenimiento de la Estación 3 -----	69
4.2.4. Estación 4 -----	71
4.2.4.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 4 -----	74
4.2.4.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 4 -----	75
4.2.4.3. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 4 -----	76
4.2.4.4. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 4 -----	77
4.2.4.5. Sostenimiento de la Estación 4 -----	78
4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS -----	80

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES-----81

5.2. RECOMENDACIONES-----81

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----82

ANEXOS 1: PLANOS TEMÁTICOS -----86

Plano N° 01: Ubicación

Plano N° 02: Geotécnico

Plano N°03: Geológico y perfil

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Índice de Resistencia Geológico para macizos rocosos diaclasados	17
Figura 2: Método gráfico de sostenimiento del Sistema Q	27
Figura 3: Método gráfico de sostenimiento del Sistema Q	27
Figura 4: Mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso	30
Figura 5: Sostenimiento con pernos	31
Figura 6: Comportamiento del shotcrete en cuñas o bloques	32
Figura 7: Esquema de un cuadro recto, esquema de un cuadro cónico	32
Figura 8: Puntales de seguridad para falsas cajas	33
Figura 9: Envoltoriente de curva de Hoek y Brown para la Estación 1	47
Figura 10: Proyección estereográfica de la Estación 1	48
Figura 11: Presentación en el software Unwedge para la estación 1	49
Figura 12: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación	50
Figura 13: Gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación 1	51
Figura 14: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 1	52
Figura 15: Envoltoriente de curva de Hoek y Brown para la Estación 2	56
Figura 16: Proyección estereográfica de la Estación 2	57
Figura 17: Presentación en el software Unwedge para la Estación 2	58
Figura 18: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación 2	59
Figura 19: Gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación 2	60
Figura 20: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 2	61
Figura 21: Envoltoriente de curva de Hoek y Brown para la Estación 3	65
Figura 22: Proyección estereográfica de la Estación 3	66
Figura 23: Presentación en el software Unwedge para la Estación 3	67
Figura 24: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación 3	68
Figura 25: Gráfico de Sostenimiento del Sistema Q de Barton de la Estación 3	69
Figura 26: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 3	70
Figura 27: Envoltoriente de curva de Hoek y Brown para la Estación 4	74
Figura 28: Proyección estereográfica de la Estación 4	75
Figura 29: Presentación en el software Unwedge para la Estación 4	76
Figura 30: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación 4	77

Pág.

- Figura 31:** Gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación 4..... 78
Figura 32: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 4..... 79

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Índice de calidad de la roca (RQD)	7
Tabla 2. Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	9
Tabla 3. Parámetro RQD	9
Tabla 4. Separación entre diaclasas.....	9
Tabla 5. Estado de las discontinuidades.....	10
Tabla 6. Agua subterránea o freática	10
Tabla 7. La orientación de las discontinuidades.....	11
Tabla 8. Clasificación geomecánica RMR	12
Tabla 9. Túneles de sección en herradura.	12
Tabla 10. Matriz para Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989)	14
Tabla 11. Tabla de clasificación RMR resumida.....	15
Tabla 12. Corrección por orientación de discontinuidades.	16
Tabla 13. Características geotécnicas del macizo rocoso.....	16
Tabla 14. Orientación de las discontinuidades.....	16
Tabla 15. Índice de Resistencia Geológica (GSI).	18
Tabla 16. Valores de RQD según Barton y Grimstad (1994).	19
Tabla 17. Valores de Índice de Diaclasado.....	19
Tabla 18. Valores de Índice de Rugosidad de las Discontinuidades.	20
Tabla 19. Valores de Índice de Alteración de las Diaclasas.	21
Tabla 20. Valores de Factor de Reducción por agua en las diaclasas.	22
Tabla 21. Valores de factores de reducción de tensiones.	23
Tabla 22. Clasificación Q de Barton, según Barton, Lien y Lunde, (1974).....	25
Tabla 23. Valores ESR.....	25
Tabla 24. Guía para estimar el Factor de Alteración (D)	28
Tabla 25: Delimitación de la investigación.....	35
Tabla 26: Accesibilidad al Área de Investigación.....	36
Tabla 27. Clasificación y los tipos de investigación.	38
Tabla 28. Identificación de Variables	38
Tabla 29: Cartografiado de Geo estructuras.....	43
Tabla 30. Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 1	45

	Pág.
Tabla 31. Resumen de clasificaciones geomecánicas para la estación 1	46
Tabla 32. Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 2	54
Tabla 33. Resumen de clasificaciones geomecánicas para la Estación 2	55
Tabla 34. Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 3	63
Tabla 35. Resumen de clasificaciones geomecánicas para la estación 3	64
Tabla 36. Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 4	72
Tabla 37. Resumen de clasificaciones geomecánicas para la Estación 4	73

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1: Areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio.	41
Fotografía 3: Estación 1	44
Fotografía 4: Estación 2	53
Fotografía 5: Estación 3	62
Fotografía 6: Estación 4	71

LISTA DE ABREVIATURAS

Adm.	: Admisible.
c	: Cohesión.
D	: Factor de disturbancia.
De	: Diámetro equivalente.
Eh	: Módulo de deformación en dirección horizontal.
Ei	: Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
Em	: Módulo de deformación.
ESR	: Relación de soporte de excavación.
GPa	: Gigapascales.
GSI	: Índice de Resistencia Geológica.
Ja	: Número de alteración de las diaclasas.
Jn	: Número de familias de diaclasas
Jr	: Número de rugosidad de las diaclasas.
Jw	: Factor de reducción por agua de las diaclasas
Kh.	: Tensiones horizontales.
Ks.	: Tensiones verticales.
m o k	: Coeficiente de reparto de tensiones.
mb	: Constante para macizo rocoso.
mi	: Constante roca intacta.
Osinergmin	: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
PI.	: Punto inicial de bocamina.
Q o NGI	: Índice de calidad de túneles.
RMR	: Valoración de la masa rocosa.
RQD	: Índice de calidad de roca.
s, a	: Constantes del macizo rocoso.
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
SRF	: Factor de reducción de tensiones.
ϕ	: Ángulo de Fricción.
λ	: Número de discontinuidades

RESUMEN

El túnel de la mina subterránea de María Rosa Mística que a partir de ahora será denominado como Galería de corte, se encuentra ubicado en el distrito de Cachachí, provincia Cajabamba el cual consta de 120 m de excavación, el cual se encuentra expuesto a factores de presión constante el cual genera inestabilidad dentro del túnel por lo que la presente investigación tiene como objetivo general evaluar el comportamiento geotécnico, para ello se tomarán en cuenta variables como la inestabilidad, litología, estructuras y geohidrología, partiendo de esto fue necesario realizar un mapeo subterráneo y la evaluación geomecánica teniendo en cuenta 4 Estaciones las cuales fueron clasificadas tanto por RMR y Q de Barton, llegando a obtener resultados según RMR, roca tipo III calidad media (E-1, E-2, E-3, E-4) y según Q de Barton, Calidad media (E-1, E-3), calidad buena (E-3, E-4) y para determinar el sostenimiento se utilizaron dos análisis el primero fue un análisis grafico por Q de Barton, y el segundo utilizando el software Unwedge el cual sirve para evaluar posibles cuñas y así mismo determinar un tipo de sostenimiento, de las cuatro estaciones; en tres se encontraron cuñas para las cuales se plantea utilizar pernos de anclaje de 2 m de longitud para estabilizar la galería y una estación presentó posible desprendimiento de rocas en el techo para lo cual se recomienda usar malla en la zona puntual en el techo de la galería.

Palabras Claves: Clasificaciones geomecánicas, sostenimiento, inestabilidad, factor de seguridad, excavaciones subterráneas

ABSTRACT

The tunnel of the María Rosa Mística underground mine, which from now on will be called the Cutting Gallery, is located in the district of Cachachí, Cajabamba province, which consists of 120 m of excavation, which is exposed to constant pressure factors which generate instability within the tunnel, so the general objective of this research is to evaluate the geotechnical behavior. for this purpose, variables such as instability, lithology, structures and geohydrology will be taken into account, from this it was necessary to carry out an underground mapping and geomechanical evaluation taking into account 4 Stations which were classified by both RMR and Barton's Q, reaching results according to RMR, type III rock medium quality (E-1, E-2, E-3, E-4) and according to Barton's Q, Medium quality (E-1, E-3), good quality (E-3, E-4) and to determine the support, two analyses were used, the first was a graphical analysis by Barton's Q, and the second using the Unwedge software which serves to evaluate possible wedges and also determine a type of support, of the four seasons; in three wedges were found for which it is proposed to use anchor bolts of 2 m in length to stabilize the gallery and one station presented possible rockfall on the roof for which it is recommended to use mesh in the specific area on the roof of the gallery.

Key words: Geomechanical classifications, support, instability, safety factor, underground excavations

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Cada yacimiento requiere un modelo específico de excavaciones para su extracción minera, el método de explotación es la arquitectura que permite la extracción de las reservas mineras de una manera tecnológicamente eficiente; en general se llama mina de interior o subterránea al conjunto de pozos, galerías, rampas, chimeneas o coladeros, cámaras para alojamiento de servicios e infraestructuras varias, así como labores de explotación propiamente dichas, que han sido destinados a permitir la extracción eficiente de un mineral o conjunto de minerales de un yacimiento situado a una cierta profundidad y que no es accesible, tanto económicamente o ambiental o socialmente, por métodos de explotación a cielo abierto (Herrera, 2019).

Cajamarca se caracteriza por ser una región minera donde encontramos los dos métodos de explotación tanto subterráneo como a tajo abierto, dentro de estas operaciones cada día se busca mejorar la seguridad tanto del personal como la producción, es por eso que se debe realizar un monitoreo continuo de las galerías tal es el caso de la mina María Rosa Mística en el caserío de San José, provincia Cajabamba; donde se evaluará el comportamiento geotécnico tomando datos de manera directa e indirecta con la finalidad de determinar la inestabilidad del túnel y los posibles tipos de sostenimiento, con este trabajo se espera lograr una nueva visión tanto para empresarios o investigadores interesados en la línea de geotecnia.

Es así que se formula la siguiente pregunta ¿Cuál es el comportamiento geotécnico de la mina María Rosa Mística en el caserío de San José, Cajabamba?

Teniendo como hipótesis que el comportamiento geotécnico de la mina María Rosa Mística se encuentra definido por la presencia de discontinuidades y flujos de agua subterránea debido a las infiltraciones, dichas variables al interactuar en conjunto producen inestabilidad en la galería, que también están vinculadas a las condiciones litológicas, estructurales, hidrogeológicas y de tensiones.

Esta investigación se justifica a partir de que las operaciones mineras en Algamarca son en gran parte artesanal por lo que se presenta una carencia de estudios y datos relevantes que pueden ayudar a los pequeños mineros a reforzar sus estructuras, llegando así a tener al sostenimiento por cuadros de madera como uno de los métodos más utilizados en la zona. Esta investigación

servirá para determinar un tipo de sostenimiento apropiado para sus labores y con ello mejorar la seguridad dentro de las actividades mineras artesanales, teniendo en cuenta que buscan reducir costos a lo máximo y sin poner en riesgo su producción, además se espera dejar una base para futuras investigaciones.

Por ello la investigación presenta los siguientes objetivos:

Evaluuar el comportamiento geotécnico de la mina subterránea María Rosa Mística en el caserío de San José, Cajabamba.

Cartografiar las unidades geo estructurales.

Caracterizar el macizo rocoso mediante los métodos RMR y Q de Barton.

Determinar el tipo de sostenimiento más recomendable.

Esta investigación se estructura en cinco capítulos. El Capítulo I introducción de la tesis y su composición. En el Capítulo II pertenece al marco teórico, se citan estudios relacionados locales, nacionales e internacionales. Se establecen bases que fundamentan la investigación y generan la problemática y definición de términos básicos. El Capítulo III detalla los materiales y métodos empleados en la evaluación del comportamiento geotécnico de la mina subterránea María Rosa Mística en el caserío de San José, Cajabamba, Clasificaciones geomecánicas, cartografiado de estructuras las cuales se determinaron con herramientas como wincha, brújula GPS, matrices geomecánicas. Se realizó toma de datos directo en el campo, en varios puntos de control. Procesados luego en gabinete, se representaron variables como litología, geohidrología y estructuras, definiendo la variable dependiente de inestabilidad subterránea y también se presentan datos de ubicación. El Capítulo IV, presenta el análisis y discusión de resultados como factor de seguridad, tipo de roturas, sostenimiento y la contrastación de la hipótesis, el Capítulo V muestra las conclusiones y recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Páez (2016), en el trabajo de grado titulado: “Evaluación de la Condición Geotécnica de los Frentes Activos de la Mina de Hierro El Uvo”, expone una metodología para estimar la condición geotécnica de los frentes de explotación de la mina El Uvo, a través de modelamiento tridimensional en el software Unwedge 3.0 determinando que las cuñas generadas en los pilares de los túneles suelen ser las más estables y por el contrario, las cuñas formadas en el techo son altamente susceptibles a la caída. La primera solución es inducir su caída por gravedad, cuando las condiciones de seguridad son aceptables y las dimensiones de las cuñas lo permiten, o desabombe con equipo mecánico cuando se requiera. Esta actividad es realizada previamente al pernado de los techos de las labores en explotación; trabajo con el cual a través de pernos anclados se estabilizan las cuñas a las que no se puede inducir su caída y que pueden desestabilizarse con el tiempo.

Contreras (2015), en la tesis titulada “Consideraciones geotécnicas en la construcción de 200 metros de túnel de la Mina "Escobal", en el nivel 1265, ubicado en el municipio de San Rafael Las Flores, departamento de Santa Rosa, Guatemala”, tesis de grado, donde compila una serie de estudios geotécnicos, para evaluar un tramo crítico, dentro del túnel de la mina Escobal. Dichos estudios determinaron la calidad del macizo rocoso con tres tipos de rocas, mala calidad, regular calidad y buena calidad para lo cual se recomienda utilizar un tipo de sostenimiento para cada tipo de roca como: Hormigón lanzado con fibras 0.05 -0.09 m y bulonado cada 1.5 m con electro malla, bulonado sistemático cada 2 m con hormigón lanzado 0.04 – 0.10 m y electro malla, bulonado sistemático cada 2.5 m, con electro malla, respectivamente.

Morera (2016), en la tesis: “Instrumentación y Monitorización Geotécnica del Nuevo Túnel El Melón”, centró su investigación en la instrumentación que se necesita para la correcta auscultación y monitorización del Túnel el Melón, estableció las especificaciones técnicas que marcan los requerimientos mínimos que debe cumplir el sistema de monitorización geotécnico

propuesto para las obras de excavación tanto de los portales y los túneles que conforman la modernización del actual túnel El Melón, donde se obtuvo que se debe usar un instrumento específico para medir cada variable como extensómetros para deformaciones, pernos de medición de carga los cuales sirven para monitorizar si los bulones o anclajes puestos para el sostenimiento cumplen sus función.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Castillo (2021), en la tesis titulada: “Estudio geotécnico para el diseño del túnel dos de la Vía Evitamiento – Huánuco”, para optar por el Título Profesional de Ingeniero Geólogo, ejecutó un programa de investigaciones geotécnicas, las mismas que comprenden: el levantamiento geológico a detalle de la zona, estaciones geomecánicas, ensayos geofísicos (sísmicos y geoeléctricos) y perforaciones diamantinas con ensayos permeabilidad, acompañados de ensayos de laboratorio a muestras representativas recolectadas de los trabajos en campo, determinando un modelo Geomecánico con rocas de tipo buena, muy buena y excelente.

Huacac y Urquiza (2019), en la tesis: “Evaluación Geotécnica para la Construcción del Túnel de Trasvase desde la Quebrada Cañipia hasta la Quebrada Tucsamayo en el Distrito de Espinar – Cusco”, para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo, donde se obtuvo cuatro muestras del ensayo de corte directo los cuales arrojaron ángulos de fricción interna de entre 25.4 a 31.3 grados y cohesión de 2.47 Mpa a 2.98 Mpa en las 4 muestras, los cuales indicaron un factor de seguridad promedio de 0.95 que muestran la tendencia de las presiones de forma horizontal.

Rodríguez y Carvajal (2016), en el artículo: “Análisis Geomecánico y Estabilidad del Túnel Chacahuaro – Tramo 2 Iirsa Centro”, buscan describir el comportamiento mecánico del geomaterial (roca blanda, macizo rocoso), que alberga la obra subterránea (túnel Chacahuaro), y establecer las condiciones geológicas y geotécnicas que interactúan durante el proceso de construcción donde se demostró que el túnel Chacahuaro atraviesa geomaterial constituido de roca blanda; en la progresiva 80+192, se tienen macizos de clase III, según el índice RMR, consiguientemente macizos de clase IV y II, según el índice RMR, además se usó el método analítico y el MEF (elementos finitos) para determinar el sostenimiento a utilizar, dando como resultado: Cerchas espaciadas a 0.80 m y concreto lanzado de 0.15 cm con una RCU = 25 MPa

2.1.3. Antecedentes Locales

Montoya (2018), en la tesis titulada: “Relación Geotécnica y Litomorfoestructural del Túnel de la Mina Paredones Nivel 5 San Pablo – Cajamarca”, para optar el grado académico de Maestro en Ciencias. Analiza e interpreta el comportamiento litomorfoestructural del macizo rocoso con las caídas de bloques y las deformaciones, vinculado con las variables litológicas, morfológicas, geoestructurales, hidrológicas, hidrogeológicas y tensionales; se analizaron 5 estaciones las cuales presentaron fracturamiento entre moderado y alto, desplazamientos entre 0.003 y 0.782m; con Phase2 donde resultó que las estaciones E-1 y E-5 son tramos inestables y las E-2 y E-3, E-4 son tramos estables.

Herrera (2021), en la tesis: “Evaluación Geomecánica para el Diseño del Sostenimiento del Túnel de Exploración Chaquecocha Fase II – Minera Yanacocha SRL, 2018”, para optar por el Título Profesional de Ingeniero de Minas, tuvo por objetivo las evaluaciones geomecánicas realizadas a lo largo del túnel, usando las clasificaciones geomecánicas de RMR y GSI adaptadas por MYSRL, además de los análisis realizados mediante software Phase2 v 8.0. donde se obtuvo que el macizo rocoso presente a lo largo del eje del túnel varía, entre calidad Buena Tipo II (RMR = 61 - 80), Regular Tipo III-A (51 – 60) y Regular Tipo III-A (RMR = 41 – 50). Por lo que se sigue un tipo de sostenimiento para cada tipo de roca; Tipo II: Shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado, distribución cuadrada. Tipo III-A: shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado, distribución cuadrada. Tipo III-B: Shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de largo a 1.2m de espaciado, distribución cuadrada.

Cruzado (2017), “Evaluación Geomecánica del Túnel de la Central Hidroeléctrica Potrero – San Marcos – Cajamarca”, tesis para optar por el Título Profesional de Ingeniero Geólogo, tuvo como objetivo determinar la Inestabilidad Geomecánica que presenta el túnel de la Central Hidroeléctrica Potrero, se analizaron familias de diaclasas las cuales generan rotura tipo cuña en el eje para lo cual será necesario su reforzamiento con pernos cementados de 2.10 m. con espaciado a 1.80 m. x 1.80 m. en el caso de roca tipo III y pernos cementados de 2.10 m. colocados de forma puntual para el caso de rocas tipo II.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Clasificaciones Geomecánicas

Tomando en consideración lo expresado por González de Vallejo et al. (2004, pág. 744) la finalidad de las clasificaciones geomecánicas es la obtención de parámetros geomecánicos para su empleo en el diseño y proyecto de obras de ingeniería. Estas clasificaciones aportan mediante la observación directa de las características de los macizos rocosos y la realización de ensayos, índices de calidad relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y sus características frente a los sostenimientos de túneles y taludes. Las características de los macizos rocosos que vamos a considerar en las diferentes clasificaciones geomecánicas que utilizaremos son las siguientes:

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

Las clasificaciones se han desarrollado estableciendo métodos empíricos para determinar el sostenimiento requerido para túneles. Se suele usar, por ejemplo, para analizar la influencia de las discontinuidades estructurales o las tensiones que se originan alrededor de la excavación. Para Considerar el sostenimiento inicial elegido para la excavación se pueden utilizar varias clasificaciones para determinar la relación existente entre las condiciones del macizo y el sostenimiento requerido; estimando la resistencia y deformación del macizo rocoso. (Bieniawski, 1989), recomienda “que las clasificaciones se usen en el contexto global del diseño ingenieril y solo en fases preliminares y/o planeamiento, pero no para definir las medidas finales de diseño”.

2.2.1.1. Índice de Calidad de Roca (RQD)

El Índice de Calidad de la Roca (RQD), fue definido por Deere en 1967 para estimar valores cuantitativos de la calidad de la masa rocosa, a partir de dos metodologías: forma lineal y

volumétrica; este índice relacionaba la calidad de la matriz rocosa y su relación con las discontinuidades; expresando el grado de fracturación, partir de cartografiado geotécnico en función al número de fracturamiento por metro lineal o cúbico, determinadas al realizar el levantamiento litológico – estructural en área o zona determinada. El RQD es un parámetro fundamental tanto en la clasificación de Bieniawski y como en la de Barton (González de Vallejo et al. 2004).

Tabla 1.
Índice de calidad de la roca (RQD)

RQD (%)	Calidad de Roca
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Excelente

Fuente: Deere et al., (1967).

Sin embargo, el RQD se puede estimar a partir del espaciamiento promedio de las discontinuidades basado en la siguiente ecuación de Priest y Hundson (1976):

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

λ = Número de discontinuidades/ Longitud

2.2.1.2. *Valoración de la Masa Rocosa (RMR)*

La aplicación de la clasificación geomecánica definida por el RMR, divide al macizo rocoso en dominios estructurales, es decir, en unidades en las cuales cada tipo de roca es limitada por unidades estructurales (discontinuidades). Bieniawski (1989), divide al macizo rocoso en zonas o tramos que representan características geológicas más o menos uniformes de acuerdo a las observaciones hechas en campo.

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad

con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia unaxial 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.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, *rock mass rating*, que varía de 0 a 100 (González de Vallejo et al. 2004).

La clasificación geomecánica RMR de Bieniawski, (1989), tiene como objetivo definir la calidad de los macizos rocosos en función al índice RMR, este índice se calcula teniendo en cuenta la resistencia de la matriz rocosa, el índice RQD, condición de las discontinuidades y parámetros hidrogeológicos. A continuación, se detalla la ecuación del RMR en función de la suma de los parámetros relevantes según Bieniawski, (1989):

$$\mathbf{RMR = UCS + RQD + S + JC + WC + OJ}$$

Ec. 2

Donde cada puntaje corresponde a los parámetros establecidos:

- UCS : Resistencia de la roca
- RQD : Rock quality designation
- S : Separación de discontinuidades
- JC : Condición de discontinuidades
- WC : Condiciones hidrológicas
- OJ : Ajuste por orientación de las juntas

2.2.1.3. *Parámetros de clasificación:*

- *Resistencia de la matriz rocosa (MPa)*

Tabla 2.

Resistencia de la matriz rocosa (MPa)

Ensayos de carga puntual	>1	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)	Compresión simple (MPa)	Compresión simple (MPa)
Compresión simple	>2 50	250- 100	100- 50	50- 25	25-5	5 - 1	<1
Puntuación	15	12	7	4	2	1	0

Fuente: Bieniawski, (1989).

- *Parámetro RQD*

Tabla 3.

Parámetro RQD

RQD	90%- 100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%
Puntuación	20	17	13	6	3

Fuente: Bieniawski, (1989).

- *Separación entre diaclasas*

Tabla 4.

Separación entre diaclasas

Separación entre diaclasas	>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	< 0,06 m
Puntuación	20	15	10	8	5

Fuente: Bieniawski, (1989).

- *Estado de las discontinuidades*

Tabla 5.

Estado de las discontinuidades

Longitud de la discontinuidad	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Puntuación	6	4	2	1	0
Abertura	Nada		0.1-1mm	1-5mm	>5mm
Puntuación	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
Puntuación	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando	Relleno blando >5mm <5mm
Puntuación	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
Puntuación	6	5	3	1	0

Fuente: Bieniawski, (1989).

- *Agua subterránea o freática*

Tabla 6.

Agua subterránea o freática

Agua	Caudal por	Nulo	10	10-25	25-125	>125
Freática	10m del túnel		litros/minuto	litros/minuto	litros/minuto	litros/minuto
Relación:	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5	
Presión de agua/tensión principal mayor						

Estado general	Seco	Ligeramente seco	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
Puntuación	15	10	7	4	0

Fuente: Bieniawski, (1989).

- *La orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de excavación*

Tabla 7.

La orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del Túnel		Buzamiento
						0°-20°.
Excavación con buzamiento		Excavación contra el buzamiento				Cualquier dirección
Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	
45-90	20-45	45-90	20-45	45-90	20-45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy	Media	Desfavorable
				desfavorable		

Fuente: Bieniawski, (1989).

Procedimiento

Para realizar la clasificación RMR, primeramente, se zonifica al macizo rocoso en tramos que tengan características geológicas similares o uniformes. Se realiza la recolección de los datos y medidas correspondientes a la tabla de clasificación geomecánica referentes a las propiedades y caracterización del macizo rocoso (matriz rocosa y discontinuidades).

A continuación, se obtienen las puntuaciones que resultan de la aplicación de los cinco parámetros de clasificación, se ejecuta la corrección por orientación de discontinuidades y finalmente se obtiene un valor numérico que sirve para clasificar el macizo rocoso.

2.2.1.4. *Índice RMR*

El índice RMR distingue cinco clases que corresponden a la calidad de los macizos rocosos, relacionando características geotécnicas que se toman en cuenta para la aplicación de obras de ingeniería civil y minería, especialmente túneles o taludes.

Tabla 8.
Clasificación Geomecánica RMR

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

Fuente: Bieniawski, (1989).

- Guía de excavación y sostenimiento de túneles en roca en concordancia con el RMR

Tabla 9.
Túneles de sección en herradura.

RMR	Excavación	Bulonado	Gunitado	Cerchas
100 – 81	Sección completa. Avance de 3m	Algún bulonado ocasional	Innecesario	No
80 – 61	Sección completa. Avances de 1 – 1,5m	Bulonado local en clave, con longitudes de 1-3m y separación de 2- 2,5 m, eventualmente con mallazo.	5 cm en clave para impermeabiliz ación	No

60 – 41	Avance y destroza.	Bulonado sistematico de Avances de 1,5 a 3-4m con separaciones 3m. Completar sostenimiento a 20m del frente.	5 a 10 cm en clave y 3 cm en de 1,5 a 2m en clave y hastiales a hastiales. Mallazo en clave.	No
40 – 21	Avance y destroza.	Bulonado sistemático de Avances de 1 a 1,5m. Sostenimiento inmediato del frente.	10 a 15 cm en clave y 10 cm de 1-1,5m en clave y hastiales. Aplicación seg ún avanza la excavación	Cerchas ligeras espaciad as 1,5m cua ndo se requieran
≤ 20	Fases múltiples.	Bulonado sistemático de Avances de 0,5- 1m. Gunitainmediatamente el frente	15-20 cm en clave, 15 cm en de 1-1,5m en clave y hastiales y 5 separada hastiales con cm en el frente.	Cerchas pesadas separada s Aplicación inmediata después de cada avance.

Fuente: Bieniawski, (1989).

Tabla 10.

Matriz para Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989)

REGISTRO GEOLÓGICO-GEOTECNICO Instrumento de Recolección de Datos			PROYECTO:										 BIENIAWS KI RMR (1989) Tunel					
			UBICACIÓN:															
CODIGO	TRAMO :	DE	A			DE			A			DE						
RESPONSABLE	HOJA N°:	DE																
SISTEMA	EJECUTADO POR	FECHA																
ORD.	DATA	MACIZO ROCOSO			PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS													
					TIPOS	RESIST. COMP. UNIAX	RQD Tramo	ORIENTACIÓN		ESPACIADO (m)	PERSIT (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELENDO		ALTERAC - METEOR	AGUA	CALIDAD DE INFORM.
PUNTO	LITOLOG / FORMAC.	METORIZ ACION	GRADO FRACT.	GS1	E=Estratif. D=Diclasa l=Fresco l=Alto l=Bloq-Regul Fn=F. Norm 2=Lev Met 2=Med 2=Bloq-irregul F=F. Inversa 3=Mod 3=Bajo 3=Bloq y Capas 4=Fract-Intenso 5=Compl Aregar MB, B, M.P., MP C=Contacto	E=Est D=Dic σci L: Prom golpes λ= Yp=	ND: DIRECCION.	Z / R DIP DD	TIPO		DUREZA	TIPO	DUREZA	1=L=alterada 2=L=ig. Alt 3=Duro>5mm. 3=Mod. Ak 3=Mojado 3=Lec Proy	1=Seco 2=Humedo 2=Lect Apal 2=Humedo 3=Goteo 3=Fluido	1=Lec. Real 1=Lec. Real		
									1=> 2	1=< 1	1=Muy Rug	1=Ancloso	1=Ninguna	1=Inalterada	1=Seco	1=Lec. Real		
									2=2-0,6	2=1-3	2=Rugosa	2=Qz / Silic	2=Duro<5mm	2=Lig. Alt	2=Humedo	2=Lect Apal		
									3=0,6-0,2	3=3-10	3=0,1-1,0	3=Lig. Rug	3=Caleita	3=Duro>5mm	3=Mod. Ak	3=Mojado	3=Lec Proy	
									4=0,2-0,06	4=10-20	4=1,0-5,0	4=Ondulad-Isa	4=Oxidos	4=Sua ve<5mm	4=Muy Alt	4=Goteo		
									5=< 0,06	5=>20	9=>5	5=Suave	5=Roca Tritur	5=Sua ve>5mm	5=Descomp	5=Fluido		
														6=Bx				
															7=Panizo			
															8=Veta			
									1									
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		

Diseño Original : M.Sc. Victor Tolentino

Diseño Final : Reinaldo Rodriguez - 2020

Fuente: Rodríguez, (2016).

Tabla 11.
Tabla de clasificación RMR resumida

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

Fuente: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 12.

Corrección por orientación de discontinuidades.

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 13.

Características geotécnicas del macizo rocoso.

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m. de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2.5 m de vano	30 minutos Con 1 m de vano
Cohesión	> 4 Kp/cm ²	3 - 4 Kp/cm ² .	2 - 3 Kp/cm ² .	1 - 2 Kp/cm ² .	< 1 Kp/cm ² .
Ángulo de rozamiento	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Fuente: González de Vallejo et al., 2004

Tabla 14.

Orientación de las discontinuidades.

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buz. 0 - 20 Cualquier dirección
Excavación buz.	con	Excavación contra buz.				
Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable.	Muy desfavorable.	Media	Desfavorable.

Fuente: González de Vallejo et al., (2004).

2.2.1.5. Índice de Resistencia Geológica (GSI)

El GSI es un índice de calidad de macizos rocosos que ha sido desarrollado para poder estimar los parámetros m_b y s de la clasificación de Hoek-Brown (1980). Dichos autores pensaron que un criterio de rotura de macizos rocosos no podía considerarse sólido si no se relacionaba con una clasificación geomecánica.

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El GSI combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades (Ramírez y Alejano, 2004).

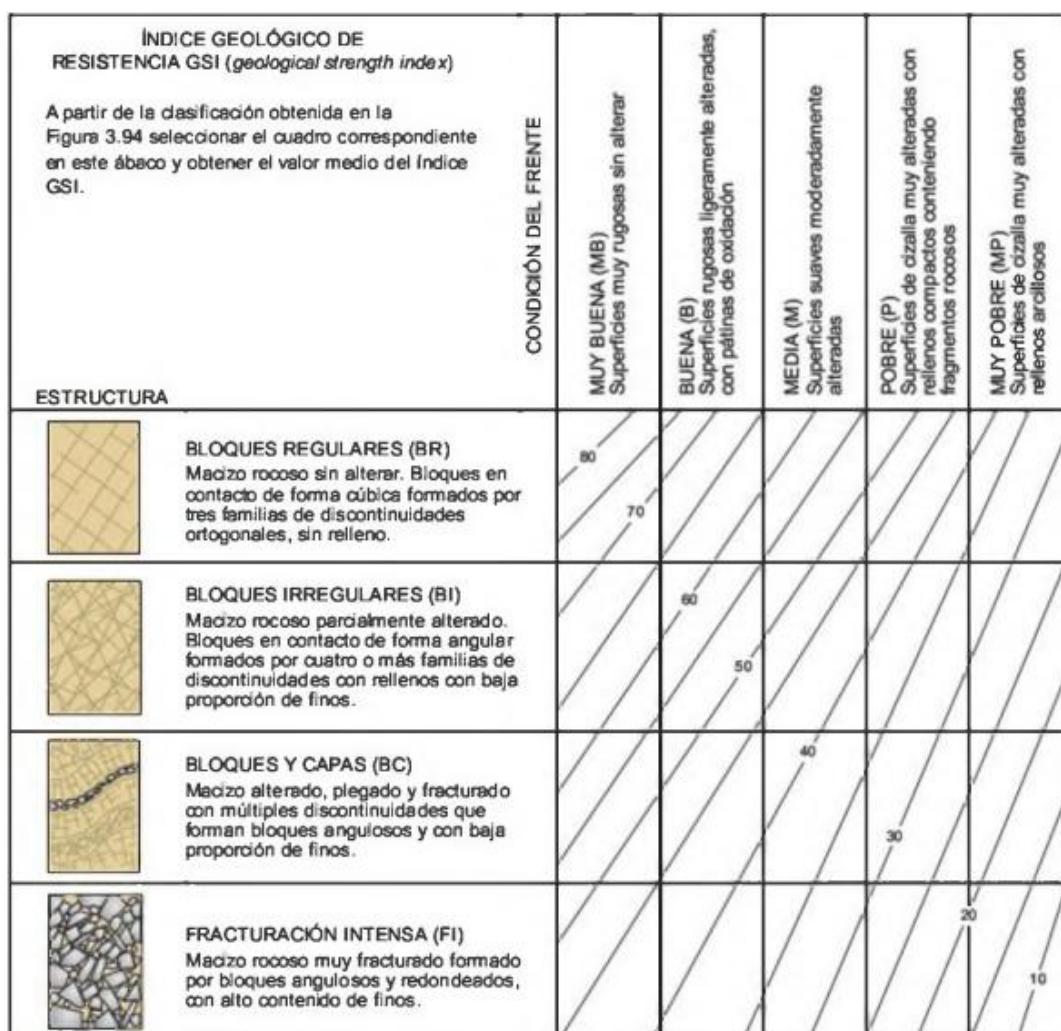


Figura 1: Índice de Resistencia Geológico para macizos rocosos diaclasados.

Fuente: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 15.

Índice de Resistencia Geológica (GSI).

Calidad del Macizo	CLASE	GSI
Muy mala	V	0-20
Mala	IV	21-40
Regular	III	41-60
Buena	II	61-80
Muy buena	I	81-100

Fuente: Marinos y Hoek, (2000).

2.2.1.6. Índice de Calidad Tunelera (Q De Barton)

También denominado como Índice de Calidad de Túneles, (NGI) Barton, Lien y Lunde (1974), desarrollaron el Índice Q , a partir del estudio de un gran número de túneles, constituyen un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos de macizos y diseñar sostenimientos para túneles y cavernas subterráneas.

Barton (2002), hace un estudio de la aplicación del parámetro Q y de sus seis componentes para la predicción, correlación y extrapolación de datos investigados in-situ y para la obtención de una primera estimación de datos de juntas y del macizo continuo. El índice Q tiene un alto grado de fiabilidad ya que está basado en un elevado número de casos que comprenden muy diversos tamaños de excavación, profundidades y calidad de macizos rocosos. Esta clasificación se diferencia de las demás por tener el estado tensional del macizo rocoso como parámetro SRF, pero su evaluación es muy subjetiva y no considera la historia tectónica ni otros factores geomorfológicos.

El sistema Q se basa en la estimación de seis parámetros independientes y expresa la calidad de la roca Q, como función de estos parámetros:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

- RQD : Índice de calidad de roca.
Jn : Número de familias de discontinuidades.
Jr : Rugosidad de las discontinuidades.
Ja : Alteración de las discontinuidades.
Jw : Presencia de agua.
SRF : Factor de reducción de esfuerzos

- **RQD:** *Índice de Calidad de Roca.*

Tabla 16.

Valores de RQD según Barton y Grimstad (1994).

Índice de Calidad de la Roca	RQD (%)
Muy Mala	0 - 25
Mala	25 - 50
Regular	50 - 75
Buena	75 - 90
Excelente	90 - 100

Fuente: Gavilanes y Andrade, (2004).

- **Jn:** *Un coeficiente asociado al número de familias de diaclasas presentes en el macizo rocoso.*

Tabla 17.

Valores de Índice de Diaclasado.

2. Número de familias de diaclasas	Jn
A. Masivo, sin o con pocas diaclasas.	0,5 – 1,0
B. Una familia de diaclasas.	2
C. Una familia de diaclasas + una aislada.	3
D. Dos familias de diaclasas.	4
E. Dos familias de diaclasas + una aislada.	6

F. Tres familias de diaclasas.	9
G. Tres familias de diaclasas + una aislada.	12
H. Cuatro o más familias de diaclasas.	15
I. Roca triturada, terregal.	20

Fuente: Gavilanes y Andrade, (2004).

- **Jr:** Coeficiente asociado a la rugosidad de las diaclasas presentes en el macizo rocoso.

Tabla 18.

Valores de Índice de Rugosidad de las Discontinuidades.

2. Número de rugosidad de las diaclasas	
a) Contacto en las paredes.	Jr
b) Contacto en las paredes antes del cizalleo de 10 cm.	
A. Diaclasas sin continuidad.	4
B. Rugosas o irregulares, onduladas.	3
C. Ondulación suave.	2
D. Reliz de falla o superficie de fricción ondulada.	1,5
E. Rugosas o irregulares pero planas.	1,5
F. Lisas y planas	1,0
G. Reliz de falla o superficie de fricción plana.	0,5
H. Sin contacto de roca después del cizalleo.	
I. Zona que contiene minerales arcillosos de espesor suficiente para impedir el contacto de paredes.	1,0
J. Zona arenosa, de grava o de roca triturada de espesor suficiente para impedir el contacto de paredes.	

Fuente: Gavilanes y Andrade, (2004).

- ***Ja:*** Coeficiente asociado a la condición o grado de alteración de las diaclasas presentes en el macizo rocoso.

Tabla 19.

Valores de Índice de Alteración de las Diaclasas.

		Ángulo	
4. Número de alteración de las diaclasas.		Ja	de
		fricción	
a)	Contacto en las paredes de la roca.		
A.	Relleno soldado, duro, inablandable, relleno	0,75	
B.	Paredes inalteradas, solo con manchas de superficie.	1,0	$25^0 - 35^0$
C.	Paredes ligeramente alteradas, con recubrimiento de minerales inablandables, partículas arenosas, roca triturada sin arcilla.	2,0	$25^0 - 30^0$
D.	Recubrimientos limosos o arenos arcillosos, pequeñas	3,0	$20^0 - 25^0$
E.	Recubrimientos ablandables o con arcilla de baja fricción o sea caolinita o mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	4,0	$8^0 - 16^0$
b)	Contacto en las paredes antes de un cizalleo de 10		
F.	Partículas arenosas, roca desintegrada sin arcilla.	4,0	$25^0 - 30^0$
G.	Rellenos de minerales arcillosos muy consolidados e inablandables (continuos < 5	6,0	$16^0 - 24^0$
H.	Rellenos de minerales arcillosos de consolidación media o baja, ablandables	8,0	$8^0 - 16^0$
I.	Rellenos de arcillas expansivas, montmorillonita (continuos < 5 mm de espesor). El valor Ja depende del porcentaje de partículas expansivas y del acceso	8,0 – 12,0	$6^0 - 12^0$
c)	Sin contacto de las paredes después del cizalleo.		

J.	Zona de capa o arcilla desintegrada o triturada (véase G, H, I para condiciones de arcilla)	6,0
K.	Zona de capa o arcilla desintegrada o triturada para condiciones de arcilla)	8,0
L.	Zona de capa o arcilla desintegrada o triturada	8,0 – 12,0
M.	Zonas de capa o arcilla limosa o arenosa, pequeñas fracciones de arcilla	6 ⁰ – 24 ⁰ 5,0
N.	Zonas o capas gruesas de arcilla (véase G, H, I para condiciones de arcilla). condiciones de arcilla).	6 ⁰ – 24 ⁰
P.	Zonas o capas gruesas de arcilla (véase G, H, I para condiciones de arcilla).	13,0 – 20,0

Fuente: Gavilanes y Andrade, (2004).

- ***Jw:*** *Coeficiente asociado a la condición de aguas en las diaclasas presentes en el macizo rocoso.*

Tabla 20.

Valores de Factor de Reducción por agua en las diaclasas.

5. Factor de reducción por agua en las	Jw	Presión
A. Excavación seca o poca infiltración, o sea < 5	1,	<
B. Infiltración o presión mediana con lavado ocasional de los rellenos.	0,6	1,0 – 2,5
C. Gran infiltración o presión alta en roca competente con diaclasas sin relleno.	0,5	2,5 – 10,0
D. Gran infiltración a presión alta, lavado importante de los rellenos.	0,3	2,5 – 10,0
E. Infiltración o presión excepcionalmente alta con las voladuras, disminuyendo con el	0,2 – 0,1	>
F. Infiltración o presión excepcionalmente alta en	0,1 – 0,05	>

Fuente: Gavilanes y Andrade, (2004).

- **SRF:** Coeficiente asociado al posible efecto de la condición de esfuerzos en el macizo rocoso.

Tabla 21.

Valores de factores de reducción de tensiones.

6. Factor de reducción de tensiones.

a) Zonas de debilidad que interceptan la excavación y que pueden ser la causa de que el macizo se desestabilice cuando se construye el tunel		
A. Múltiples zonas de debilidad que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada, roca circundante muy suelta (cualquier profundidad).		10,0
		5,0
B. Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación < 50 m).		
C. Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación > 50 m).		2,5
D. Múltiples zonas de fracturas en roca competente sin arcilla, roca circundante suelta, cualquier profundidad.		7,5
		5,0
E. Zonas de fractura aisladas en roca competente sin arcilla, profundidad de excavación < 50 m.		
F. Zonas de fractura aisladas en roca competente sin arcilla, profundidad de excavación > 50 m.		2,5
G. Diaclasas abiertas sueltas, diaclasado intenso cualquier profundidad.		5,0

σ_c / σ_1 σ_t / σ_1 SRF

b) Rocas competentes, problemas de tensiones.

H. Tensiones bajas, cerca de la superficie.	> 200	> 13	2,5
J. Tensiones de nivel medio.	200 – 10	13 – 0,66	1,0
K. Elevado nivel de tensiones, estructura muy cerrada generalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de las paredes.	10 – 5	0,66 – 0,33	0,5 - 2
L. Planchoneo moderado después de una hora en roca masiva.	5 – 3	0,5 – 0,65	5 - 50
M. Planchoneo y explosión de roca en pocos minutos en roca masiva.	3 – 2	0,65 - 1	50 - 200
N. Intensa explosión de roca e inmediata deformación dinámica en roca masiva.	< 2	> 1	200 - 400

c) Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente, bajo la influencia de presiones altas de la roca.

O. Presiones compresivas moderadas.	5 - 10
P. Presiones compresivas altas.	10 - 20
d) Roca expansiva, acción química expansiva dependiendo de la presencia de agua.	
Q. Presiones expansivas moderadas.	5 - 10
R. Presiones expansivas altas.	10 - 20

Fuente: Gavilanes y Andrade, (2004).

Los 3 factores de la expresión representan:

- (RQD / Jn) : El tamaño de los bloques.
- (Jr / Ja) : La resistencia al corte entre los bloques.
- (Jw / SRF) : La influencia del estado tensional.

Los valores del Índice Q varían entre 0.001 y 1000, divididos en nueve parámetros de calidad de roca, donde el valor 0.001 corresponde a una roca excepcionalmente mala y el valor 1000 corresponde a una roca excepcionalmente buena.

Tabla 22.

Clasificación Q de Barton, según Barton, Lien y Lunde, (1974).

Valoración Q	Calida
0.001 – 0.01	Roca Excepcionalmente Mala
0.01 – 0.1	Roca Extremadamente Mala
0.1	Roca Muy Mala
1 –	Roca Mala
4 –	Roca Media
10 –	Roca Buena
40 – 100	Roca Muy Buena
100 – 400	Roca Extremadamente Buena
400 – 1000	Roca Excepcionalmente

Fuente: González de Vallejo et al., (2004).

2.2.2. Relación de soporte de excavación (ESR):

Es un factor de seguridad que se utiliza para estimar el sostenimiento o refuerzo requerido en la excavación subterránea. Se asigna puntuación según el uso que tendrá la excavación realizada, considerando aspectos tales como: el tiempo que se empleará la excavación, aspectos de seguridad y uso. Este valor se utiliza en el cálculo del diámetro equivalente y para el caso de excavaciones mineras permanentes toma valor de 1.60.

Tabla 23.

Valores ESR.

Tipo de excavación	ESR
A. Excavaciones mineras temporales.	3.00 – 5.00
B. Piques verticales	
i) sección circular	2.50 - 2.00
ii) sección cuadrada y rectangular	

C. Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con excepción de las cámaras de alta presión para compuertas), túneles piloto (exploración), excavaciones parciales para cámaras	1.60
D. Cámaras de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarriles pequeños, cámaras de alta presión, túneles auxiliares.	1.30
E. Casas de máquina, túneles carreteros y ferrocarrileros mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel.	1.00
F. Estaciones nucleares eléctricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deportes y reuniones, fábricas	0.80
G. Cavernas y túneles muy importantes de una gran vida utilerías de gas.	0.50

Fuente: Barton, (2002).

De (Diámetro equivalente)

Según Gavilanes y Andrade (2004), para poder relacionar el Índice Q para túneles, con el comportamiento de la excavación subterránea y sus necesidades de sostenimiento, Barton, Lien y Lunde introdujeron una magnitud cuantitativa adicional que llamaron “Dimensión Equivalente (De)” de la excavación. Esta dimensión se obtiene de la siguiente relación:

$$De = \frac{\text{Ancho,diámetro o altura (m) de la excavación}}{\text{Relación de sostenimiento de la excavación ESR}} \quad \text{Ec.4}$$

2.2.3. Determinación de Sostenimiento

En el gráfico siguiente (Grimstad y Barton, 1993), muestra de manera gráfica los tipos de sostenimiento basados en la intersección de Q y el De:

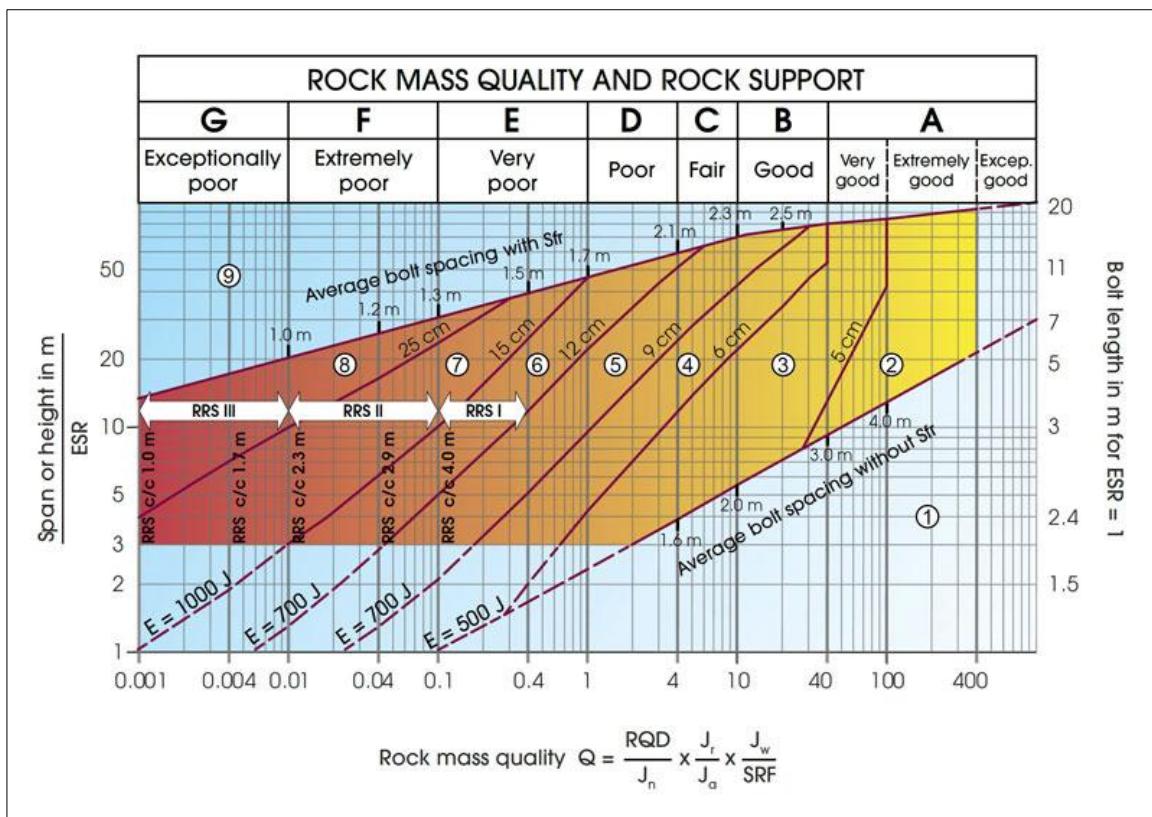


Figura 2: Método gráfico de sostenimiento del Sistema Q
 Fuente: Grimstad y Barton, (1993).

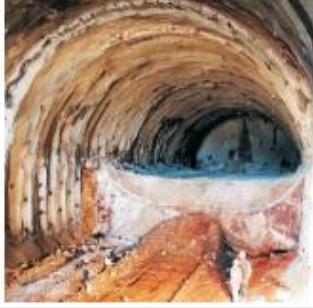
CATEGORÍAS DE REFUERZO	
1	1 Sin soporte o empernado puntual
2	2 Empernado puntual, SB
3	3 Empernado sistemático más shotcrete proyectado con espesor 5-6 cm. con fibras, B + Sfr
4	4 Empernado sistemático más shotcrete proyectado con espesor 6-9 cm. con fibras, Sfr(E500) + B
5	5 Empernado sistemático más shotcrete proyectado con espesor 9-12 cm. con fibras, Sfr(E700) + B
6	6 Cimbras, empernado sistemático y shotcrete proyectado con espesor 10-15 cm. con fibras, Sfr(E700) + RRSI + B
7	7 Cimbras, empernado sistemático y shotcrete proyectado con espesor >1,5 cm. con fibras, Sfr(E1000) + RRSII + B
8	8 Revestimiento de concreto, CCA o Sfr(E1000) + RRSII + B
9	9 Evaluación especial Espaciado de pernos principales basado con $\phi 20$ mm. E = Absorción de energía en fibra reforzada con shotcrete proyectado. ESR = Radio de soporte de excavación. Áreas con líneas de daño que no tiene data empírica.
RRS = Espaciado relacionado con el valor de Q RRS I Si $30/6 \phi 16 - \phi 20$ (abertura de 10 m.). $D40/6 + 2\phi 16 - 20$ (abertura de 20 m.). RRS II Si $35/6 \phi 16 - 20$ (abertura de 5 m.). $D45/6 + 2\phi 16 - 20$ (abertura de 10 m.). $D55/6 + 4\phi 20$ (abertura de 20 m.). RRS III $D40/6 + 4\phi 16 - 20$ (abertura de 5 m.). $D55/6 + 2\phi 20$ (abertura de 10 m.). Evaluación especial (abertura de 20 m.). Simbología: Si $30/6$ = Única capa de concreto proyectado más 6 pernos de anclaje D = Doble capa de refuerzo. $\phi 16$ = Pernos de diámetro de 15 mm. c/c = Espaciado RSS, Centro - Centro	

Figura 3: Método gráfico de sostenimiento del Sistema Q
 Fuente: Grimstad y Barton, (1993).

Guías para estimar el factor de alteración D

Tabla 24.

Guía para estimar el Factor de Alteración (D)

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor <i>D</i> sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.	$D = 0$
	Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Fuente: Hoek et al., (2002).

2.2.4. Mecanismos de Falla

La estabilidad de toda excavación minera subterránea está influenciada principalmente por el macizo rocoso, estructuras y los esfuerzos presentes, así cada uno individualmente o en combinación puede determinar la estabilidad (Osinergmin, 2017).

2.2.4.1. *Mecanismos de Falla controlada por esfuerzos*

La influencia de los esfuerzos en una excavación minera depende generalmente de la magnitud y orientación de los esfuerzos, dimensiones de las excavaciones y tipo y/o calidad del macizo rocoso (Osinergmin, 2017).

2.2.4.2. *Mecanismos de Falla por estructuras*

Una excavación minera a poca profundidad está influenciada principalmente por los sistemas estructurales del macizo rocoso. A medida que el minado se profundiza, los esfuerzos inducidos en las excavaciones aumentan considerablemente llegando a originar zonas de fallamiento por sobre esfuerzos. Como tenemos: Esfuerzos in situ altos ($\sigma_1/\sigma_c > 0,40$), Esfuerzos in situ intermedios ($0,15 > \sigma_1/\sigma_c < 0,40$) y Esfuerzos in situ bajos ($\sigma_1/\sigma_c < 0,15$) (Osinergmin, 2017).

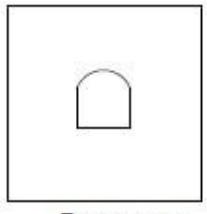
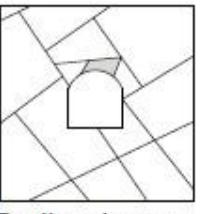
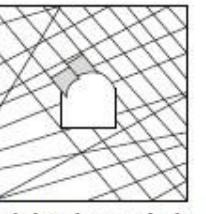
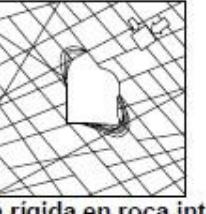
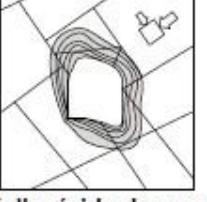
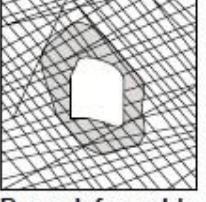
	Masivo (RMR>75)	Moderadamente fracturada (50>RMR<75)	Altamente fracturada (RMR<50)
Esfuerzos in situ bajos	 Respuesta elástica lineal	 Deslizamiento o caídas de bloques y cuñas	 Deslizamiento de la superficie de la excavación
Esfuerzos in situ intermedios	 Falla rígida adyacente al entorno de la excavación	 Falla rígida localizada de roca intacta y movimiento de bloques	 Falla rígida en roca intacta y deslizamiento a lo largo de las discontinuidades
Esfuerzos in situ altos	 Falla rígida alrededor de la excavación	 Falla rígida de roca intacta alrededor de la excavación y movimiento de bloques	 Roca deformable, comportamiento plástico

Figura 4: Mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso
Fuente: Jordá, B., y Fernández, A., (2010)

2.2.5. Sostenimiento

El sostenimiento en excavaciones subterráneas tiene la finalidad de asegurar, controlar y mantener la estabilidad de éstas, a fin de proporcionar condiciones seguras de trabajo y brindar acceso a las labores subterráneas (Osinergmin, 2017).

Los tipos de sostenimiento son: activos donde los elementos de sostenimiento pasan a formar parte integral de la roca y pasivos donde los elementos de sostenimiento son externos a la roca. Los tipos de sostenimiento pueden ser cuadros de madera, cimbras metálicas, puntales, gatas hidráulicas, pernos de anclaje, pernos con resisna, barra helicoidal, swellex, Split set, cables,

malla (electro-soldada y eslabonada) y shotcrete. Para determinar el tipo de sostenimiento a más adecuado se debe tener en cuenta la caracterización geomecánica del macizo rocoso, los requerimientos de servicio de la excavación, el equipo de construcción y los costos de instalación.

2.2.5.1. *Pernos de Roca*

Los sistemas de reforzamiento con pernos de roca minimizan las deformaciones inducidas por el peso muerto de la roca aflojada, así como también aquellas inducidas por la redistribución de los esfuerzos en la roca circundante a la excavación. En general, el principio de su funcionamiento es estabilizar los bloques rocosos y/o las deformaciones de la superficie de la excavación, restringiendo los desplazamientos relativos de los bloques de roca adyacentes (Cruz, 2004).

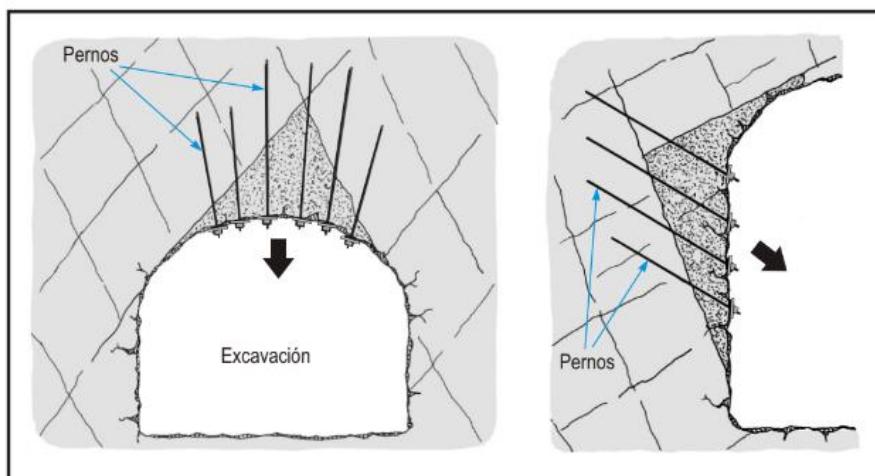


Figura 5: Sostenimiento con pernos
Fuente: Cruz, (2004). (Ver pag.102)

2.2.5.2. *Concreto Lanzado (Shotcrete)*

Concreto lanzado (shotcrete) es el nombre genérico del concreto cuyos materiales componentes son: cemento, agregados, agua, aditivos y elementos de refuerzo, los cuales son aplicados neumáticamente y compactados dinámicamente a alta velocidad sobre una superficie (Cruz, 2004).

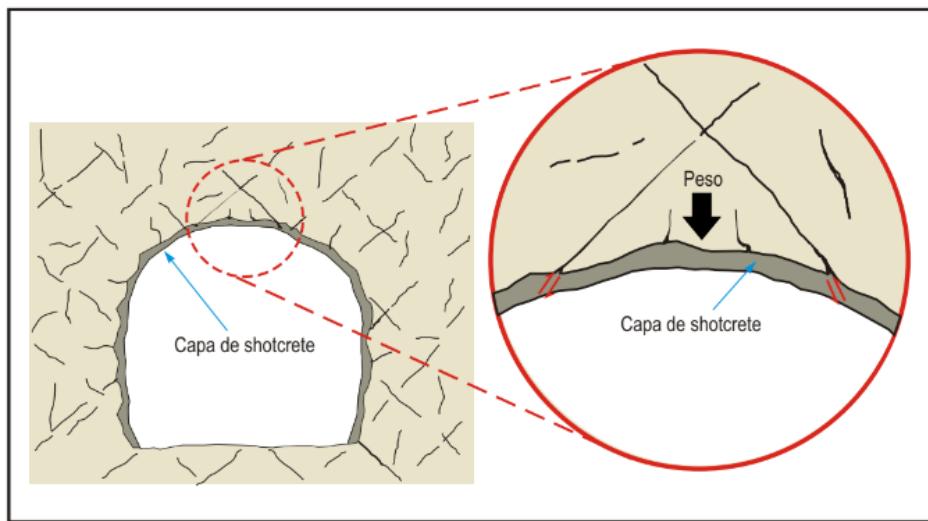


Figura 6: Comportamiento del shotcrete en cuñas o bloques
 Fuente: Cruz, (2004). (Ver pag.132)

2.2.5.3. Cuadros de madera

Éstos son utilizados para sostener galerías, cruceros y otros trabajos de desarrollo, en condiciones de roca fracturada a intensamente fracturada y/o débil, de calidad mala a muy mala y en condiciones de altos esfuerzos. Si las labores son conducidas en mineral, el enmaderado debe ser más sustancial para mantener la presión y el movimiento de roca en los contornos de la excavación (Cruz 2004).

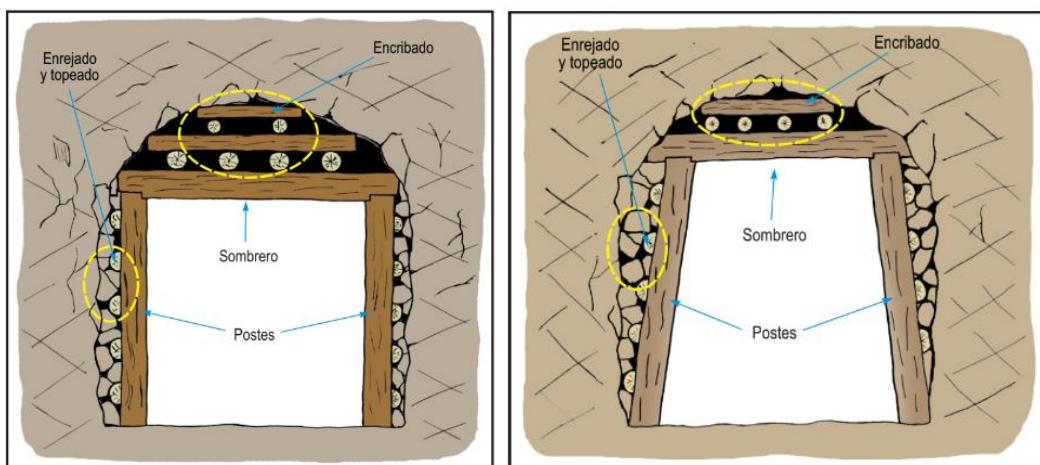


Figura 7: Esquema de un cuadro recto, esquema de un cuadro cónico
 Fuente: Cruz, (2004). (Ver pag.150)

2.2.5.4. Puntales

Es el tipo más común de sostenimiento, donde un simple poste de madera es fijado verticalmente en una abertura para sostener el techo o perpendicularmente al buzamiento de una veta para sostener la caja techo (en buzamientos echados) o ambas, la caja techo y la caja piso (en buzamientos empinados), previniendo así la falla de la roca y el cierre de la excavación. Para el sostenimiento de las falsas cajas en vetas angostas, los puntales son elementos valiosos (Cruz, 2004).

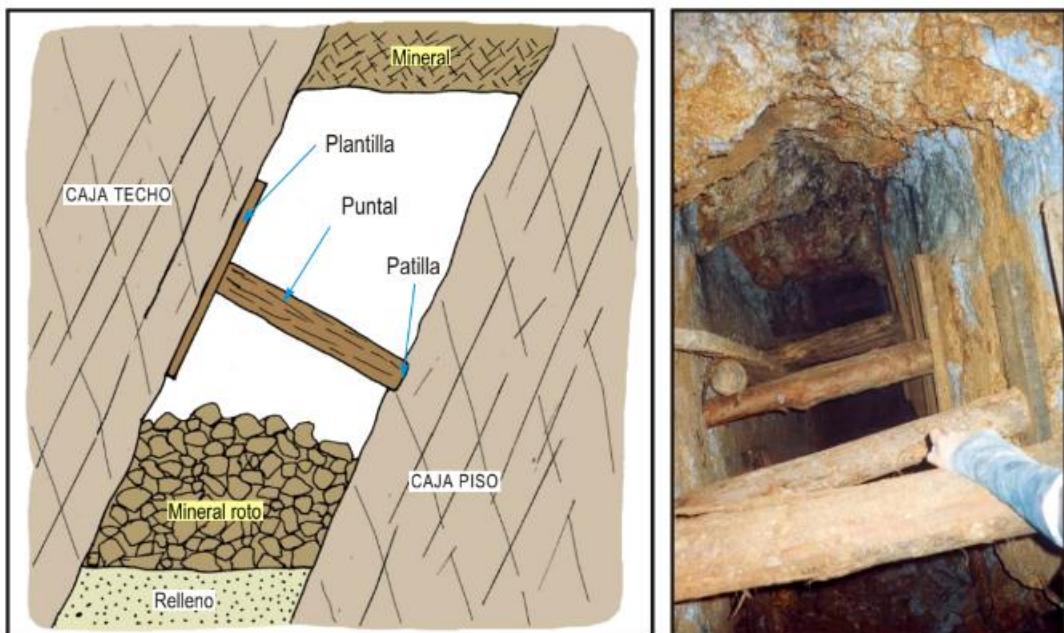


Figura 8: Puntales de seguridad para falsas cajas
Fuente: Cruz, (2004). (Ver pag.142)

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).

Discontinuidad. - Es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tracción de los planos de discontinuidad es muy bajo o nula. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o, en su caso por la del material de relleno (González de Vallejo et al., 2004).

Esfuerzo. - Es la calidad de fuerza, que actúa sobre una unidad de roca en cierta dirección. Si es igual en todas las direcciones se llama isotrópico (Berrocal, 2015).

Factor de Seguridad. - Es un concepto que se origina del método de equilibrio límite en el análisis de estabilidad. Este factor es un índice que expresa la relación entre: la resistencia la corte media del material del macizo a lo largo de una potencial superficie de ruptura vs. la resistencia de corte estrictamente necesaria para mantener el terreno en equilibrio.

Falla. - Están asociadas con los límites entre las placas tectónicas de la Tierra. En una falla activa, las piezas de la corteza de la tierra a lo largo de la falla, se mueven con el transcurrir del tiempo. El movimiento de estas rocas puede causar terremotos. Las fallas inactivas son aquellas que en algún momento tuvieron movimiento a lo largo de ellas pero que ya no se desplazan (González de Vallejo et al., 2004).

Matriz rocosa. - Material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral (González de Vallejo et al., 2004).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Ubicación

La unidad minera María Rosa Mística se encuentra ubicada políticamente en el departamento de Cajamarca, al sureste de la ciudad de Cajamarca, en la provincia de Cajabamba, distrito de Cachachi, Centro Poblado Algamarca, caserío de San José. Correspondiente al cuadrángulo de Cajabamba (16-g), con sistema de coordenadas UTM DATUM WGS-84 ZONA 17S, ver ANEXO 1: plano de ubicación.

Tabla 25:
Delimitación de la investigación

VÉRTICES	Coordenadas UTM - WGS84	
	Latitud	Longitud
1	9157799	805557
2	9157696	805557
3	9157696	804447
4	9157799	804447

3.1.2. Accesibilidad

El acceso a la galería principal de la mina subterránea María Rosa Mística se realiza desde el distrito de Cajamarca hasta la Mina María Rosa Mística, cuenta con una sola vía de acceso la cual se encuentra especificada en la tabla 26.

Tabla 26:
Accesibilidad al Área de Investigación

Tramo	Tipo De Vía	Longitud (Km)	Tiempo (Min)	Total (Min)
Cajamarca – Namora	Asfaltada	27 km	40 min	
Namora – San Marcos	Asfaltada	34 km	45 min	
San Marcos – Aguas Calientes	Asfaltada	26 km	38 min	
Aguas Calientes – Cruce de Pomabamba	Asfaltada	18 km	23 min	3 horas y 16 minutos aprox
Cruce de Pomabamba – Campamento Shauindo	Afirmada	12 km	25 min	
Campamento Shauindo – Mina María Rosa Mística	Trocha carrozable	7 km	20 min	

3.2. PROCEDIMIENTO

3.2.1. Primera etapa

Consiste en la recopilación de información como: revisión de artículos científicos, delimitación del objeto de estudio, publicaciones, planos geológicos, topográficos y datos que tengan relación directa con el área de investigación. Que nos sirve para entender el comportamiento del macizo rocosos, sus discontinuidades, sus estructuras y su RMR, lo que permite a los investigadores ser más objetivos.

3.2.2. Segunda etapa

Etapa de campo, basada en la calidad de información como el reconocimiento de la zona de estudio, cartografiados progresivos como: geológicos, estructurales, geomecánicos, mineralógicos, inestabilidad y tipo de sostenimiento; dividido en 3 visitas a campo hasta obtener información consistente que muestre el estado real del área de investigación. Por consiguiente, también se basó en la utilización de equipos geológicos como planos, fichas y matrices geomecánicas para obtener toda la información que nos servirá para analizar el comportamiento geomecánico y geotécnico del macizo rocoso del túnel María Rosa Mística.

3.2.3. Tercera etapa

Procesamiento de información de campo en gabinete manifestado en: fichas y planos temáticos; acompañados de programas computacionales o softwares; Dips para análisis estructural, RocData para análisis de macizos rocosos, Unwedge para analizar los tipos de rotura, ArcGis y Autocad para realizar la representación de la zona de estudio en planos. Con los tres primeros softwares conocemos el comportamiento geomecánico en la interacción roca –sostenimiento y las condiciones. De esta manera obtener nuestros resultados que serán plasmados con la elaboración del informe final.

3.2.4. Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación

La metodología de investigación es descriptivo y explicativo ya que llegará hasta la explicación de factores que causan la inestabilidad geotécnica, según diseño será no experimental ya que no se modificará ninguna variable y transversal en el tiempo porque se desarrollará entre los meses enero y marzo del presente año, para su mayor entendimiento de la metodología se adjunta la tabla 25.

Tabla 27.

Clasificación y los tipos de investigación.

CLASIFICACIÓN	TIPOS DE INVESTIGACIÓN
Según el nivel	Descriptivo/ Explicativo
Según el diseño	No experimental/ de campo
Según su naturaleza o modo	Cuantitativo
Según la finalidad	Aplicada
Según el período	Transversal en el tiempo

Fuente: Supo, (2016).

3.2.5. Población de Estudio

Unidad Minera Subterránea María Rosa Mística San José – Cajabamba, de una longitud de 120 metros.

3.2.6. Muestra

Litología, geo estructuras

3.2.7. Unidad de Análisis

Puntos de control evaluados mediante RMR, Q de Barton

3.2.8. Identificación de Variables**Tabla 28.**

Identificación de Variables

Variable Dependiente	
Inestabilidad Subterránea	Excavación subterránea.
	Desprendimientos de bloques de roca.
Variables Independientes	
Litología	Formaciones litológicas y alteraciones de roca.
Estructuras	Discontinuidades asociadas al macizo rocoso.
Geohidrología	Líneas de flujo subterráneo

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnicas de campo: observación

En el mes de enero del 2024 se realizó un primer reconocimiento general del área de estudio, para determinar si es viable el proyecto de investigación enmarcándose sobre el túnel María Rosa Mística. Este método observacional y toma de fotografías fue lo más resaltante de la primera etapa llamando la atención las condiciones geo estructurales y tensionales en excavaciones subterráneas.

3.3.2. Técnicas de recopilación de información

Para la recolección de datos se realizaron dos salidas a campo una en el mes de agosto del 2024 y la segunda en septiembre del mismo año; se utilizó, registro geológico estructural, registro geológico geotécnico y libreta de campo, GPS, Brújula. Delimitando las unidades litológicas, geoestructurales (diacasas, fallas, diques, lineaciones de planos falla), hidrogeológicas, al mismo tiempo la ubicación de puntos de control, dimensionamiento de la sección del túnel, orientación del túnel y condiciones del macizo rocoso, teniendo como base el sistema de coordenadas: UTM –DATUM – WGS-84, ZONA - 17S.

3.3.3. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

Esta etapa se realizó en los meses de octubre, noviembre y diciembre; donde se analizaron los datos obtenidos en campo, análisis de tablas, procesamiento de datos en softwares como el ArcGis 10.8 y AutoCad 2021 para la elaboración de planos y Dips, RocData, Phase2 y Unwedge para el tratamiento de la información geomecánica.

3.3.4. Equipos y materiales

Las salidas a campo siempre estuvieron constituidas por los siguientes equipos y materiales:

GPS Garmin (Navegatorio), para ubicar la bocamina en el área de investigación, teniendo como referencia el sistema de coordenadas UTM, según el elipsoide WGS-84.

Brújula Geotécnica Brunton, para medir orientación e inclinación de discontinuidades, estructuras y fallas.

Picota, utilizado para fracturas la roca y obtener muestras de mano.

Lupa, para visualizar de manera más detallada la composición mineralógica de la roca y minerales emplazado en la matriz.

Rayador, utilizado para rayar la superficie de roca o minerales.

Cámara fotográfica, sirvió para tener evidencia del trabajo de campo representando las mejores fotografías de geoestructuras y sostenimiento.

Flexómetro, para obtener mediciones de la sección de túnel, discontinuidades, estructuras, etc.

EPP, Casco, botas de seguridad, linterna, guantes, para ingresar a la excavación y trabajar con seguridad.

Libreta de campo, usado para apuntar información de cartografiado, de manera ordenadas, secuencial según sea el enfoque de información de campo.

Colores, plumones, lápices, para detallar de manera descriptiva mediante diferencias que se plasmas en los planos y libretas.

Mapas geológicos e imágenes satelitales.

En etapa de gabinete los programas computacionales son primordiales para el contexto informacional, procesamiento y obtención de información, se utilizaron los siguientes softwares de procesamiento: SASPlanet, AutoCad 2021, ArcGis 10.8.

3.4. GEOLOGÍA LOCAL

La Galería de corte María Rosa Mística se encuentra emplazada sobre roca sedimentaria perteneciente al Cretácico Inferior – Formación Chimú perteneciente al Grupo Goyllarisquizga.

Al realizar la cartografía de 120 m de galería encontramos rocas areniscas cuarzosas las cuales se presentan pequeñas alteraciones de óxido, la granulometría encontrada vería entre grano medio a grueso, la disposición de estratos varía entre bloques con grosor de 1 m a bloques de 10 cm, además de la presencia de brechas de falla, pero no es encontrado contactos con otro tipo de roca.



Fotografía 1: Areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio.

Nota: la fotografía 1 muestra el macizo rocoso del túnel maría rosa mística conformado por rocas areniscas.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO

Para realizar el cartografiado de las geo estructuras de la galería de corte de la mina María Rosa Mística, se realizó revisión de información como mapas geológicos de la zona y después de haber obtenido una referencia se procede a realizar el cartografiado, empezando en la bocamina (805538 E – 9157794 N), donde se determina el tipo de roca el cual fue roca arenisca cuarzosa de grano medio, siguiendo a la primera estación geotécnica (805528 E – 9157776 N) donde se identificó roca arenisca de grano medio, y tres familias de diaclasas, en el tercer punto (805524 E – 9157769 N) se identificó una falla normal con rumbo NE-SW con buzamiento de 53° NE en este punto la roca continua siendo arenisca cuarzosa de grano medio, en el cuarto punto de control (805517 E -9157757 N) se determinó una falla normal con rumbo NE-SW con un buzamiento de 60° NE, la roca es arenisca de grano grueso, en el quinto punto de control se tiene la segunda estación geotécnica (8055113 E – 9157750 N) en este punto se tomaron datos de 3 familias de diaclasas y la roca es arenisca cuarzosa de grano grueso, en el sexto punto de control (805509 E – 9157743 N) se encontró una falla vertical con rumbo NW-SE ésta geo estructura presenta brecha de falla con un grosor de 10 cm, roca arenisca cuarzosa de grano grueso, en el séptimo punto de control se encuentra la Estación geotécnica 3 (805499 E - 9157735 N) , en este punto se identificaron 4 familias de diaclasas, roca arenisca cuarzosa de grano grueso, en el octavo punto de control (805489 E – 9157727 N) se halla una falla inversa con rumbo NE-SW, y un buzamiento de 50° SW. Roca arenisca cuarzosa de grano medio, en el noveno punto de control se ubica la Estación geotécnica 4 (805476 E – 9157712 N) donde se identificaron 3 familias de diaclasas y roca arenisca de grano medio, y como décimo punto de control (805475 E – 9157708 N) se halla una falla normal con rumbo NE-SW, buzamiento de 60° SW y roca arenisca cuarzosa de grano medio, en la tabla 29 se muestra datos de las geo estructuras cartografiadas y para ver la representación gráfica de este proceso, revisar el ANEXO 2.

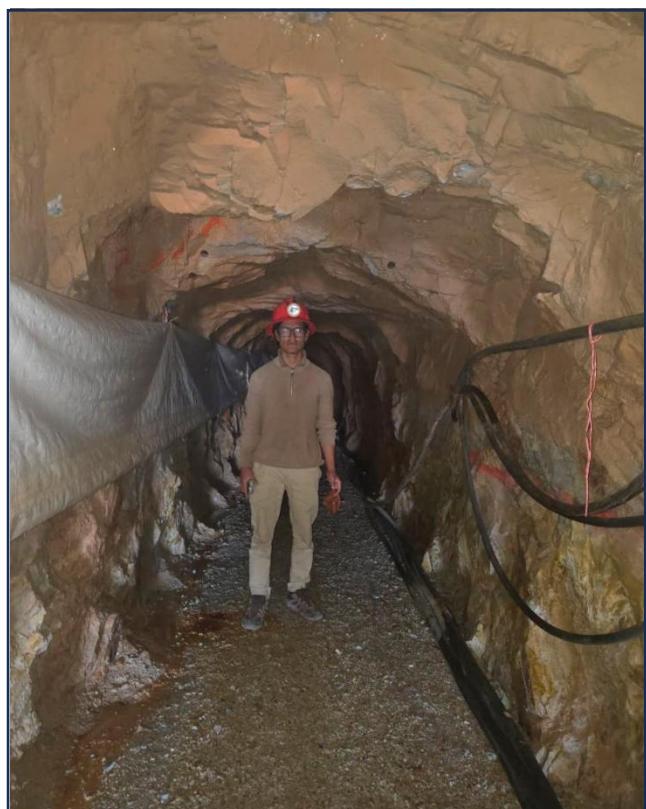
Tabla 29:
Cartografiado de Geo estructuras

ID	GEO ESTRUCTURA	COORDENADAS UTM		OBSERVACIONES
1	Falla Normal	805524 E	9157769 N	Falla normal con rumbo NE-SW y 53° NE de buzamiento. 
2	Falla Normal	805517 E	9157757 N	Falla normal con rumbo NE-SW y 50° NE de buzamiento. 
3	Falla de Rumbo	805509 E	9157743 N	Falla con rumbo NW-SE, y 90° (vertical) de con buzamiento. 
4	Falla Inversa	805489 E	9157727 N	Falla inversa con rumbo NE-SW, y buzamiento de 50° SW. 
5	Falla Normal	805475 E	9157708 N	Falla normal con rumbo NE-SW, buzamiento de 60° SW. 

4.2. ANÁLISIS GEOMECÁNICO – GEOTÉCNICO

4.2.1. Estación 1

La estación 1 se encuentra localizada a los 25 metros de galería de la mina María Rosa Mística, con orientación del túnel: N 210°, entre sus características principales presenta alteración en forma de patinas de óxidos en diaclasas, la roca es arenisca de gano medio pertenecientes a la Formación Chimú, ésta estación presenta un RMR corregido por orientación de discontinuidades de 60, roca tipo III, calidad media, la cual será sostenida puntuamente con pernos de 2 metros.



Fotografía 2: Estación 1

Tabla 30.

Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 1

TABLA 4.- SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR		
A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN Y SUS VALORES			Rango de Valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial			
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa	1- Mpa	< 1 Mpa	7
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0		
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%			17	
	Valoración	20	17	13	8	3				
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm			10	
	Valoración	20	15	10	8	5				
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas				
	Valoración	30	25	20	10	0				
5	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125		7	
		Presión de agua/o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5			
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
	Valoración	15	10	7	4	0				
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES									19	
Longitud de las discontinuidades-persistencia		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Valoración		6	4	2	1	0				
Separación (apertura)		Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm				
Valoración		6	5	3	1	0				
Rugosidad		Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla				
Valoración		6	5	3	1	0				
Relleno (panizo)		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm				
Valoración		6	4	2	1	0				
Intemperización		Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta				
Valoración		6	5	3	1	0				
VALOR TOTAL RMR		60	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				
VALOR TOTAL RMR Corregido		60	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				

Modificado de: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 31.

Resumen de clasificaciones geomecánicas para la estación 1

Resistencia de roca (Mpa)				80 - 100		
Criterios		RQD (%)	RMR	GSI	Q	
Puntaje	Cuantitativo	88	60	55	RQD(%)	88
	Cualitativo	Buena	Regular	Regular	Jn	4
					Jr	3
					Ja	2
					Jw	0.66
					SRF	2.5
					Q	8.712
						Media

En la tabla 32 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica de la estación 1 donde se puede observar que según el RQD la roca se encuentra en una clasificación buena con un valor de 88%, un RMR de 60 siendo una roca regular y un GSI de 55 estando también en una clasificación regular y un Q de Barton con valor 8.712 lo que vendría a ser una roca media.

4.2.1.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 1

El análisis de RocData arroja las Propiedades geomecánicas de dicha estación que se muestra según Hoek-Brown ($mb = 0.647$ $s = 0.0009$) y Morh Coulomb (Angulo de fricción = 59.30° , cohesión = 0.234 MPa). Donde la línea Mogi de color verde se encuentra por debajo de la envolvente de las tensiones principales en una parte que nos indica un modo de rotura frágil.

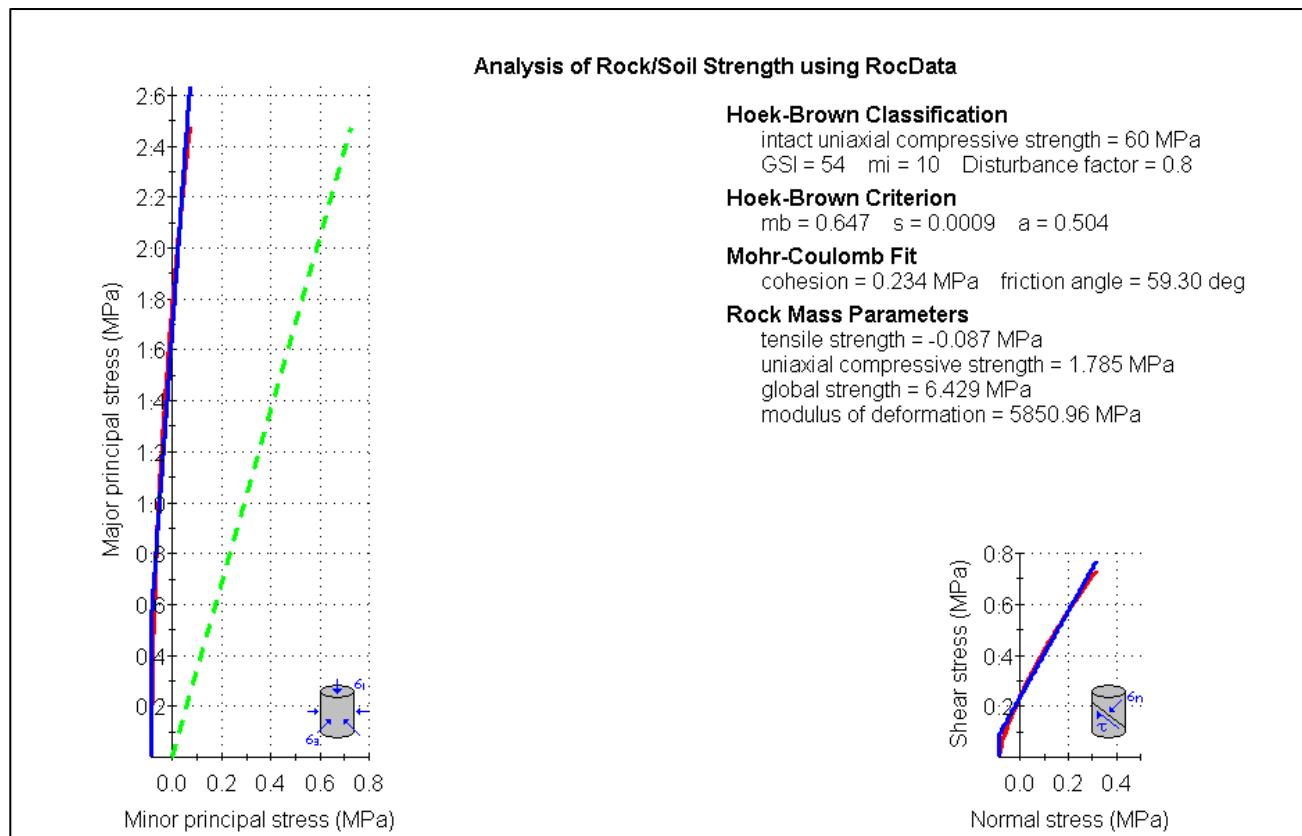


Figura 9: Envoltorio de curva de Hoek y Brown para la Estación 1

4.2.1.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 1

La proyección estereográfica del movimiento cinemático, muestra que la intersección de las tres familias de discontinuidades está formando cuñas donde Los planos de intersección de diaclasas (D/DD): D-2 y E: $47^{\circ}/12^{\circ}$, E y D-1: $14^{\circ}/118^{\circ}$, y D-1 y D-2: $80^{\circ}/210^{\circ}$ las cuales están definidas por el ángulo de fricción con valor de 59.30° .

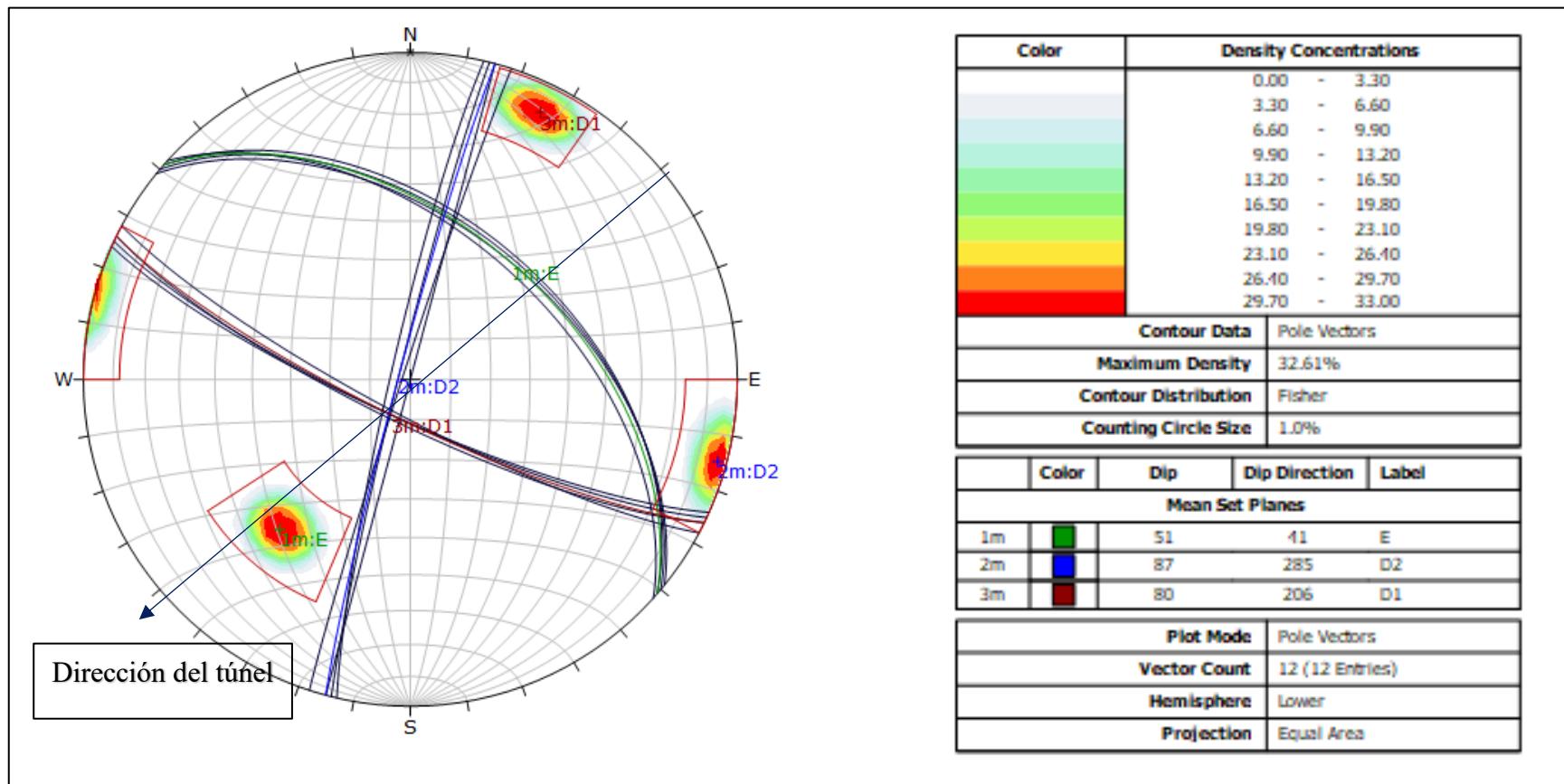


Figura 10: Proyección estereográfica de la Estación 1

4.2.1.3. Análisis mediante el Software Unwedge de la Estación 1

El análisis del software Unwedge muestra cómo se encuentran dispuestas las cuñas en la galería María Rosa Mística para la estación 1 y con sus respectivos factores de seguridad los cuales se analizarán en el apartado de sostenimiento.

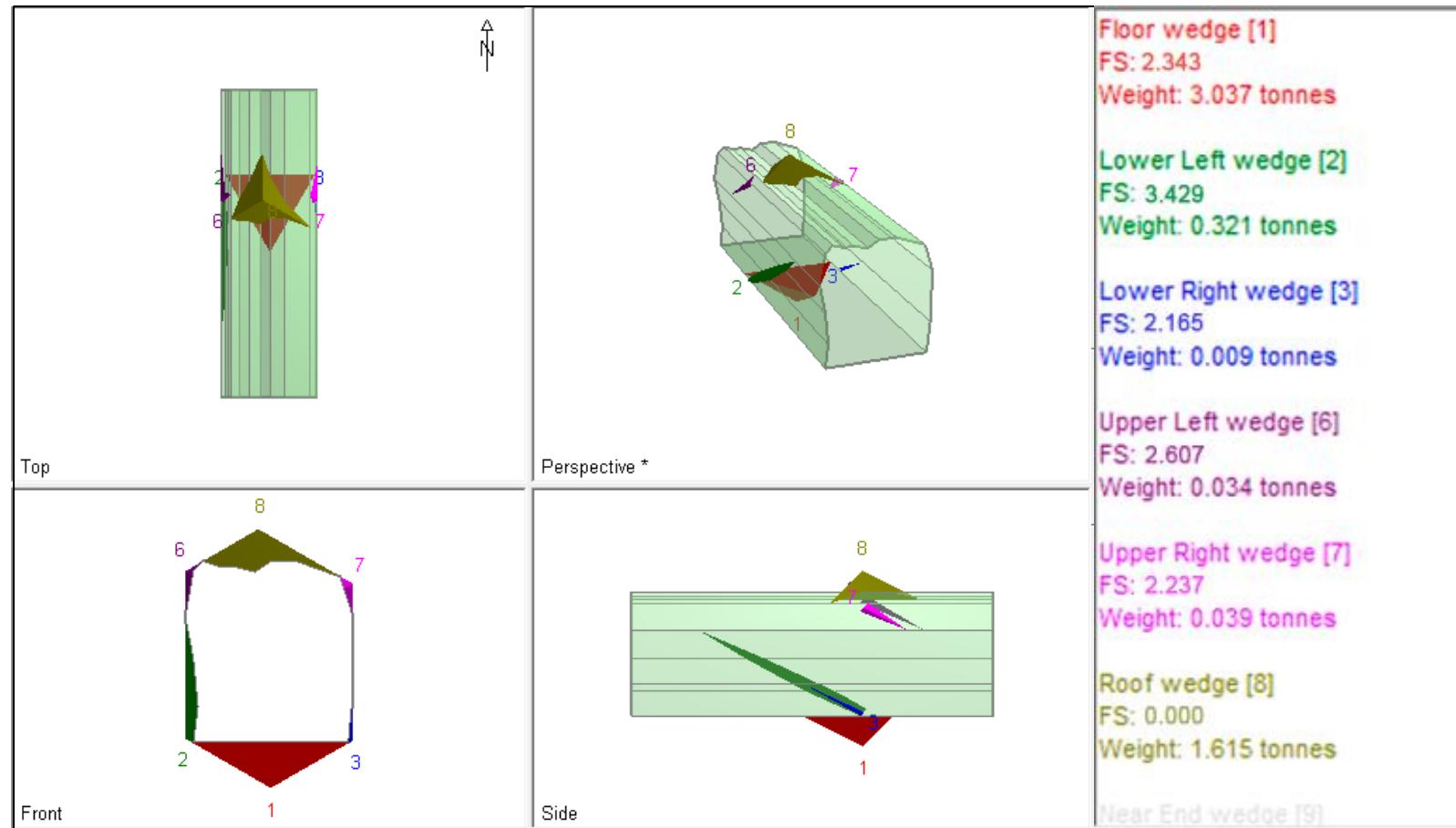


Figura 11: Presentación en el software Unwedge para la estación 1

4.2.1.4. Análisis mediante el software Phase2 de la Estación 1

Finalmente se muestra el análisis del factor de seguridad para la estación 1, se realizó mediante gravedad la cual está sometida a la carga que ejercen los 500m de roca que constituyen al anticlinal de Algamarca, a partir de esto obtenemos un factor de seguridad bajo en la parte superior y al lado izquierdo de la galería.

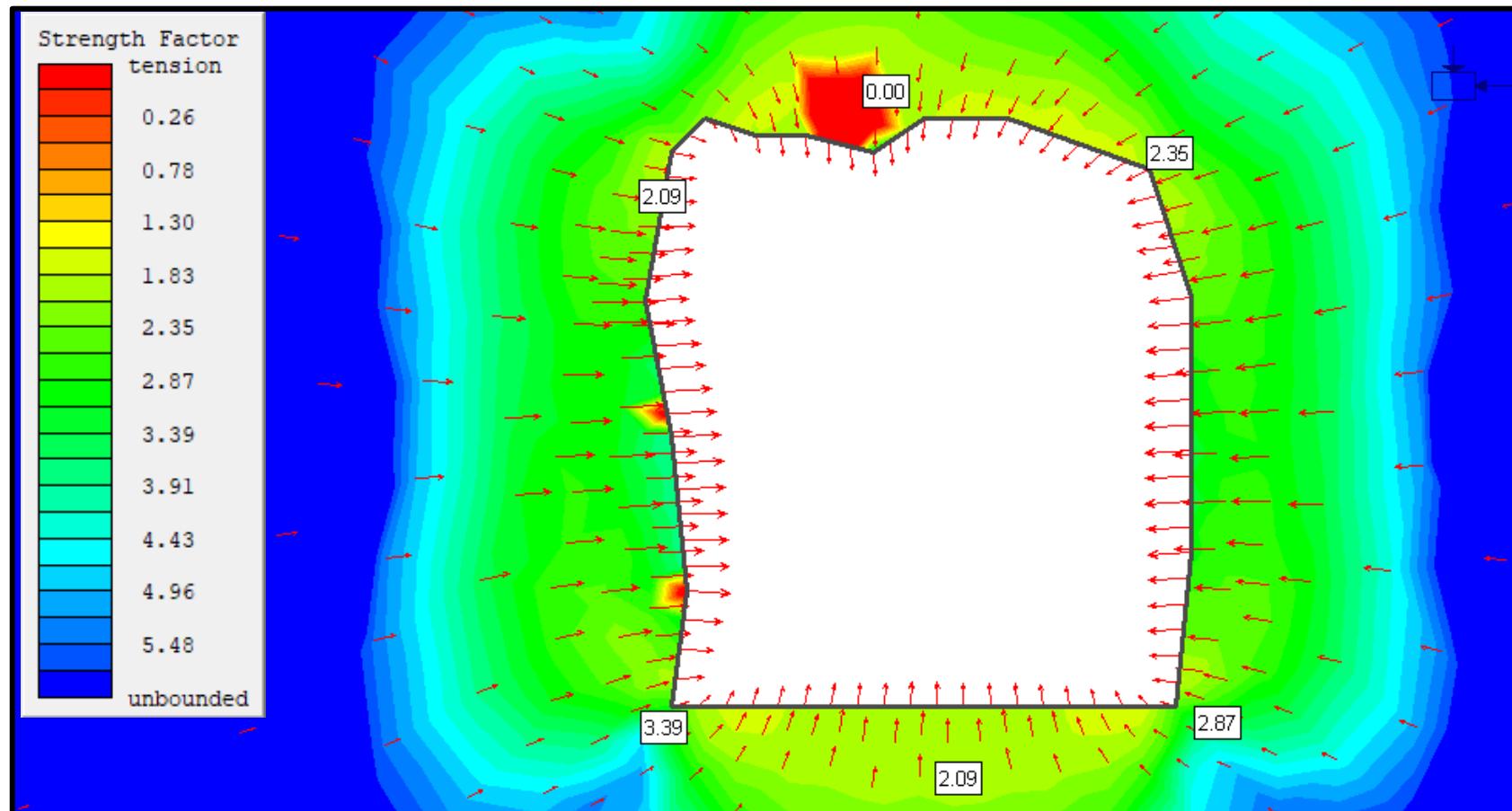


Figura 12: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación

4.2.1.5. Sostenimiento de la Estación 1

Para el cálculo del diámetro equivalente (DE) se tomó la altura de la galería como primer dato y en la relación de soporte de excavación (ESR) se tomó a la galería como excavación minera permanente ver tabla 23.

- **Análisis de sostenimientos por Q de Barton**

$$De = \frac{\text{Ancho, diámetro o altura (m) de la excavación}}{\text{Relación de sostenimiento de la excavación ESR}}$$

$$De = \frac{2.50}{1.60} = 1.6$$

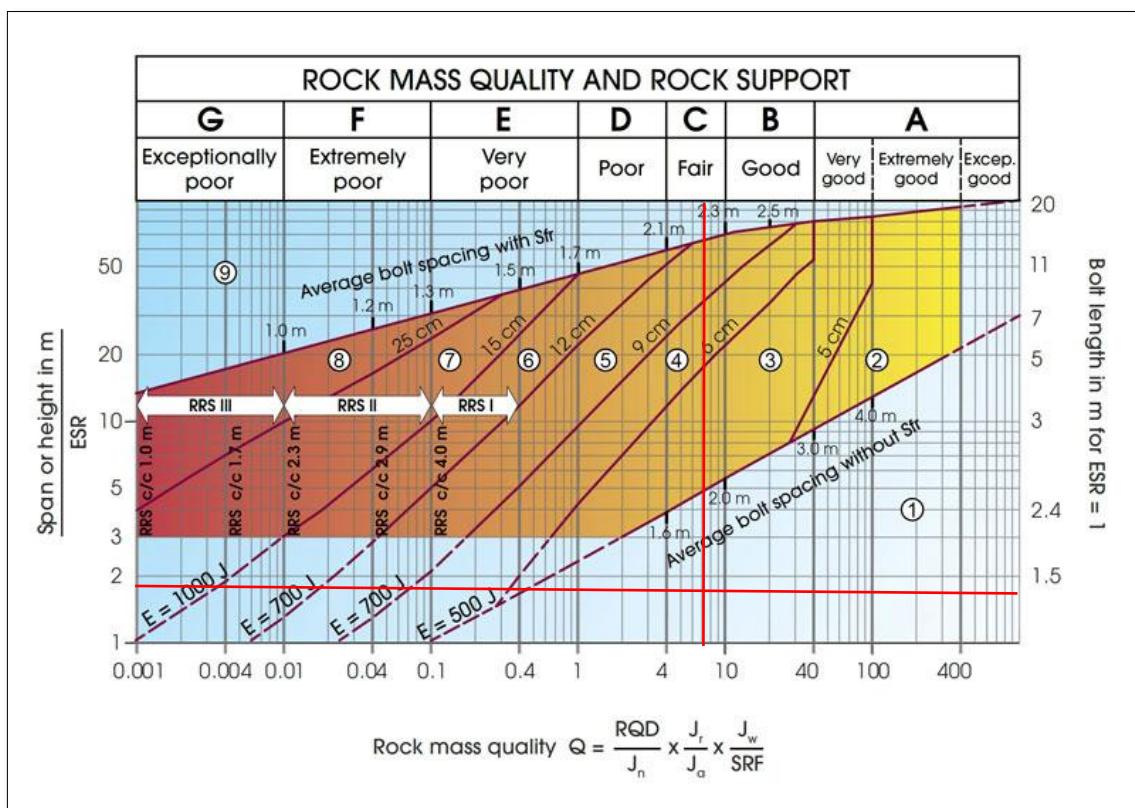


Figura 13: Gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación 1.
Modificado de: Grimstad y Barton, (1993).

Según el análisis por Q de Barton en la Estación 1 se requiere sostenimiento puntual en la zona del techo donde existe falla tipo cuña, para ello se presenta la evaluación el software Unwedge para determinar el sostenimiento que requieren dichas estructuras.

- **Análisis de sostenimientos en el software Unwedge**

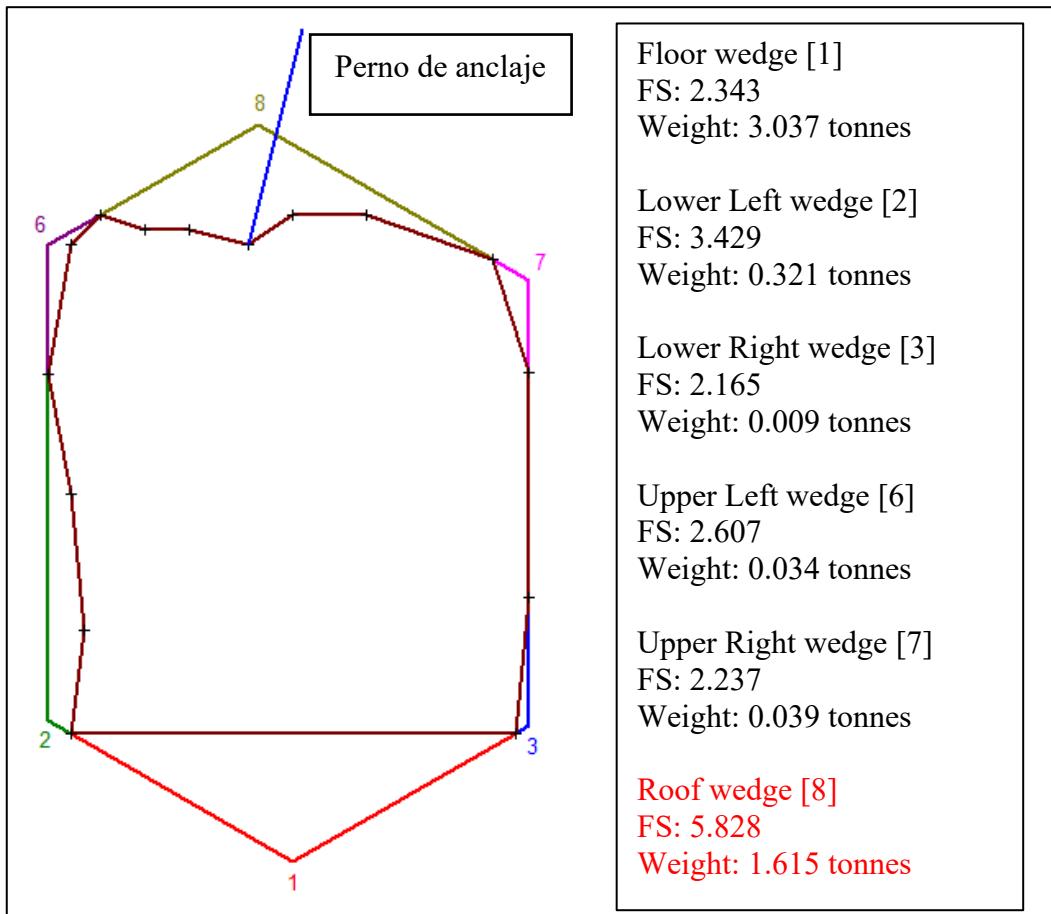


Figura 14: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 1

En el presente gráfico podemos observar que la cuña 8 presenta un factor de seguridad que no es apropiado para el avance seguro de las operaciones de la mina María Rosa Mística, por lo que se ha considerado sostener con pernos de anclaje de 2 m con un ángulo de 60° con respecto a la horizontal.

4.2.2. Estación 2

La estación 2 se encuentra localizada a los 50 metros de galería de la mina María Rosa Mística, con orientación del túnel: N 210°, entre sus características principales presenta alteración en forma de patinas de óxidos en diaclasas, la roca es arenisca de gano medio pertenecientes a la Formación Chimú, ésta estación presenta un RMR corregido por orientación de discontinuidades de 58, roca tipo III, calidad media, la cual será sostenida puntualmente con pernos de 2 metros.



Fotografía 3: Estación 2

Tabla 32.

Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 2

TABLA 4.- SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR		
A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN Y SUS VALORES		Rango de Valores								
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 10 Mpa	4-10 Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	7		
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250 Mpa	100-250 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa			
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0		
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%				
	Valoración	20	17	13	8	3				
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm				
	Valoración	20	15	10	8	5				
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas				
	Valoración	30	25	20	10	0				
5	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125			
		Presión de agua/ o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5			
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
	Valoración	15	10	7	4	0				
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES										
Longitud de las discontinuidades-persistencia		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Valoración		6	4	2	1	0				
Separación (apertura)		Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm				
Valoración		6	5	3	1	0				
Rugosidad		Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla				
Valoración		6	5	3	1	0				
Relleno (panizo)		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm				
Valoración		6	4	2	1	0				
Intemperización		Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta				
Valoración		6	5	3	1	0				
VALOR TOTAL RMR		58	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				
VALOR TOTAL RMR Corregido		58	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				

Modificado de: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 33.

Resumen de clasificaciones geomecánicas para la Estación 2

Resistencia de roca (Mpa)				80 - 100	
				Q	
Criterios	RQD (%)	RMR	GSI	RQD(%)	86
				Jn	4
				Jr	3
				Ja	2
				Jw	0.66
				SRF	2.5
				Q	8.55
Puntaje	Cuantitativo	86	58	53	Media
	Cualitativo	Buena	Regular	Regular	

En la Tabla 35 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica de la Estación 2 donde se puede observar que según el RQD la roca se encuentra en una clasificación buena con un valor de 86%, un RMR de 58 siendo una roca regular y un GSI de 53 estando también en una clasificación regular y un Q de Barton con valor 8.55 lo que vendría a ser una roca media.

4.2.2.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 2

Para la Estación 2 el gráfico de la izquierda se representa los esfuerzos principales mayores y menores, en la derecha se representan los esfuerzos normales y cortantes en de dicha Estación. Las Propiedades geomecánicas de dicha estación que se muestra según Hoek-Brown ($mb = 0.687$ $s = 0.0011$) y Morh Coulomb (Angulo de fricción = 54.25° , cohesión = 0.289 MPa). La línea Mogi de color verde se encuentra por debajo de la envolvente de las tensiones principales en una parte que nos indica un modo de rotura frágil.

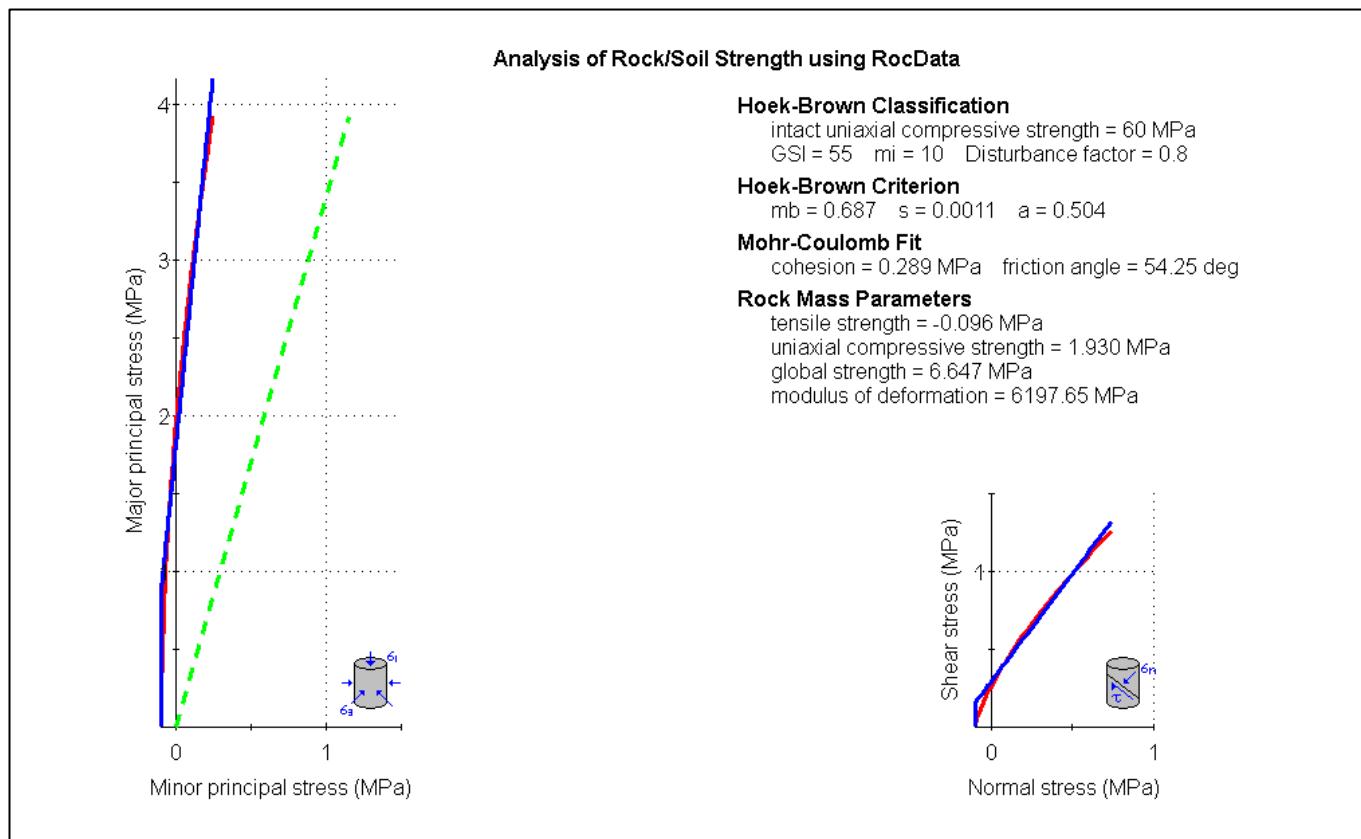


Figura 15: Envolvente de curva de Hoek y Brown para la Estación 2

4.2.2.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 2

El movimiento cinemático en la proyección estereográfica muestra que la intersección de las tres familias de discontinuidades está formando cuñas donde los planos de intersección de diaclasas (D/DD): D-2 y E: $47^{\circ}/95^{\circ}$, E y D-1: $25^{\circ}/337^{\circ}$, y D-1 y D-2: $64^{\circ}/175^{\circ}$. Presentando todo este análisis por el ángulo de fricción 54.25° .

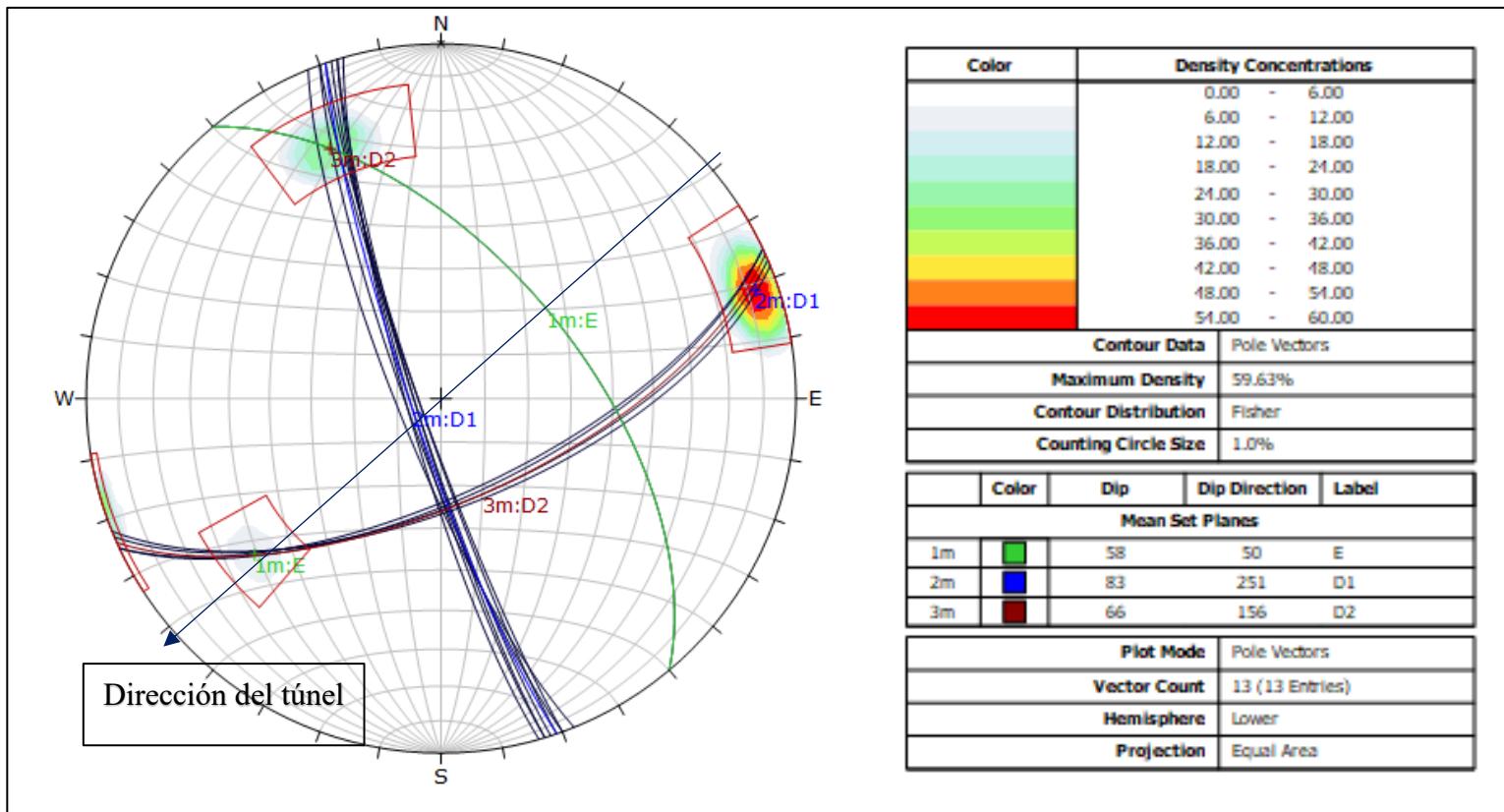


Figura 16: Proyección estereográfica de la Estación 2.

4.2.2.3. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 2

Unwedge muestra cómo se encuentran dispuestas las cuñas en la Galería María Rosa Mística para la Estación 2 y con sus respectivos factores de seguridad los cuales se analizarán en el apartado de sostenimiento.

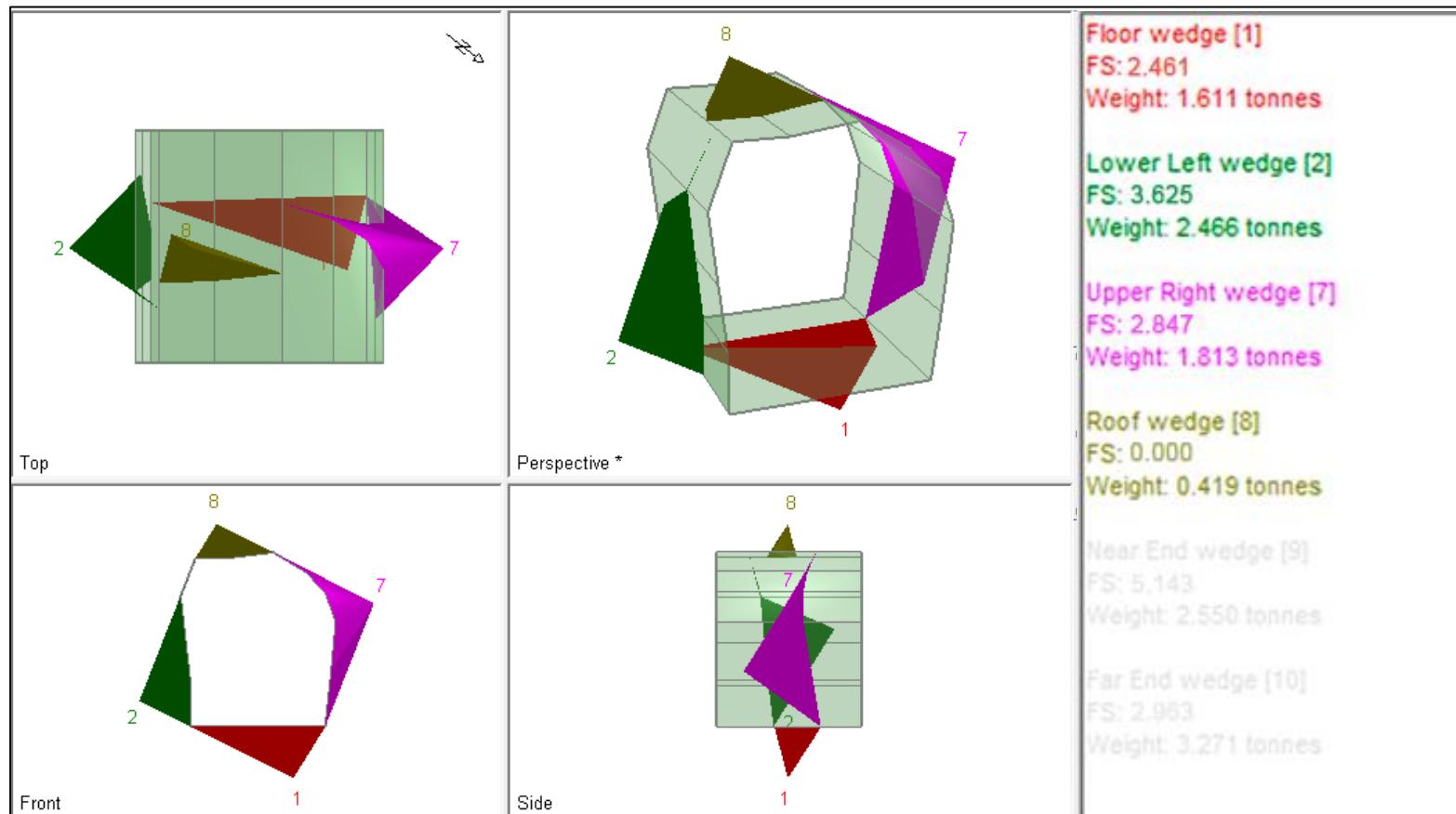


Figura 17: Presentación en el software Unwedge para la Estación 2

4.2.2.4. Análisis mediante el software Phase2 de la Estación 2

El análisis del factor de seguridad para la estación 2 muestra inestabilidad en la parte superior y lado inferior izquierdo de la galería, donde tenemos un FS de 0.52 el cual se encuentra por debajo del permitido para ser estable.

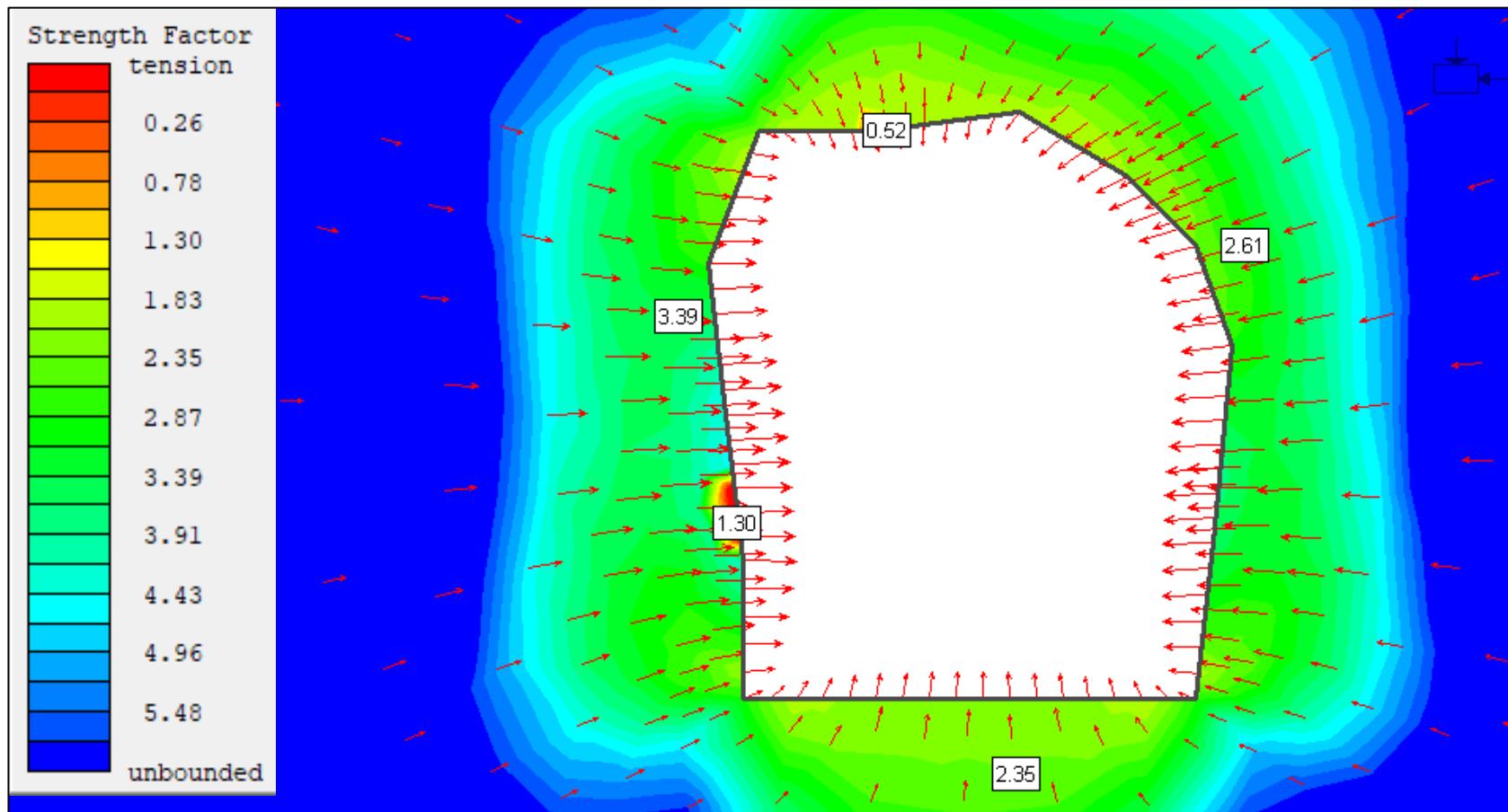


Figura 18: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación 2

4.2.2.5. Sostenimiento de la Estación 2

Para el cálculo del diámetro equivalente (DE) se tomó la altura de la galería como primer dato y en la relación de soporte de excavación (ESR) se tomó a la galería como excavación minera permanente ver tabla 23.

- **Análisis de sostenimientos por Q de Barton**

$$De = \frac{\text{Ancho, diámetro o altura (m) de la excavación}}{\text{Relación de sostenimiento de la excavación ESR}}$$

$$De = \frac{2.50}{1.60} = 1.6$$

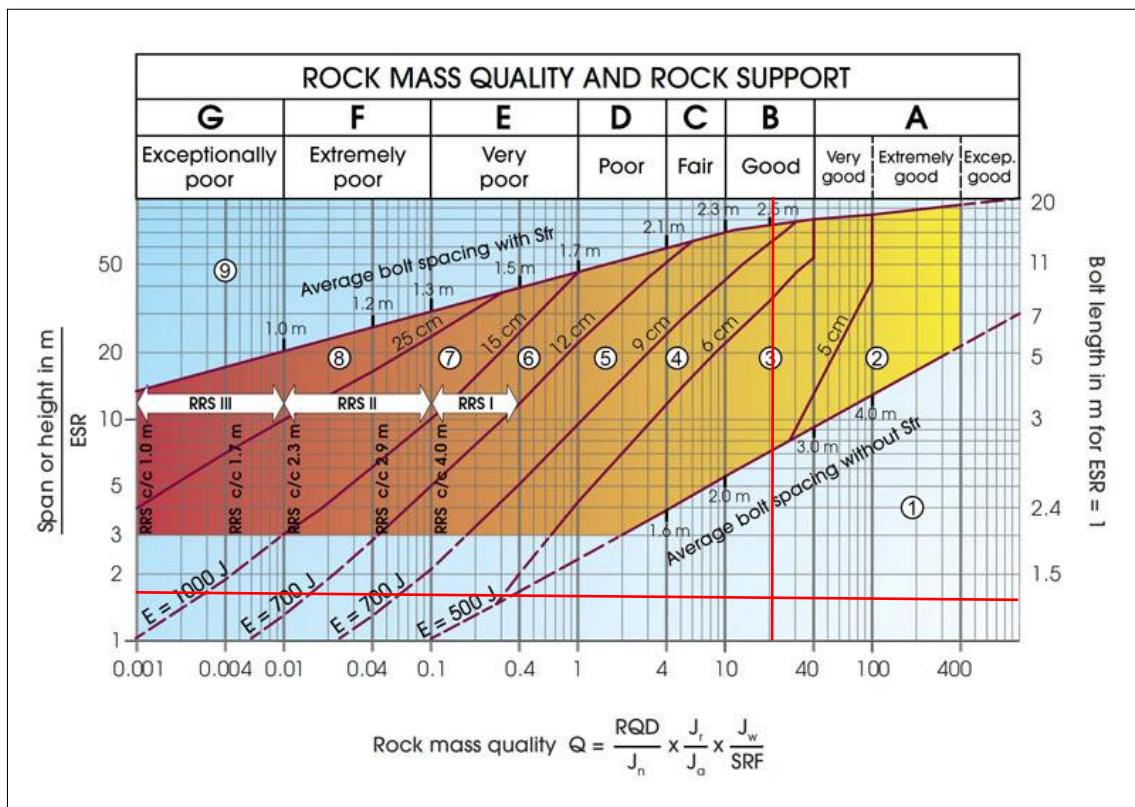


Figura 19: Gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación 2.

Fuente: Grimstad y Barton, (1993).

Según el análisis por Q de Barton en la Estación 2 se requiere utilizar sostenimiento puntual en la zonas con probables fallas tipo cuña, para ello se presenta la evaluación el software Unwedge para determinar el sostenimiento que requieren dichas estructuras.

- **Análisis de sostenimientos en el software Unwedge**

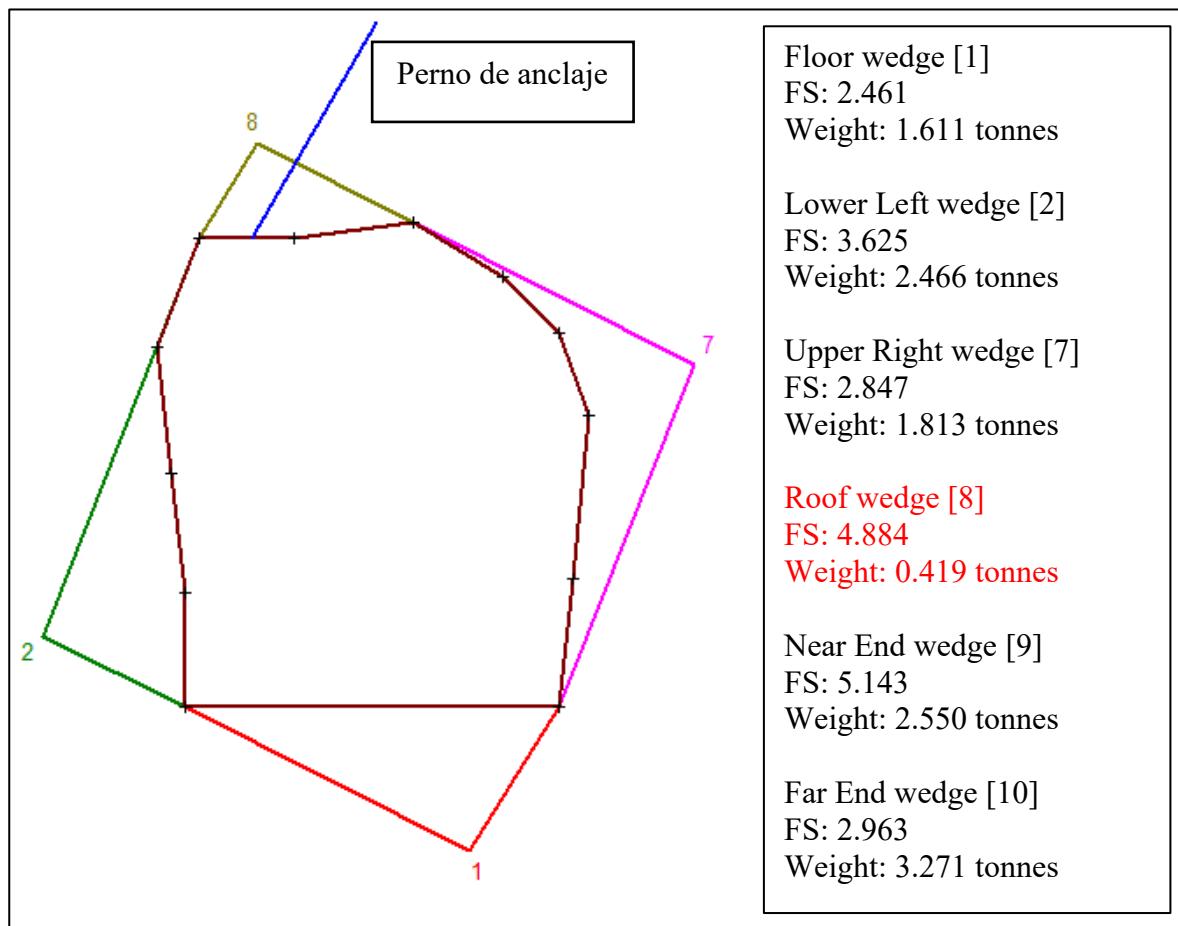


Figura 20: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 2

Para la Estación 2 se observa que la cuña 8 tiene problemas de inestabilidad por lo que se le aplica un sostenimiento con pernos de 2 m de longitud logrando y un ángulo de 65° así un FS estable y seguro para el avance de las operaciones de la mina María Rosa Mistica.

4.2.3. Estación 3

La estación 3 se encuentra localizada a los 75 metros de galería de la mina María Rosa Mística, con orientación del túnel: N 230°, entre sus características principales presenta alteración en forma de patinas de óxidos en diaclasas, la roca es arenisca de gano medio pertenecientes a la Formación Chimú, ésta estación presenta un RMR corregido por orientación de discontinuidades de 44, roca tipo III, calidad media, la cual será sostenida por malla para evitar desprendimiento de roca.



Fotografía 4: Estación 3

Tabla 34.

Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 3

TABLA 4.- SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR			
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES											
Parámetros		Rango de Valores									
1	Resistencia de la roca intacta	Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial				
	Resistencia Compresiva Uniaxial		>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa	1- Mpa < 1 Mpa			
	Valoración		15	12	7	4	2	1 0			
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%					
	Valoración		20	17	13	8	3				
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm					
	Valoración		20	15	10	8	5				
4	Condición de las discontinuidades		Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura > 5mm 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas				
	Valoración		30	25	20	10	0				
	5	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	7			
			Presión de agua/ o principal máximo	0	< 0.1	0.1 0.2	0.2 – 0.5				
			Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo				
Valoración			15	10	7	4	0	19			
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES											
Longitud de las discontinuidades-persistencia			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Valoración			6	4	2	1	0				
Separación (apertura)			Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm				
Valoración			6	5	3	1	0				
Rugosidad			Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla				
Valoración			6	5	3	1	0				
Relleno (panizo)			Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm				
Valoración			6	4	2	1	0				
Intemperización			Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta				
Valoración			6	5	3	1	0				
VALOR TOTAL RMR			56	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				
VALOR TOTAL RMR Corregido			44	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				

Modificado de: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 35.

Resumen de clasificaciones geomecánicas para la estación 3

Resistencia de roca (Mpa)				80 - 100		
Criterios		RQD (%)	RMR	GSI	Q	
					RQD(%)	70
					Jn	9
					Jr	3
					Ja	2
					Jw	0.66
					SRF	2.5
Puntaje	Cuantitativo	70	56	51	Q	3.08
	Cualitativo	Regular	Regular	Regular		Media

En la Tabla 32 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica de la Estación 3 donde se puede observar que según el RQD la roca se encuentra en una clasificación regular con un valor de 70%, un RMR de 56 siendo una roca regular y un GSI de 51 estando también en una clasificación regular y un Q de Barton con valor 3.08 lo que vendría a ser una roca media.

4.2.3.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 3

En el software RocData se representa la envolvente de curva de Hoek y Brown para la estación 3 el gráfico de la izquierda se representa los esfuerzos principales mayores y menores, las Propiedades geomecánicas de dicha estación que se muestra según Hoek-Brown ($mb = 0.729$ $s = 0.0013$) y Morh Coulomb (Angulo de fricción = 51.70° , cohesión = 0.345 MPa).

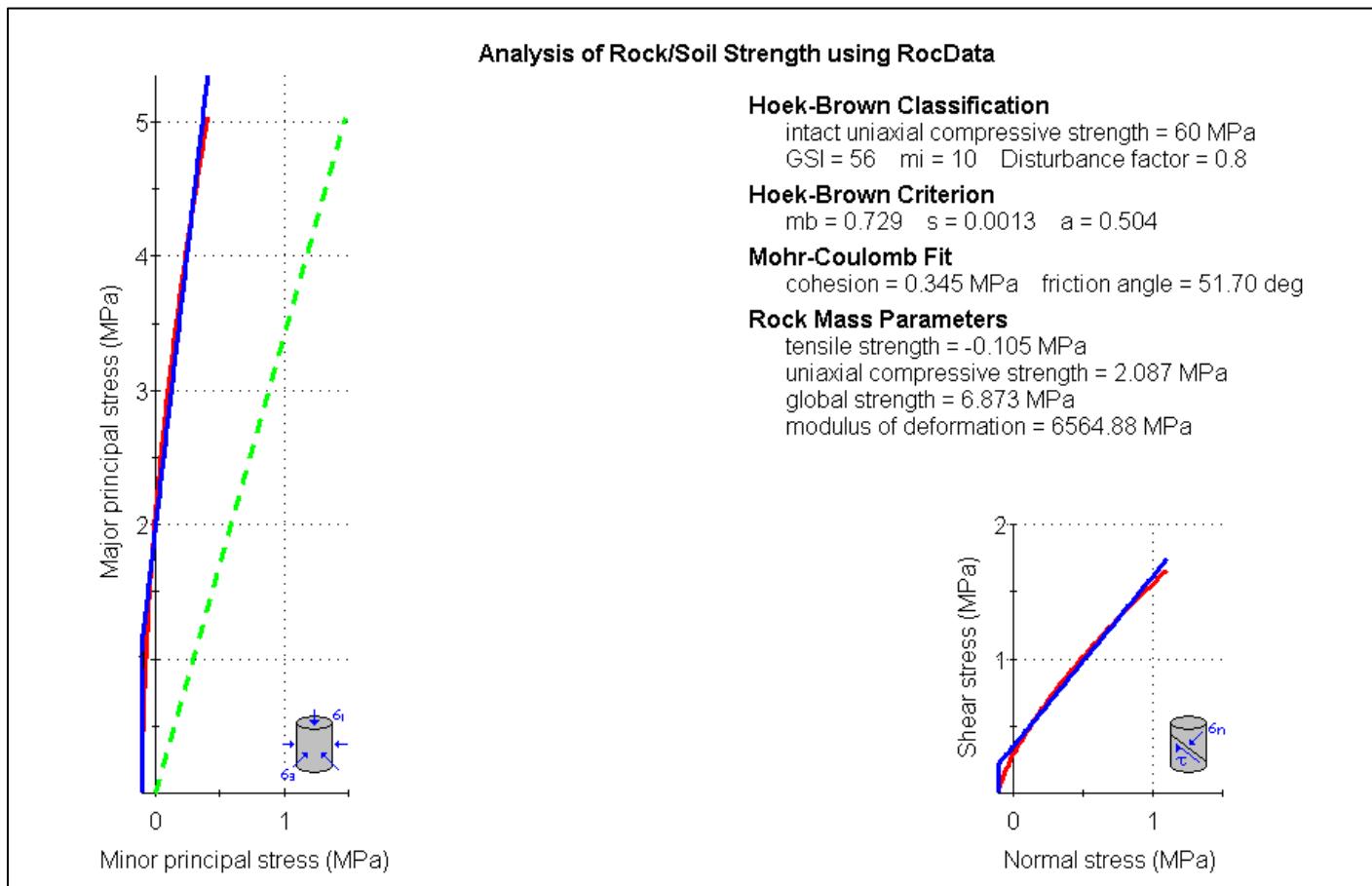


Figura 21: Envolvente de curva de Hoek y Brown para la Estación 3

4.2.3.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 3

El análisis cinemático de Dips muestra que la intersección de las cuatro familias de discontinuidades está formando cuñas con intersección de planos (D/DD): E y D-1: $2^{\circ}/140^{\circ}$, D-2 y D-1: $81^{\circ}/107^{\circ}$, D-2 y D-3: $2^{\circ}/141^{\circ}$ y D-2 y D-3: $42^{\circ}/224$.

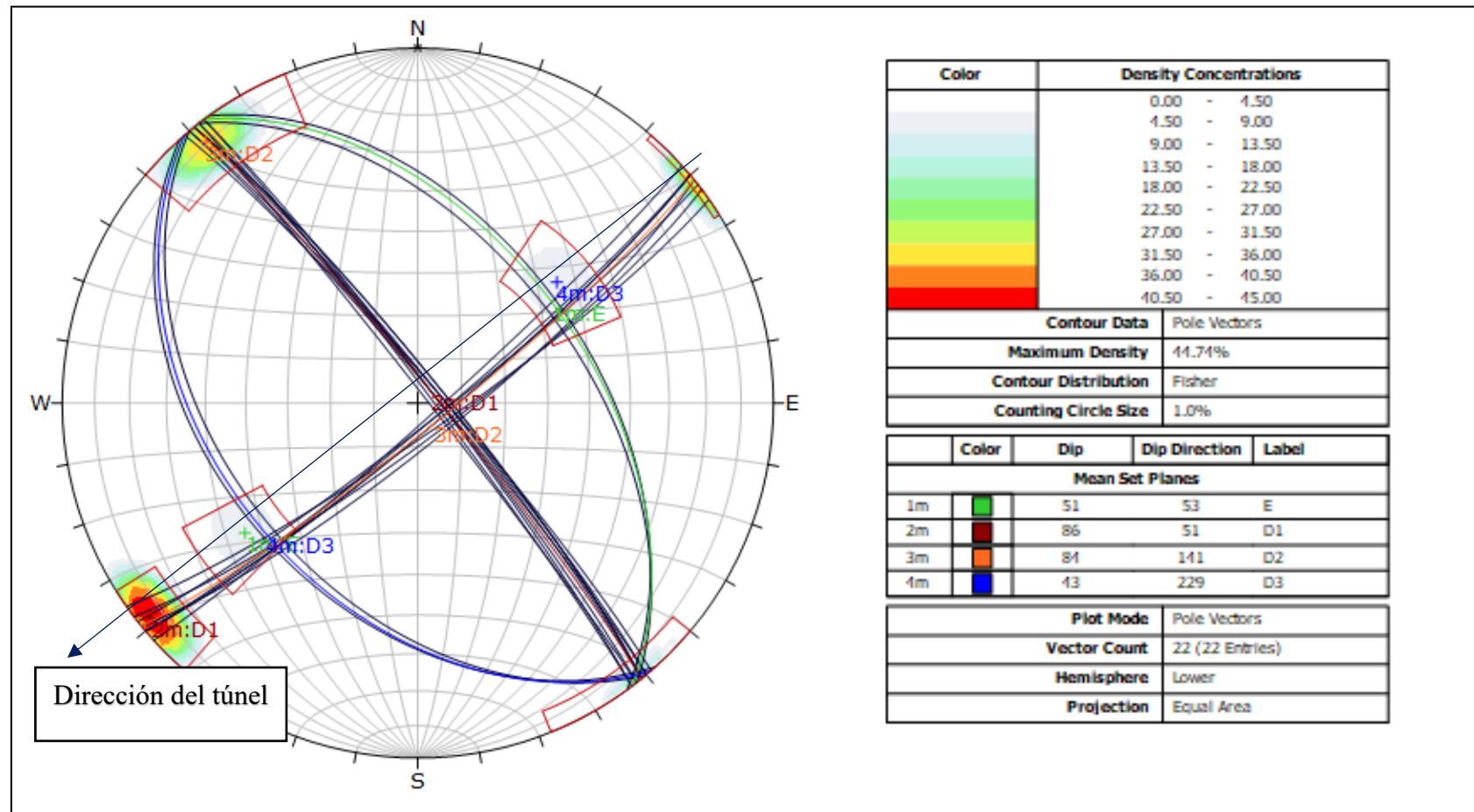


Figura 22: Proyección estereográfica de la Estación 3.

4.2.3.3. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 3

Unwedge proyecta las diaclasas, intersecciones y genera un modelo de posibles fallas tipo cuña, a continuación se muestran cómo se encuentran dispuestas las cuñas en la Galería María Rosa Mística para la estación 3 y con sus respectivos factores de seguridad los cuales se analizarán en el apartado de sostenimiento.

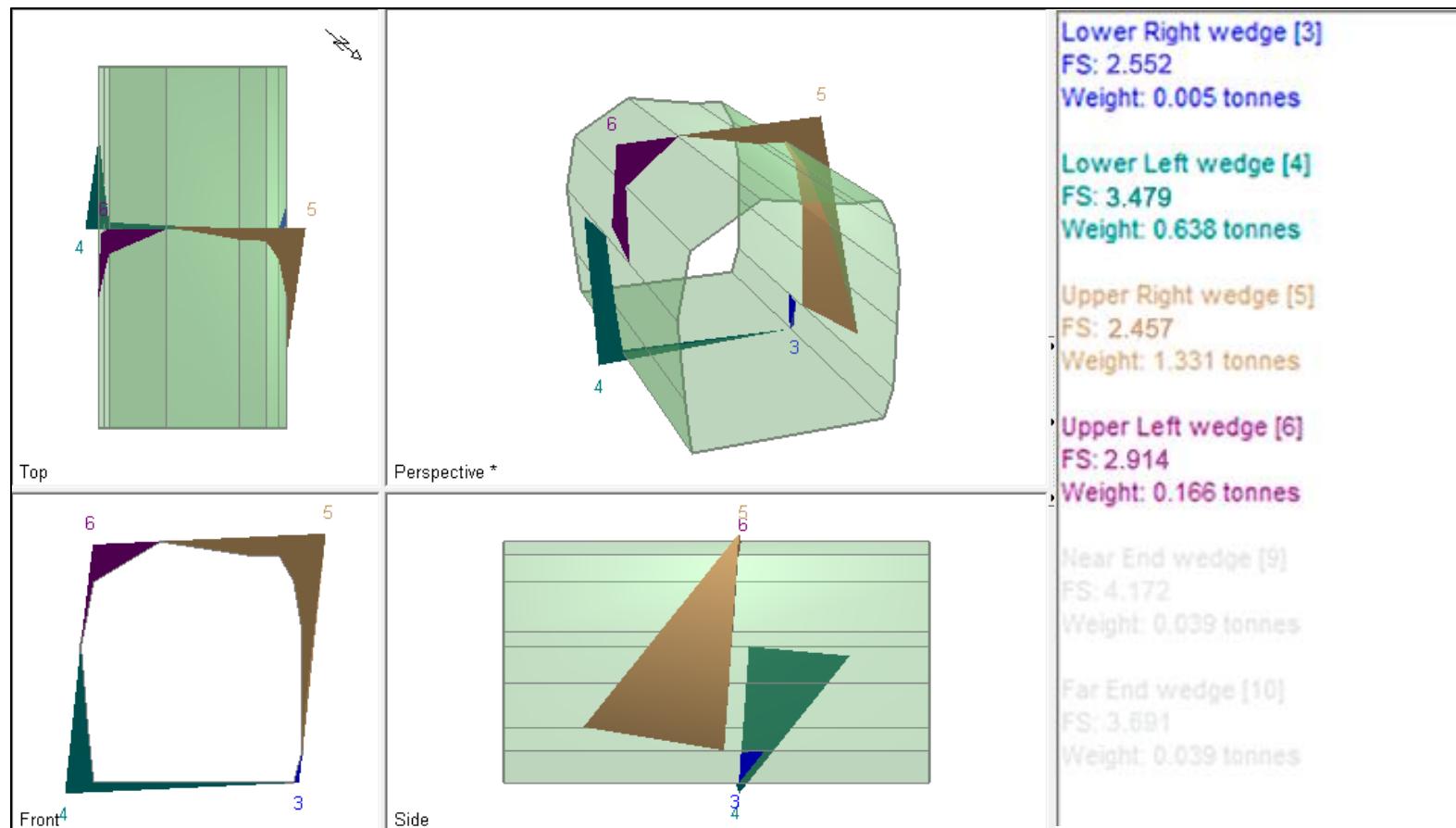


Figura 23: Presentación en el software Unwedge para la Estación 3.

4.2.3.4. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 3

La estación 3 es la que menos inestabilidad presenta, tanto en el análisis de Phase2 (Fig. 25) y Unwedge (Fig. 24), como se puede observar en la (fig. 25) se presenta una pequeña anomalía en la parte superior derecha de la Galería la cual presenta un FS de 0.52

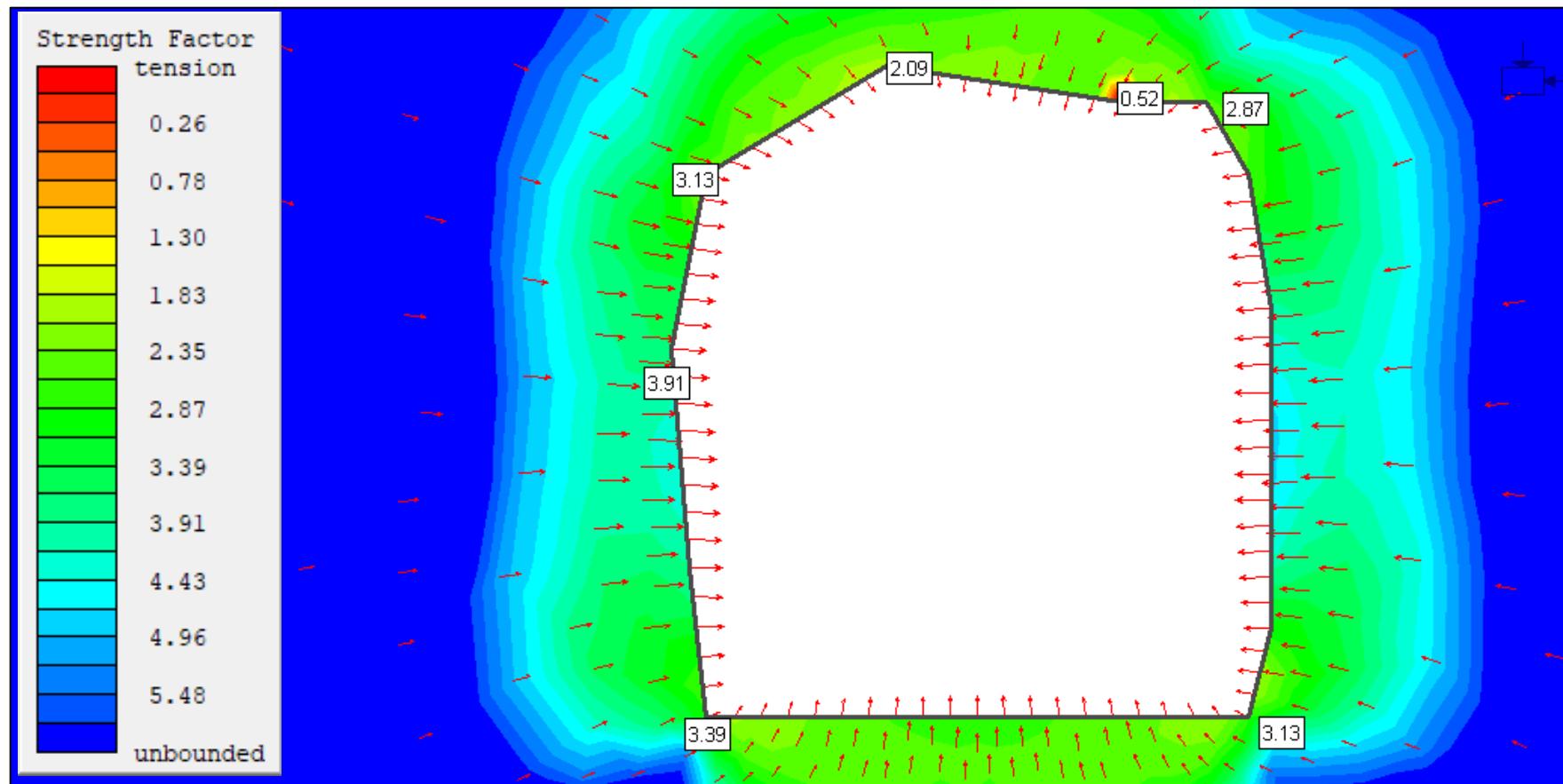


Figura 24: Representación de del factor de seguridad en Phase2 para la Estación 3.

4.2.3.5. Sostenimiento de la Estación 3

Para el cálculo del diámetro equivalente (DE) se tomó la altura de la galería como primer dato y en la relación de soporte de excavación (ESR) se tomó a la galería como excavación minera permanente ver tabla 23.

- **Análisis de Sostenimientos por Q De Barton**

$$De = \frac{\text{Ancho, diámetro o altura (m) de la excavación}}{\text{Relación de sostenimiento de la excavación ESR}}$$

$$De = \frac{2.50}{1.60} = 1.6$$

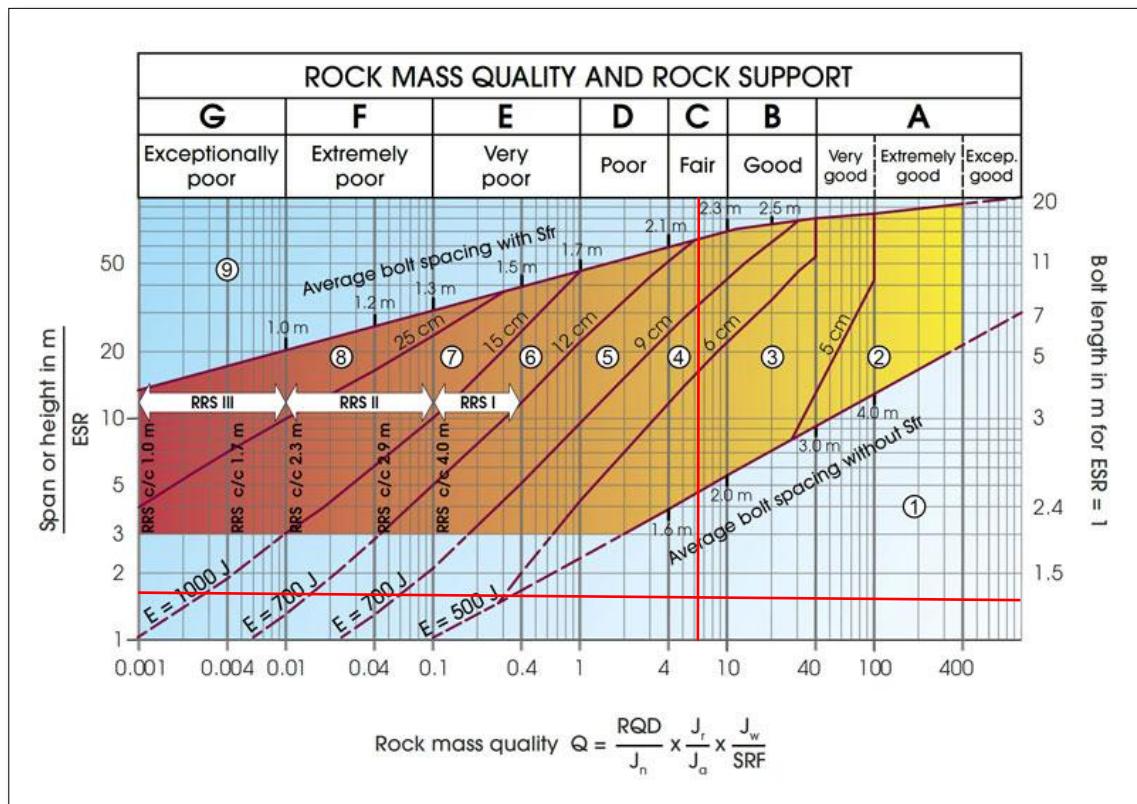


Figura 25: Gráfico de Sostenimiento del Sistema Q de Barton de la Estación 3.

Fuente: Grimstad y Barton, (1993).

Según el análisis por Q de Barton en la Estación 3 se debe tener en cuenta un sostenimiento puntual, debido a la posibilidad de desprendimiento de roca en el techo,

aunque cabe mencionar que se debe tener en cuenta posibles cuñas a las cuales se debe aplicar sostenimiento para ello se presenta la evaluación el software Unwedge para determinar el sostenimiento que requieren dichas estructuras.

- **Análisis de sostenimientos en el software Unwedge**

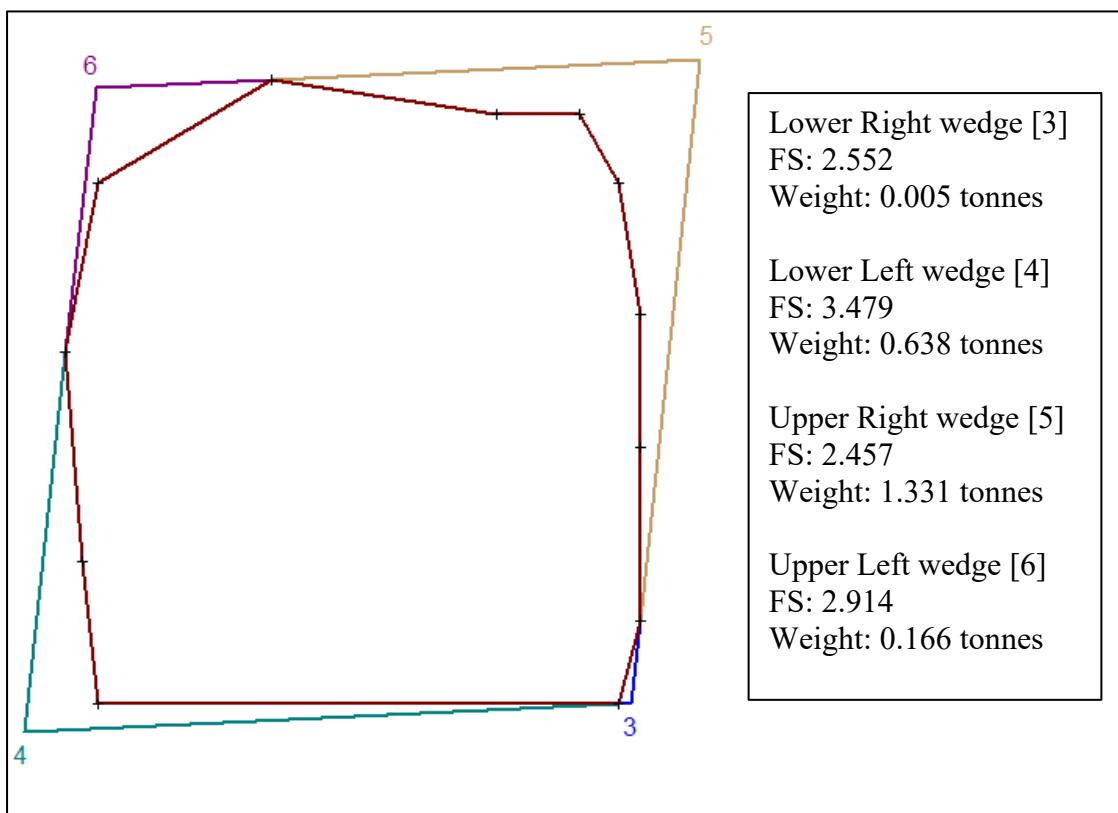


Figura 26: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 3

En la Estación 3 no se observa problemas de estabilidad con las cuñas que se encuentran en este tramo por los que se concluye que esta estación no requiere sostenimiento porque es estable.

4.2.4. Estación 4

La estación 4 se encuentra localizada a los 100 metros de galería de la mina María Rosa Mística, con orientación del túnel: N 190°, entre sus características principales presenta alteración en forma de patinas de óxidos en diaclasas, la roca es arenisca de gano medio pertenecientes a la Formación Chimú, ésta estación presenta un RMR corregido por orientación de discontinuidades de 58, roca tipo III, calidad media, la cual será sostenida puntualmente con pernos de 2 metros.



Fotografía 5: Estación 4

Tabla 36.

Valoración del macizo rocoso RMR de la Estación 4

TABLA 4.- SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR		
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES										
Parámetros			Rango de Valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	7		
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa 1- Mpa < 1 Mpa			
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0		
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%			17	
	Valoración	20	17	13	8	3				
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm			10	
	Valoración	20	15	10	8	5				
4	Condición de las discontinuidades		Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas			
	Valoración		30	25	20	10	0			
	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125			
		Presión de agua/ o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5	7		
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
Valoración			15	10	7	4	0	19		
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES										
Longitud de las discontinuidades-persistencia			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m			
Valoración			6	4	2	1	0			
Separación (apertura)			Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm			
Valoración			6	5	3	1	0			
Rugosidad			Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla			
Valoración			6	5	3	1	0			
Relleno (panizo)			Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm			
Valoración			6	4	2	1	0			
Intemperización			Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta			
Valoración			6	5	3	1	0			
VALOR TOTAL RMR		60	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				
VALOR TOTAL RMR Corregido		58	CALIDAD	MEDIA	TIPO DE ROCA	III				

Modificado de: González de Vallejo et al., (2004).

Tabla 37.

Resumen de clasificaciones geomecánicas para la Estación 4

Resistencia de roca (Mpa)				80 - 100	
Criterios	RQD (%)	RMR	GSI	Q	
				RQD(%)	84
				Jn	4
				Jr	3
				Ja	2
				Jw	0.66
				SRF	2.5
Puntaje	Cuantitativo	84	60	55	Q
	Cualitativo	Buena	Regular	Regular	

En la Tabla 41 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica de la estación 4 donde se puede observar que según el RQD la roca se encuentra en una clasificación buena con un valor de 84%, un RMR de 60 siendo una roca regular y un GSI de 55 estando también en una clasificación regular y un Q de Barton con valor 8.31 lo que vendría a ser una roca media.

4.2.4.1. Análisis mediante el software RocData de la Estación 4

El análisis en el software RocData arroja las siguientes propiedades geomecánicas de dicha estación que se muestra según Hoek-Brown ($mb = 1.230$ $s = 0.0028$) y Morh Coulomb (Angulo de fricción = 52.34° , cohesión = 0.519 MPa). La línea de Mogi de color verde se encuentra por debajo de la envolvente de las tensiones principales en una parte que nos indica un modo de rotura frágil.

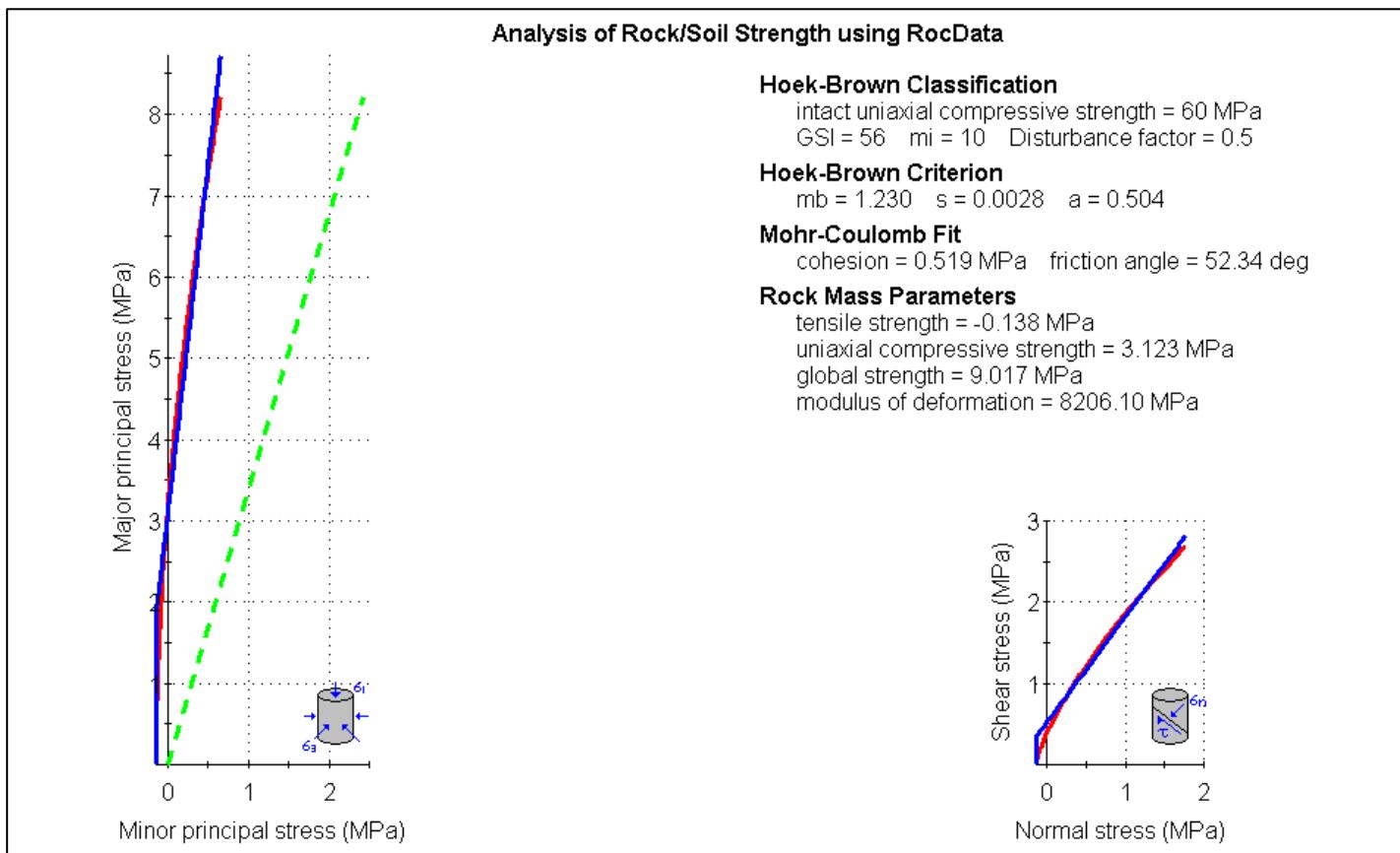


Figura 27: Envolvente de curva de Hoek y Brown para la Estación 4.

4.2.4.2. Análisis mediante el software DIPS de la Estación 4

La proyección estereográfica del movimiento cinemático, muestra que la intersección de las tres familias de discontinuidades está formando cuñas donde Los planos de intersección de diaclasas (D/DD): D-1 y E: $37^{\circ}/34^{\circ}$, E y D-2: $8^{\circ}/128^{\circ}$, y D-1 y D-2: $53^{\circ}/231^{\circ}$. Presentando todo este análisis por el ángulo de fricción 52.34° .

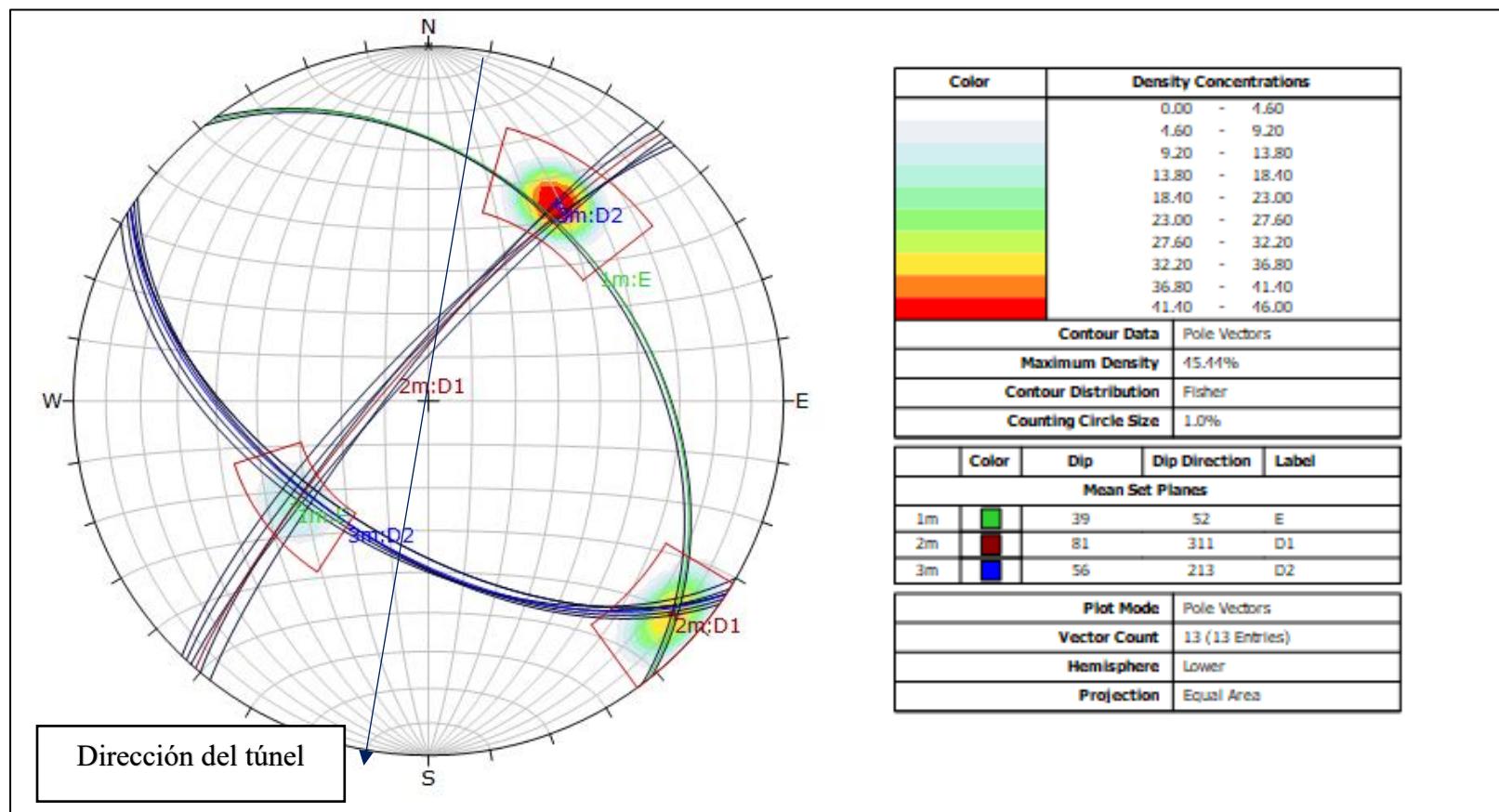


Figura 28: Proyección estereográfica de la Estación 4.

4.2.4.3. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 4

Los gráficos obtenidos mediante el software Unwedge muestra cómo se encuentran dispuestas las cuñas en la galería María Rosa Mística para la estación 4 y con sus respectivos factores de seguridad los cuales se analizarán en el apartado de sostenimiento.

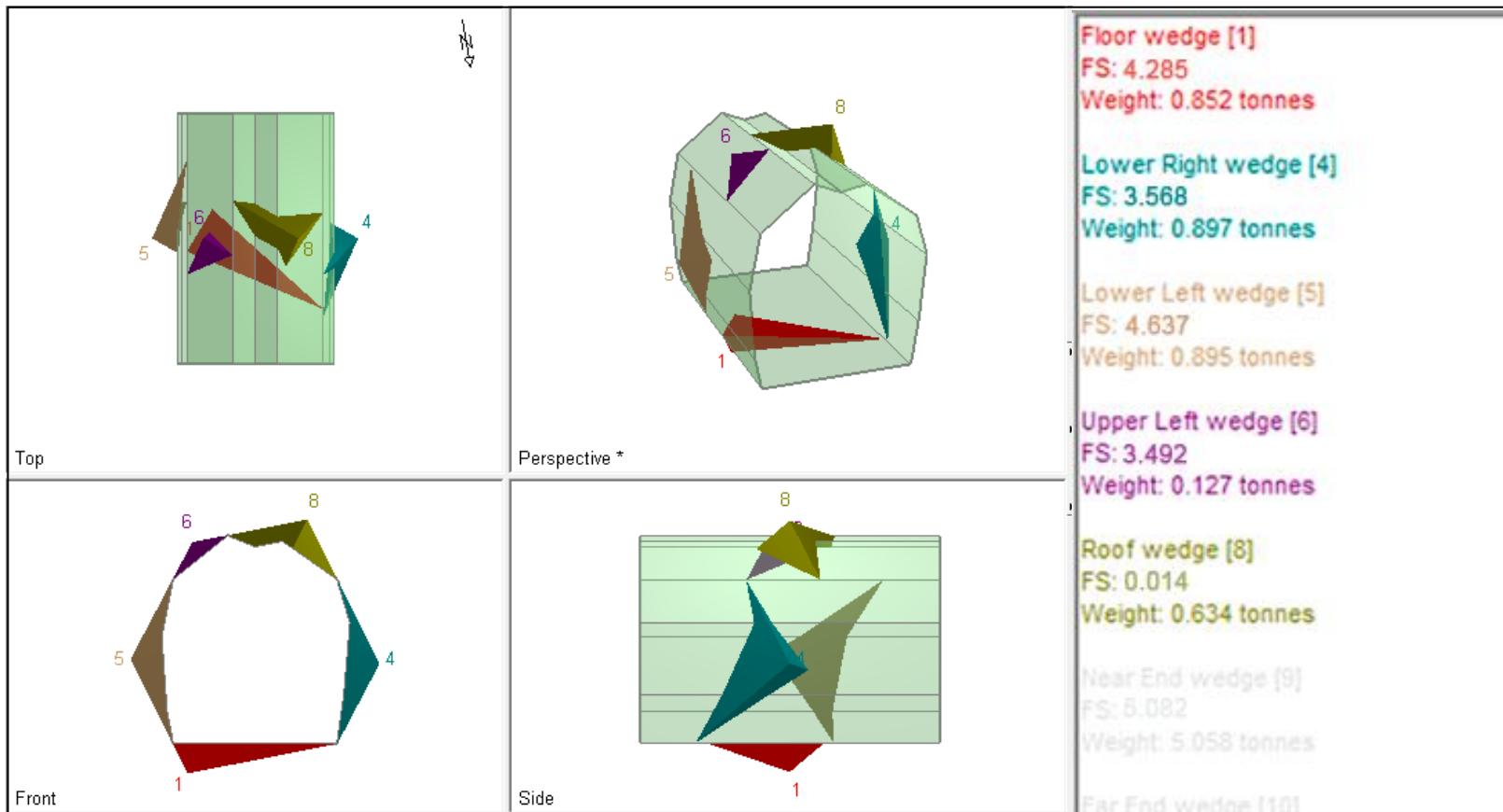


Figura 29: Presentación en el software Unwedge para la Estación 4.

4.2.4.4. Análisis mediante el software Unwedge de la Estación 4

La estación 4 presenta un factor de seguridad inferior al permitido en la parte superior central de la galería, el cual fue analizado en el software Unwedge y se encontró una cuña la cual es inestable en la misma zona, esto se debe a la presencia de diaclasas favorables para la formación de cuñas, además de la geometría de la galería la cual favorece también a la formación de dichas cuñas.

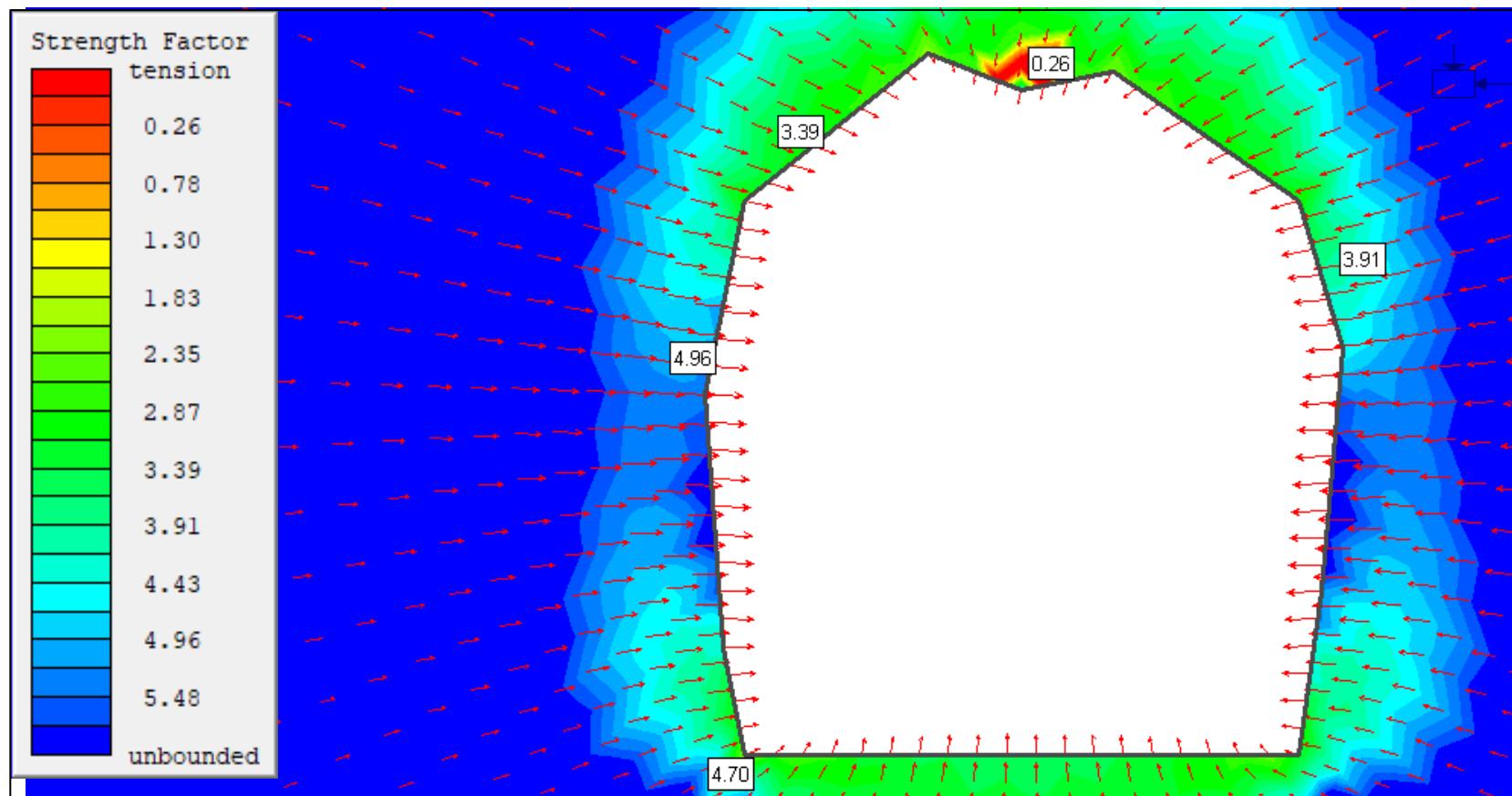


Figura 30: Representación del factor de seguridad en Phase2 para la Estación 4.

4.2.4.5. Sostenimiento de la Estación 4

- Análisis de sostenimientos por Q de Barton

$$De = \frac{\text{Ancho, diámetro o altura (m) de la excavación}}{\text{Relación de sostenimiento de la excavación ESR}}$$

$$De = \frac{2.50}{1.60} = 1.6$$

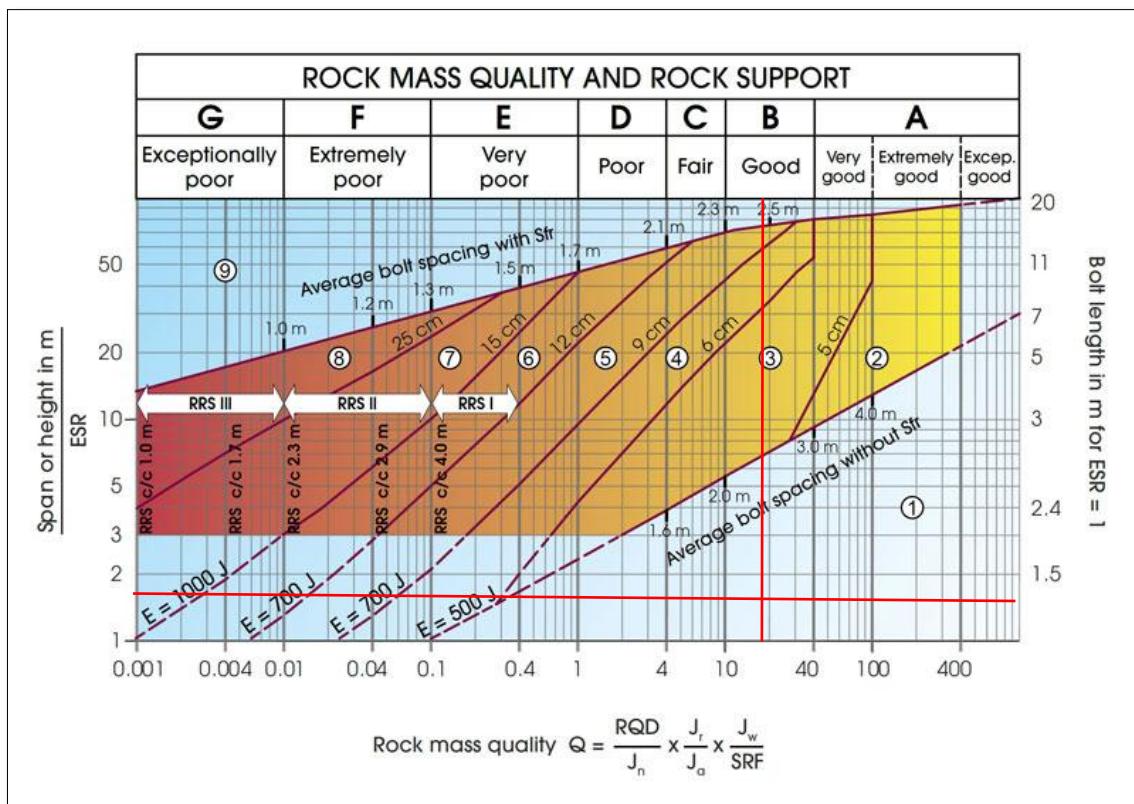


Figura 31: Gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación 4.

Modificado de: Grimstad y Barton, (1993).

Según el análisis por Q de Barton en la Estación 1 se requiere sostenimiento puntual en estructuras de falla tipo cuña, para ello se presenta la evaluación el software Unwedge para determinar el sostenimiento que requieren dichas estructuras.

- **Ánálisis de sostenimientos en el software Unwedge**

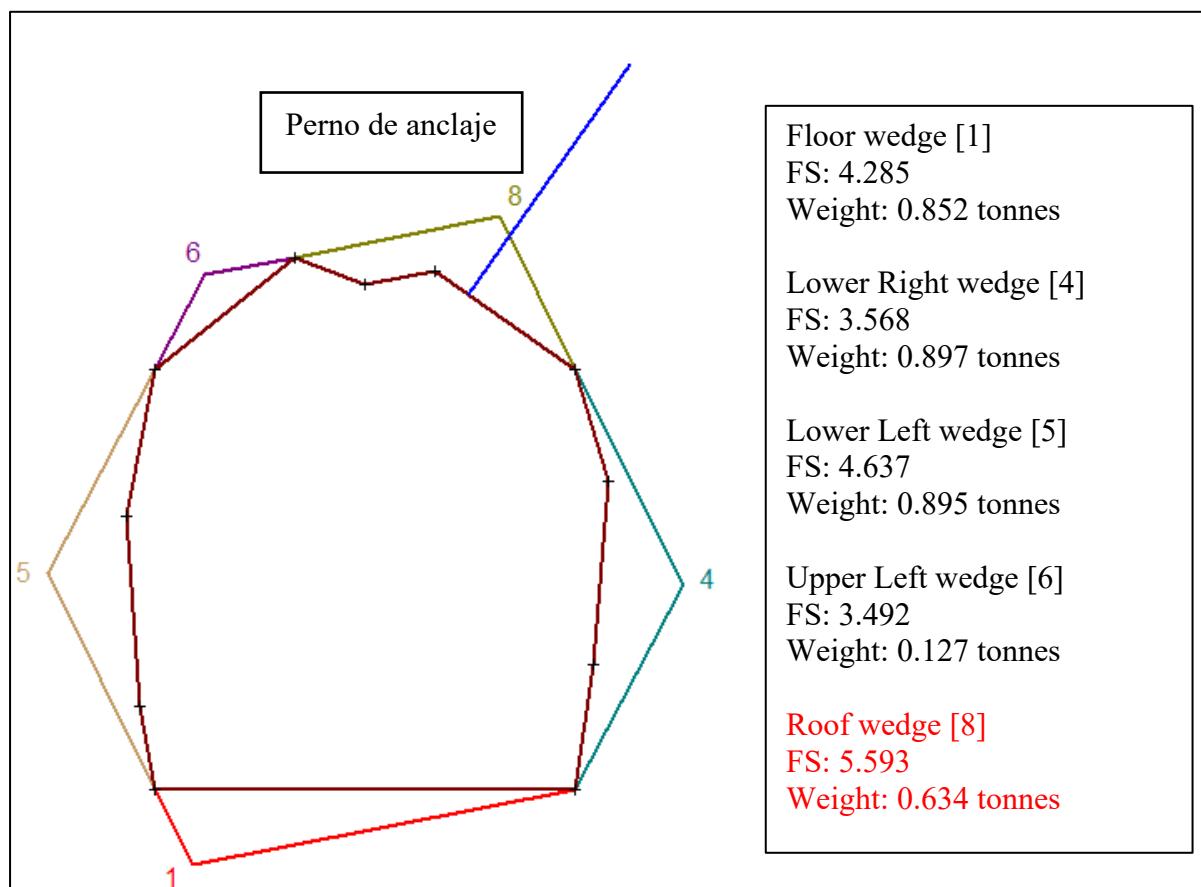


Figura 32: Análisis de sostenimientos en el software Unwedge para la Estación 4

En la Estación 4 se observa que la cuña 8 tiene problemas de inestabilidad por lo que se le aplica un sostenimiento con pernos de 2 m de longitud y mallado logrando así un FS estable y seguro para el avance de las operaciones de la mina María Rosa Mistica.

4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La inestabilidad del túnel María Rosa Mística, si está vinculada a las variables: litológicas, estructurales, hidrogeológicas y de tensiones afectando su comportamiento geomecánico y geotécnico, provocando la inestabilidad durante la construcción del túnel. Además, la galería se ve afectada por las infiltraciones y presencia de discontinuidades.

Geotécnicamente se determina que para cada estación evaluada teniendo en cuenta métodos empíricos como el modelamiento de Elementos Finitos de softwares, existe inestabilidad peligrosa en la galería, para lo cual es necesario tener en cuenta un sostenimiento puntual para cada tipo de fallamiento, teniendo en cuenta métodos seguros y económicos como son malla y/o pernos de anclaje para estaciones que presentan fallamiento tipo cuña y/o desprendimiento de rocas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El comportamiento geotécnico, se encuentra determinado por factores, como el tipo y la resistencia de las rocas, la presencia de fallas o fracturas que afectan la estabilidad, y el nivel freático. Para su clasificación geomecánica, el macizo rocoso fue evaluado considerando parámetros como, el espaciamiento, alteración, persistencia y rugosidad en las diaclasas, los cuales están relacionadas directamente al tipo de roca, de esta manera se obtuvo una toma de datos real en cada parámetro.

En el cartografiado de geo estructuras se logró identificar 5 fallas en todo el tramo de la galería, 3 fallas normales, una inversa y una de rumbo, con buzamientos entre 50° y 90° , las fallas se encuentran en roca arenisca cuarzosa, la falla de rumbo presentó brecha de falla de 10 cm de grosor con alteración de óxidos, 3 fallas presentan presencia de óxido con grosor de entre 1 a 2 cm y una no presenta óxidos.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso en la galería nos da resultados que según RMR son rocas de calidad Media (E-1, E-2, E-3 y E-4) que van variando en el rango de clasificación, y de acuerdo Q de Barton nos da valores para E-1: 8.712, E-2: 8.85, E-3: 8.05 y E-4: 8.31, siendo rocas de calidad Media.

Los sostenimientos requeridos para para cada punto de control, de acuerdo a un tratamiento de los datos mediante el software Unwedge, son pernos de anclaje de 2 m de longitud en las estaciones (E-1, E-2 y E-4) y la estación (E-3) requiere sostenimiento con malla.

5.2. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda al investigador realizar ensayos triaxiales para obtener datos más certeros de la resistencia, deformación y permeabilidad de la roca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N. Lien, R. y Lunde, J. 1974. Clasificación ingenieril de la masa rocosa para el diseño del sostenimiento de túneles. *Mecánica de rocas* 6(4), págs. 189 – 236. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/22603963_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support
- Barton, N. Grimstad, E. 1994. Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM. *Tunnels & Tunnelling International* Recuperado de http://www.nickbarton.com/downloads_02.asp
- Barton, N. 2002. Algunas nuevas correlaciones de valores Q para el apoyo en la caracterización insitu y el diseño del túnel. *Revista internacional de mecánica de rocas y ciencia en minería y geomecánica Abstracta*, 39. págs. 185 - 216. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/292056400_Some_new_Qvalue_correlations_to_assist_in_site_characterization_and_tunnel_design
- Berrocal, M. 2015. Estabilidad de Excavaciones Subterráneas. Lima - Perú: Ventura Graf. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support
- Bieniawski, Z. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications_ A CompletManual for Engineers and Geologists*. New York, John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z. 1989. Clasificación de masa rocosa ingenieril. New York - Estados Unidos: Universidad del Estado de Pensilvania.
- Brown, T. & Hoek, E. 1985. *Excavaciones Subterráneas en Rocas*. Traducción: Raymundo Dely. Ciudad de México - México: McGraw-Hill.
- Castillo, E. 2021. Estudio geotécnico para el diseño del túnel dos de la Vía Evitamiento – Huánuco. Lima - Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Contreras, L. 2015. Consideraciones geotécnicas en la construcción de 200 metros de túnel de la Mina "Escobal", en el nivel 1265, ubicado en el municipio de San Rafael Las Flores, departamento de Santa Rosa, Guatemala. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Cruzado, P. 2017. Evaluación Geomecánica Del Túnel De La Central Hidroeléctrica Potrero - San Marcos – Cajamarca. Tesis Título. Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca.

Cruz, Y. 2004. Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea. Lima, Perú, Sociedad nacional de minería, petróleo y energía. Recuperado de <https://www.udocz.com/apuntes/10237/manual-de-geomecanica-aplicada-a-la-prevencion-de-accidentes-en-mineria-subterranea>

Feijoo, E. Padrón, J. 2020. La resistividad de rocas y su relación con la resistencia a compresión simple en mina. Universidad, ciencia y tecnología. 24(99):61-67.

Gavilanes, H. Andrade, B. 2004. Introducción A La Ingeniería De Túneles. Quito, Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME).

González de Vallejo, L. Mercedes, F. Luis, O. Carlos, O. 2004. Ingeniería Geológica. Isabel.Capella (ed.). Madrid, PEARSON EDUCACIÓN, S. A.

Grimstad, E. Barton, N. 1993. Updating the Q-Sytem for NMT. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Fagemes, Norway. Ed. Kompen, Opsahi and Berg. Norwegian Concrete Association. Oslo.

Herrera, E. 2021. Evaluación Geomecánica para el Diseño del Sostenimiento del Túnel de Exploración Chiquicocha Fase II – Minera Yanacocha SRL, 2018. Cajamarca - Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.

Herrera, J. (2019). *Introducción a la Minería Subterránea*. Obtenido de oa.upm.es: https://oa.upm.es/62723/1/CARACT_Mineria_Interior_LM1B4T1R0-20191114.pdf

Hoek, E. Carranza, C. Corkum, B. 2002. El Criterio de Rotura de Hoek & Brown.

Huacac, G. & Urquiza, A. 2019. Evaluación Geotécnica para la Construcción del Túnel de Trasvase desde la Quebrada Cañipia hasta la Quebrada Tucsamayo en el Distrito de Espinar – Cusco. Cusco - Perú: Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cusco.

Jordá, B y Fernández, A. 2010. Contribución al conocimiento geotécnico de la Mina Mochi de cara a su musealización. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería y medio ambiente, ISSN 1136-4785, Nº. 195, 2010 AGO, págs. 28 - 33. Recuperado de 107 https://www.researchgate.net/publication/318338944_Contribucion_al_conocimiento_geotecnico_de_la_Mina_Monchi_de_cara_a_su_musealizacion.

Marinos, P y Hoek, E. 2000. GSI: Una herramienta geológicamente sencilla para la estimación de resistencia de la masa rocosa. Conferencia en procedimientos de GeoEng2000 (ed. MC Erwin), Melbourne, vol. 1, págs. 1422-1440. Technomic, Lancaster, PA. Recuperado de <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>

Montoya, F. 2018. Relación Geotécnica y Litomorfoestructural del Túnel de la Mina Paredones Nivel 5 San Pablo – Cajamarca. Cajamarca - Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.

Morera de la Vall, G. 2016. Instrumentación Y Monitorización Geotécnica Del Nuevo Túnel "El Melón". Madrid - España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.

OSINERGMIN. 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores mineras. Magdalena del mar, Lima, Peru, INVERSIONES IAKOB S.A.C.

Páez, A. 2016. Evaluación de la Condición Geotécnica de los Frentes Activos de la Mina de Hierro El Uvo. Boyacá - Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Ramirez, O y Alejano M. 2004. Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid, España. 285.

Rodríguez, H & Carvajal, M. 2016. Análisis Geomecánico Y Estabilidad Del Túnel Chacahuaro - Tramo 2 Iirsa Centro. Xviii Congreso Peruano de Geología, 1-4.

ANEXOS 1: PLANOS TEMÁTICOS

Plano N° 01: Ubicación

Plano N° 02: Geotécnico

Plano N°03: Geológico y perfil