

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS EN CIENCIAS DE LA
TIERRA

**“ESTUDIO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS
GEO MECÁNICO EN LA MINA SAN JUAN; DISTRITO MINERO
PONCE ENRÍQUEZ, PROVINCIA AZUAY, ECUADOR”**

PROYECTO DE GRADUACION

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOLOGIA

JOSE
CUERVAS-MONS
GONZALEZ DE SELA

Docente Tutor: Ing. Janio Nazareno

GUAYAQUIL – ECUADOR

2014 – 2015

AGRADECIMIENTOS

Como mostrar en una sola página la gratitud y el reconocimiento que siento por todas aquellas personas que hicieron que este proyecto de fin de carrera conociera la luz.

Agradezco a mi tutor, el Ing. Janio Nazareno, por todas sus recomendaciones y orientaciones a lo largo de este proyecto. También al Dr. Luis Jordá, por su desinteresada e inestimable ayuda, y por compartir todos sus conocimientos de mecánica de rocas y geomecánica.

A la decana de la FICT, la Dra. Elizabeth Peña, a la subdecano de la FICT, la Dra. Paola Romero, a la coordinadora de Ing. de Minas, la MSc. Samantha Jiménez y al coordinador de la carrera de Ing. en Geología, el MSc. Kenny Escobar, así como a los Doctores de la Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo, M^a José Domínguez y Jorge Gallastegui, por todo el apoyo personal y administrativo recibido.

A la Cooperativa 12 de Octubre y a los trabajadores de la Mina San Juan.

A Leslie por su ayuda en la escritura, redacción y estructuración de este PFC; y a la Asociación de Estudiantes de Ing. en Geología de la Espol (AAPG ESPOL Student Chapter, 2014-2015).

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi familia, por estar siempre ahí, y en especial a mi abuelo Pepe, geólogo autodidacta. A Leslie, por ayudarme en mi impaciencia y hacerme feliz en el día, en la noche. A ti destino, por permitirme llegar a este momento. A mis amigos, de ambos lados del mundo. A todos aquellos geólogos que hicieron de su profesión, mi vocación.

José Cuervas-Mons

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



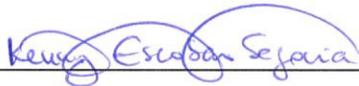
Dr. Kervin Chunga

PRESIDENTE



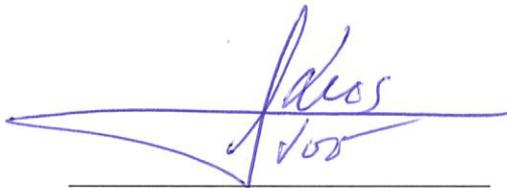
MSc. Janio Nazareno

TUTOR



MSc. Kenny Escobar

VOCAL PRINCIPAL



Dr. Luis Jordá

VOCAL SUPLENTE

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de Espol)


Jose Cuérvias-Mons

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la geología y la estructura, así como las propiedades geomecánicas y la calidad del macizo rocoso en la mina San Juan, Campo Minero Ponce Enríquez, Provincia de Azuay, Ecuador. Sus resultados permitirán obtener una perspectiva y orientación clara sobre la estabilidad de galerías y cruceros en minas subterráneas. Para alcanzar este objetivo se usa una metodología que consiste en la revisión y recopilación exhaustiva de documentación bibliográfica, toma de datos en campo y utilización de herramientas digitales para el análisis geomecánico de las rocas (software VISUAL TOPO v4.7, DIPS v5, ROCDATA v3, y UNDWEDGE v3), para la obtención de distintos modelos ingenieriles. Mediante las clasificaciones geomecánicas de Rock Quality Designation (RQD) de Deere, Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski y el índice Q de Barton, se estimó la calidad del macizo rocoso. La estabilidad del macizo rocoso en minas subterráneas depende de la orientación de las discontinuidades, características resistentes de las juntas y de la matriz rocosa con respecto a la galería en cuestión. El estudio comprende cinco estaciones geomecánicas en diferentes puntos estratégicos de la mina y que han servido para la caracterización local y global. Mediante la aplicación del software UNDWEDGE se han analizado los diferentes modos de rotura de cuñas cinemáticas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	VI
ABREVIATURAS.....	X
SIMBOLOGÍA.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
INDICE DE TABLAS.....	XVII
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCION.....	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Situación geográfica del área de estudio.....	2
1.1.2 Geografía: clima y vegetación	2
1.1.3 Geografía humana y situación socio-económica	3
1.1.4 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
CAPITULO II.....	7
MARCO GEOLÓGICO	7
2.1 Tectónica.....	7
2.2 Geología y Estructura Regional.....	9
2.3 Geología Local	12
CAPITULO III.....	14

METODOLOGÍA.....	14
3.1 Descripción de la mina	14
3.1.1 Levantamiento topográfico	15
3.2 Levantamiento geológico.....	17
3.2.1 Estudio macroscópico de muestras de roca	17
3.2.2 Cartografía Geológica.....	18
3.3 Estaciones geomecánicas	19
3.3.1 Características de la Matriz Rocosa	20
3.3.2 Características de las Discontinuidades	21
3.4 Clasificaciones geomecánicas.....	24
3.4.1 RQD.....	25
3.4.2 RMR de Bieniawski.....	26
3.4.3 Índice Q de Barton.....	30
3.5 Sostenimientos según clasificaciones geomecánicas	32
3.5.1 Sostenimientos y presiones según Q de Barton.....	33
3.6 Análisis de cuñas.....	38
3.6.1 Resistencia al corte de discontinuidades: Criterio de Barton- Bandis: Software RocData.....	39
3.6.2 Análisis de cuñas mediante el programa UNDWEDGE v3 ...	42
3.6.3 Descripción y características de cuñas.....	43
CAPITULO IV	45
4.1 Caracterización de la mina	45
4.1.1 Levantamiento topográfico	46
4.1.2 Levantamiento Geológico	47

4.2 Estaciones Geomecánicas	57
4.2.1 Estación Geomecánica 1 (EGM1)	57
4.2.2 Estación Geomecánica 2 (EGM2)	66
4.2.3 Estación Geomecánica 3 (EGM3)	74
4.2.4 Estación Geomecánica 4 (EGM4)	82
4.2.5 Estación Geomecánica 5 (EGM5)	90
4.3 Estimación de las necesidades de sostenimiento a partir de Q de Barton	97
4.3.1 Estabilidad en función Vano, D equivalente vs Q de Barton	98
4.4 ANÁLISIS DE CUÑAS EN ESTACIONES GEOMECAÑICAS....	100
4.4.1 Cálculo de la cohesión y ángulo de rozamiento interno residual mediante ROCDATA.....	101
4.4.2 Caracterización y Factor de Seguridad de cuñas	103
4.5 Resumen y análisis de resultados	111

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

Buz.	Buzamiento
C.A.	Compañía Anónima
De	Diámetro Equivalente del Túnel
Dip.	Buzamiento
Dip.Dir.	Dirección de buzamiento
EGMs	Estaciones geomecánicas
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EMIDEL	Ecuadorian Minerals Corporation
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ESR	Excavation Support Ratio
Exc.	Excavación
F	Falla geológica
Fm.	Formación Geológica
FS	Factor de Seguridad
GM.	Grado de Meteorización
INEMIN	Instituto Ecuatoriano de Minería
ISRM	International Society for Rock Mechanics
J	Junta, familia de juntas predominante, principal
j	Junta, familia de juntas minoritaria; junta aleatoria.
JCS	Resistencia a compresión de los labios o paredes de la discontinuidad

JRC	Coeficiente de rugosidad de las superficies de discontinuidades
Ma	Millones de años
MPM	Minera Palmira Minpalca
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NGI	Instituto Geotécnico Noruego
Óx.	Óxidos
R	Resistencia de la roca estimada con martillo de geólogo
RCS	Resistencia a Compresión Simple
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SA	Sociedad Anónima
SJ	Mina San Juan
SRF	Stress Reduction Factor
SPT	Ensayo de Penetración Estándar
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator
v	Versión (Programa informático)
WGS84	Sistema Geodésico Mundial-1984

SIMBOLOGÍA

Ag	Plata
Au	Oro
C	Cohesión
cm	Centímetro
Cu	Cobre
E	Este
Fe	Hierro
Ja	Índice de alteración de las juntas
Jn	Índice de diaclasamiento
Jr	Índice de rugosidad de la juntas
Jw	Factor reductor por presencia de agua en las juntas
Km	Kilómetro
L	Litro
Ln	Longitud real de las diaclasas considerando el efecto escala
L ₀	Longitud de 10 cm para las diaclasas
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
min	Minuto
MN	Mega Newton
Mn	Manganeso
MPa	Mega pascales
N	Norte
Q	Caudal
r	Rebote del esclerómetro en roca

	meteorizada
R	Rebote del esclerómetro en roca sana
S	Sur
ton	Tonelada
W	Oeste
Z	Profundidad
°C	Grados centígrados
γ	Peso específico
λ	Índice de fracturas por metro lineal
ϕ_b	Ángulo de rozamiento básico (Criterio de Barton y Bandis)
ϕ_r	Ángulo de rozamiento residual (Criterio de Barton y Bandis)
φ	Ángulo de rozamiento (Criterio de Mohr-Coulomb)
$\sigma_{ci}; \sigma_c$	Resistencia a compresión uniaxial
σ_n	Esfuerzo normal
σ_w	Esfuerzo Hidrostático
σ_θ	Tensión Tangencial
σ_1	Esfuerzo principal o vertical, presión litostática.
σ_3	Esfuerzo mínimo u horizontal
τ	Esfuerzo tangencial

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Situación geográfica del área de estudio. Provincia de Azuay y el Cantón Ponce Enríquez. Tomado de (Fiallos, 2013).	2
Figura 2: Marco tectónico del Ecuador (Núñez del Arco, 2003).....	8
Figura 3: Corte Idealizado W-E del Ecuador (Lonsdale, 1978).	9
Figura 4: Esquema de levantamiento topográfico espeleológico. (Jordá & Jordá, speleominas, 2012).....	16
Figura 5: Esquema de las características de discontinuidades	23
Figura 6: Ábaco para la valoración de la resistencia de la roca a partir de la resistencia a compresión uniaxial de la roca (Bieniawski, 1989)	28
Figura 7: Ábaco para la puntuación o valoración del RQD (Bieniawski, 1989).....	28
Figura 8: Ábaco para la valoración del espaciamiento medio (Bieniawski, 1989).....	29
Figura 9: Vano o ancho de excavaciones sin sostenimiento frente a calidad del macizo rocoso (índice Q). Tomado de (Jordá, López, & Romero, in litt). 35	
Figura 10: Factor de seguridad estimado para excavaciones subterráneas sin sostenimiento, en función del ancho del hueco y la calidad del macizo rocoso, según Q y RMR (Bieniawski, 1989), (Houghton & Stacey, 1980).	36
Figura 11: Ábaco para estimar la estabilidad de la excavación a partir del Índice Q, el Vano sin sostener (m) y el Factor de Seguridad. Según el autor.	37
Figura 12: Ábaco para estimar los distintos sostenimientos posibles a partir de la relación D equivalente e Índice Q (Grimstad & Barton, 1993).....	38
Figura 13: Plantilla para la estimación de JRC_0 en una escala de 10 cm. Se aplica también al parámetro JCS_0 (Barton & Choubey, 1977).	40
Figura 14: Modelo 3D de la mina San Juan obtenido con el programa de espeleología VISUAL TOPO. Según el autor.....	47
Figura 15: Diagrama en rosa de todas las discontinuidades medidas en la	

Mina San Juan. Programa DIPS v5. Según el autor.....	57
Figura 16: Estereograma de familia de juntas. EGM1. Según el autor.	60
Figura 17: Estimación de RCS (RMR1) para la EGM1. Según el autor.	62
Figura 18: Valoración RQD (RMR2) para la EGM1. Según el autor.	62
Figura 19: Valoración del espaciado medio (RMR3) en la EGM1. Según el autor.....	63
Figura 20: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM2. Según el autor.....	68
Figura 21: Valoración de RCS (RMR1) para la EGM2. Según el autor.....	70
Figura 22: Valoración del RQD (RMR2) para la EGM2. Según el autor.	70
Figura 23: Valoración del espaciado medio (RMR3) en la EGM2. Según el autor.....	71
Figura 24: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM3. Según el autor.....	76
Figura 25: Valoración del RCS (RMR1) para la EGM3. Según el autor.	78
Figura 26: Valoración RQD (RMR3) para la EGM3. Según el autor.	78
Figura 27: Valoración espaciado medio (RMR3) de la EGM3. Según el autor.	79
Figura 28: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM4. Según el autor.....	84
Figura 29: Valoración del RCS (RMR1) para la EGM4. Según el autor.	86
Figura 30: Valoración del RQD (RMR2) para la EGM4. Según el autor.	86
Figura 31: Valoración del espaciado medio (RMR3) para la EGM4. Según el autor.....	87
Figura 32: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM4. Según el autor.....	92
Figura 33: Valoración de RCS (RMR1) para la EGM5. Según el autor.....	93
Figura 34: Valoración del RQD (RMR2) para la EGM5. Según el autor.	94
Figura 35: Valoración del espaciado medio (RMR3) para la EGM5. Según el autor.....	94

Figura 36: Grado de estabilidad para cada estación geomecánica (vano vs Q)	98
Figura 37: Representación de las estaciones geomecánicas (D equivalente vs Q)	99
Figura 38: Red estereográfica con los datos estructurales de las juntas y eje del túnel en la EGM1. Según autor.	103
Figura 39: Red estereográfica con los datos estructurales de las juntas y eje del túnel en la EGM2. Según el autor.	105
Figura 40: Red estereográfica con los datos estructurales de las juntas y eje del túnel en la EGM3. Según el autor.	107
Figura 41: Red estereográfica con los datos estructurales y el eje del túnel en la EGM4.	108
Figura 42: Red estereográfica con los datos estructurales y el eje del túnel en la EGM5.	110

INDICE DE TABLAS

Tabla I: Grado de meteorización de la matriz rocosa. (ISRM, 1978).	20
Tabla II: Estimación de la Resistencia a Compresión Simple con el martillo de geólogo. (ISRM, 1978).....	21
Tabla III: Calidad del Macizo rocoso en función del Índice RQD (Deere, 1967)	26
Tabla IV: Valoración del macizo rocoso según RMR (Bieniawski, 1989).....	30
Tabla V: Calidad del Macizo rocoso en función del Índice Q (Jordá L., in litt.)	31
Tabla VI: Índice RQD para valoración del Índice Q (Cornejo & Salvador, 1996).....	32
Tabla VII: Valores del índice ESR (traducido de NGI, 2013)	33
Tabla VIII: Valoración del RMR4 para la EGM1. Según el autor.....	63
Tabla IX: Valoración del RMR4 para la EGM2. Según el autor.	71
Tabla X: Valoración del RMR4 para la EGM3. Según el autor.	79
Tabla XI: Valoración de RMR4 para la EGM4. Según el autor.	87
Tabla XII: Valoración del RMR4 para la EGM5. Según el autor.	95
Tabla XIII: Ancho de la excavación e Índice Q para cada EGM. Según el autor.....	98
Tabla XIV: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM1.	104
Tabla XV: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación	

geomecánica 1. Según el autor.	104
Tabla XVI: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM2. Según el autor.	105
Tabla XVII: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 187/35. Según el autor.	106
Tabla XVIII: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 340/45. Según el autor.	106
Tabla XIX: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM3. Según el autor.	107
Tabla XX: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 3. Según el autor.	108
Tabla XXI: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM4. Según el autor.	109
Tabla XXII: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 4. Según el autor.	109
Tabla XXIII: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM5. Según el autor.	110
Tabla XXIV: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 331/88. Según el autor.	111
Tabla XXV: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 152/86. Según el autor.	111

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 Introducción

En este trabajo fin de carrera se ha llevado a cabo el levantamiento geológico, estructural y geomecánico en la mina subterránea San Juan, situada en el campo minero Ponce Enríquez (Provincia de Azuay).

La mina San Juan pertenece a la categoría de minería artesanal, caracterizándose por ser una actividad de sustento que se efectúa mediante trabajo individual, familiar o asociativo en la cual se emplean herramientas y maquinaria básica destinadas a la obtención de minerales cuya comercialización en general sólo permite cubrir las necesidades básicas de la persona o grupo familiar que las realiza.

Se ha llevado a cabo en la mina San Juan un estudio geológico y

anual es de 24 a 26°C, con unas altitudes situadas entre los 300 y 1000 msnm.

En cuanto a la vegetación, se desarrolla un importante bosque tropical húmedo en las partes altas, dominando el bosque tropical seco en las altitudes más bajas.

1.1.3 Geografía humana y situación socio-económica

Según el censo de población del 2010, el Cantón Ponce Enríquez tiene una población de 21,998 habitantes, de los cuales el 55,51% son hombres (Erraez, 2014)

La minería es la actividad económica preferente del cantón (35% de la población), dedicándose sobre todo a la extracción subterránea de Au y Ag. Le siguen las actividades como la agricultura (32%), dedicada al cultivo de café, cacao, babano, yuca, maíz y frutas; y el comercio, con desarrollo de hoteles y restaurantes (Carrillo & Astudillo, 2008-2009)

Otras actividades representativas son el transporte, la educación y los servicios domésticos.

1.1.4 Antecedentes

Los primeros trabajos de exploración fueron realizados por Coperfields Mining Corporation (1973-1979), analizando las

características geoquímicas de sedimentos fluviales y suelos.

Estudios de gran importancia fueron los de Guisamano y Duran (1987), y Piedra (1988), centrándose en analizar las mineralizaciones, métodos óptimos de beneficios e EIA. También destaca las investigaciones geológico-mineras realizadas por la Misión Belga e INEMIN (1994-1995).

En la última década del siglo pasado, se llevaron a cabo exploraciones y cálculo de reservas minerales e inicio de explotación de los cuerpos mineralizados de Gaby y Papa Grande por MPM, Newmont Overseas Exploration, Gribipe Panamá S.A. y EMIDEL C.A.

En el año 2000, se publicó “Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador”, y dirigido por el Ministerio de Energía y Minas (Coordinador A. Bermeo), y centrándose en la estratigrafía, estructura y mineralizaciones del campo mineral Ponce Enríquez.

Por último, en los últimos años universidades del país tales como la ESPOL, la ESPOCH y la Universidad de Cuenca han llevado a cabo proyectos de investigación y tesis de grado, cuyo interés se dirige a la geología, minería y geomecánica de distintas minas subterráneas situadas en el área de estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar un estudio geológico-estructural integrado de la mina San Juan para evaluar la calidad del macizo rocoso en el que se encuentra la labor minera San Juan en el Distrito Minero de Ponce Enríquez, mediante el análisis geológico, estructural y geomecánico, así como determinar la estabilidad estructural de la labor subterránea por medio de distintos programas informáticos (VISUAL TOPO, DIPS, ROCDATA y UNDWEDGE, de la casa Rocscience).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una cartografía de manera sistemática del macizo rocoso, determinando y sistematizando todas las discontinuidades, tales como fallas, diaclasas y vetas a lo largo de la labor minera subterránea de la Mina San Juan.
- Analizar las propiedades del macizo rocoso, tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades.
- Describir distintas muestras de roca y de mineralizaciones tomadas a lo largo de la galería, para así llevar a cabo un correcto levantamiento geológico-minero.

- Realizar una cartografía geológica identificando litologías y estructuras, para posteriormente, llevar a cabo el consecuente análisis geológico-estructural del área de estudio.
- Realizar el análisis de estabilidad del macizo rocoso así como estimar la carga vertical a la cual se encuentra sometido.
- Determinar los valores empíricos de cohesión y ángulo de rozamiento interno para el macizo rocoso mediante la aplicación del software ROCDATA v3.
- Presentar a partir de lo anteriormente expuesto recomendaciones sobre los distintos sostenimientos y estructuras de estabilidad a llevar a cabo.

CAPITULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 TECTÓNICA

Ecuador se encuentra en el límite convergente entre la placa continental Sudamericana y la placa oceánica de Nazca, la cual con movimiento W-E es subducida por dicha placa Sudamericana (Figura 2). Este proceso de subducción ha dado origen a la formación del arco magmático andino (70 Ma.), así como también importante volcanismo, sismicidad y cuencas asociadas a subducción: antearco (cuencas de Esmeraldas, Manabí y Progreso-costa ecuatoriana), intraarco (cuencas interandinas del Chota, Guayabamba, etc) y transarco (cuenca Oriente), las cuales se encuentran rellenas tanto por sedimentos continentales como marinos.

El arco magmático viene representado por rocas mayoritariamente andesíticas y de composición intermedia a ácida, con una dirección de

NNE-SSW, separándose geográficamente en la Cordillera Occidental y la Cordillera Real. Así mismo, la sierra andina se encuentra al norte y al sur de Ecuador fuertemente metamorfizada y cabalgada. (Figura 3)

En cuanto a la geodinámica regional, junto a la subducción de Nazca aparece la dorsal submarina asísmica de Carnegie, y con dirección W-E, formada por un punto caliente en la situación geográfica actual de las Islas Galápagos (15 Ma.). Dicha cordillera submarina es subducida junto con Nazca, dando lugar a un importante levantamiento y fragmentación de la corteza continental.

Por este fenómeno y características de subducción, los esfuerzos que son aplicados a lo largo del Ecuador tienen una dirección de W-E, dando lugar a estructuras compresivas, tensionales y de cizalla con direcciones N-S y NE-SW.

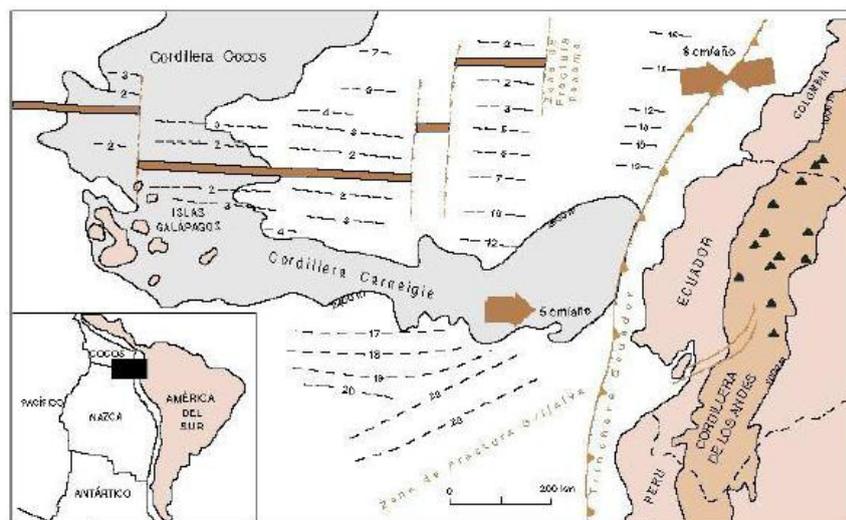


Figura 2: Marco tectónico del Ecuador (Núñez del Arco, 2003)

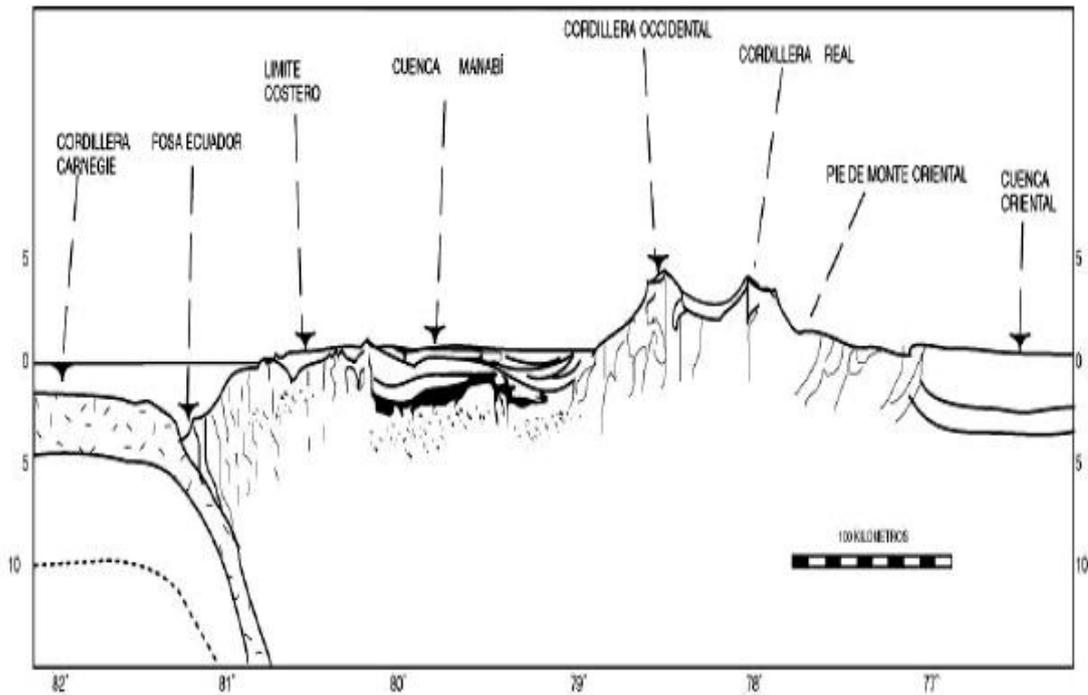


Figura 3: Corte Idealizado W-E del Ecuador (Lonsdale, 1978).

2.2 Geología y Estructura Regional

El Distrito minero de Ponce Enríquez se encuentra ubicado dentro de la Unidad Pallatanga (Cretácico Medio Temprano, Pre-Senosense), la cual está limitada por fallas provenientes del occidente de la Cordillera Occidental, junto con otras formaciones que van de edades cretácicas a cuaternarias. De muro a techo son:

La Unidad Pallatanga está comprendida por basaltos toleíticos de carácter lávico, masivo y almohadillado y doleritas. También pueden aparecer rocas ultramáficas y metamórficas de grado medio, tales como esquistos y gneises. Esta unidad se encuentra discordantemente con el Grupo Saraguro (Duque, 2000) y (Vallejo et

al, 2009)

La Fm. Yunguilla (Cretácico Superior, Maastrichtiense), es una secuencia de abanico turbidítico definido por una serie de limolitas masivas, areniscas cuarzo feldespáticas y cuarzoarenitas (Duque, 2000).

La Fm. Macuchi (Paleoceno-Eoceno Medio), en la cual se encuentra la Mina San Juan, comprende un conjunto de areniscas volcánicas, limolitas, tobas y lavas andesíticas y basáltico-andesíticas. Las lavas presentan texturas desde porfídicas con fenocristales de plagioclasa hasta afaníticas. Representa el basamento de un arco de islas (Duque, 2000).

El Grupo Saraguro (Eoceno Medio Tardío-Mioceno Inferior) consiste en un conjunto de rocas volcánicas de carácter subaéreo y de composición generalmente intermedia a ácida del tipo calcoalcalina (Duque, 2000).

Estas rocas encajantes han sido intruidas por distintos stocks de composición cuarzodioríticas a tonalíticas, acompañados por otros cuerpos elongados y diques de la misma composición; algunos de estos cuerpos son Gaby, Papa Grande y Tama, desarrollándose mineralizaciones tipo brechas-pórfido de Au-Cu-Mo. Estos cuerpos intrusivos se iniciaron a partir del Mioceno Inferior (20-19 Ma),

continuando la intrusión hasta el Mioceno Superior (9 Ma).

Este proceso de emplazamiento es resultado de los esfuerzos pre-miocénicos y miocénicos, es decir, a partir de los 25 Ma. de dirección NE-E y producidos por el fenómeno de subducción.

Por último, el cuaternario, representado por depósitos aluviales y coluvionales, cuyas áreas fuentes de sedimentación son los cuerpos rocosos anteriormente descritos.

En cuanto a la geología estructural (Mapa 1, ANEXO3), el área de Ponce Enríquez se encuentra fracturada en un conjunto de fallas o sistema de fallas principales cenozoicas: al NE la falla Río Tenguel al SW la falla Margarita de la hoja cartográfica, respectivamente, ambas con direcciones NW-SE y con planos de falla subverticales. Junto con este sistema de fallas (Sistema de Fallas A) aparece un conjunto de fallas verticales con dirección W-E y NE-SW en los que se observa como la falla Margarita corta y desplaza con un componente horizontal dextral a una de estas fallas (parte inferior derecha del mapa estructural). Así mismo, este sistema de fallas (Sistema de Fallas B) aparece asociado con las intrusiones granodioríticas de la zona, por lo que se deduce que el emplazamiento de los intrusivos daría lugar a dicha fracturación.

El esfuerzo dirigido con dirección E-W, por el fenómeno de subducción, daría lugar, entonces, a estructuras compresivas, tales como fallas inversas y cabalgamientos, como son la Falla Río Tenguel y Falla Margarita. El emplazamiento anteriormente mencionado desarrollaría una fase de fracturamiento extensional con formación de mineralizaciones con orientaciones WNW-ESE, NW-SE y N-S, es decir, las fallas que en un principio se trataron de estructuras compresivas, fueron reactivadas posteriormente durante dicho episodio extensional, como fallas normales (PRODEMINCA-Bermeo, 2000)

2.3 Geología Local

La mina San Juan (Mapa 2, ANEXO 3), cuya explotación tiene como interés la mineralización de Au y sus respectivas asociaciones, se encuentra ubicada dentro de la formación Macuchi (Paleoceno-Eoceno Medio), la cual consiste, básicamente, en esta ubicación, en andesitas y andesitas basálticas. Las primeras se caracterizan por presentar una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa milimétricos angulosos, y sin meteorizar, separándose así dos tipos de andesitas, unas con fenocristales de plagioclasa centimétricos y otras con plagioclasas milimétricas. Las andesitas basálticas presentan, en cambio, una textura completamente afanítica y oscura

sin fenocristales. Los tres tipos de roca tienen una coloración oscura y verdosa.

Dentro de la mina, se han observado las litologías anteriormente mencionadas junto con rocas de falla compuestas por materiales arcillosos-arenosos situados entre los planos de falla (F1). A mitad de la excavación, se ha encontrado, de manera concordante a una falla normal (F4), un cuerpo serpentínico, es decir, un basalto que ha sufrido un metamorfismo hidrotermal metasomático.

Otros cuerpos rocosos que afloran en la zona adyacente al área son los depósitos areniscosos y limolíticos de la Fm. Yunguilla (Cretácico Superior) y los sedimentos aluviales y coluvionales cuaternarios.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Descripción de la mina

En un estudio integrado geológico-geomecánico de galerías mineras, es importante la esquematización del área en cuestión, en este caso de la Mina San Juan. Para su descripción, la mina se separa en zonas-áreas geomecánicas, donde se levantarán estaciones geomecánicas usando estadillos normalizados (ANEXOS 4).

Para describir de manera rápida y óptima una galería minera, así como decidir donde llevar a cabo las estaciones geomecánicas, se deben representar los siguientes aspectos:

- Dirección de la galería, teniendo en cuenta el punto de origen, es decir, un punto base inicial con respecto a la bocamina. En la bocamina, ya se cartografía la dirección de la propia galería.
- Sentido de avance.

- Dimensiones: anchura, altura y forma, indicando los posibles materiales de los hastiales, sostenimientos ya existentes, etc.
- Orientación de las discontinuidades (juntas, fallas, vetas, etc) con respecto a la excavación.
- Proximidad de otras galerías a la excavación de interés.

3.1.1 Levantamiento topográfico

Para llevar a cabo el levantamiento topográfico, se usó la metodología de estudio de cuevas (Figura 4), es decir, la de tipo espeleológico. Para ello se utilizaron las siguientes herramientas:

- Distanciómetro láser tipo Stanley (rango de medición 0,1-30 m., precisión 2 mm.)
- Brújula tipo Brunton.

El procedimiento consiste en tomar como referencia a una persona en el punto topográfico siguiente estando ambos de pie y considerando una zona de miras en ambas personas que den una misma altura.

- Se miden con el láser la distancia a las paredes desde el centro de la galería o punto topográfico.
- Se mide con láser la altura desde el punto topográfico

dado desde el suelo hasta el techo.

- Se mide la distancia entre dos puntos topográficos consecutivos.
- Se lleva a cabo un croquis o esquema explicativo de los distintos puntos topográficos, en los cuales se indicará posteriormente distintas características geológicas (litologías, estructuras, etc), características propias de la excavación (forma del techo y hastiales, etc) y EGMs.

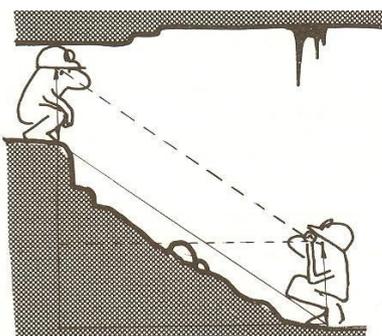


Figura 4: Esquema de levantamiento topográfico espeleológico. (Jordá & Jordá, speleominas, 2012)

Posteriormente, los datos topográficos tomados (ANEXOS 6) en cada punto topográfico en la labor minera, tales como la dirección, ancho (izquierda y derecha), alto y distancias entre puntos, se introducen en el programa informático VISUAL TOPO v4.7. Este software ha sido desarrollado por el espeleólogo francés Eric David, siendo un programa de libre

acceso en internet.

Este programa nos permite obtener distintos modelos topográficos de la mina San Juan: en planta, en alzado, en 3D.

Es este último modelo el que presenta mayor interés en nuestro estudio.

3.2 Levantamiento geológico

Para el levantamiento geológico de la mina San Juan se ha utilizado primeramente el mapa geológico 1:1.000.000 de Ecuador de Baldock (1982), para conocer la geología regional del área de estudio.

Posteriormente se analizó la estratigrafía y geología estructural del mapa geológico del Distrito Minero Azuay- Ponce Enríquez 1:250000. Además de la bibliografía utilizada para estos fines, se llevó a cabo una descripción macroscópica de muestras de roca, junto con un levantamiento geológico del área y de la mina (Mapas 2 y 3.ANEXOS 3).

3.2.1 Estudio macroscópico de muestras de roca

Se han tomado aleatoriamente hasta ocho muestras de roca de diferentes tamaños, entre 10 y 30 cm; con pesos que varían desde 1,5 a 4 kg. En todas ellas se ha llevado a

cabo una descripción de:

- Densidad relativa-Dureza de la roca.
- Tipo de fractura.
- Color y tipo de textura petrográfica.
- Mineralizaciones encontradas.
- Definición de la roca.

Cada muestra viene descrita en el Capítulo IV-Resultados.

3.2.2 Cartografía Geológica

Este apartado se llevó a cabo en conjunto con el levantamiento topográfico. En cada punto topográfico, se observaba de manera general la geología. Esta cartografía permitió realizar una hoja cartográfica de la mina 1:2000, en la que se distinguió las siguientes características geológicas:

- Litologías, diferenciando los distintos tipos de rocas y texturas.
- Estructuras geológicas, tales como fallas, diaclasas y otras discontinuidades, junto con sus orientaciones en función de la dirección de buzamiento y buzamiento (0-360/0-90), respectivamente.
- Contactos entre distintas litologías.

3.3 Estaciones geomecánicas

Según (Jordá, in litt.), se le denomina estación geomecánica a un conjunto ordenado de observaciones geomecánicas (orientación de juntas, litología, etc.) realizadas en un entorno con objeto de valorar las características geomecánicas de un macizo rocoso. En general, se observan discontinuidades y litología en un entorno de unos 5 - 10 m del punto en el que investigamos. Se establecen tantas estaciones geomecánicas como zonas geomecánicas diferenciadas o tipologías constructivas (sostenimientos, etc.) se reconozcan claramente.

Durante el levantamiento de una estación geomecánica en la mina o túnel han de utilizarse unos estadillos normalizados (ANEXOS 4).

En sesiones de gabinete, y a partir de los datos de campo tomados anteriormente, se determinarán las clasificaciones geomecánicas de interés en este campo: el RQD, el RMR y Q, los parámetros resistentes de las discontinuidades y los parámetros tenso-deformacionales y resistentes del macizo rocoso. Con los datos de la estación geomecánica, se realizará, a posteriori, la selección del tipo de sostenimiento según el índice Q de Barton, además del estudio empírico de cuñas subterráneas.

3.3.1 Características de la Matriz Rocosa

La matriz rocosa se considera, a escala de afloramiento, como un material homogéneo y continuo, es decir, isótropo y lineal, de tal manera que se llevarán a cabo en ella todos los ensayos, que permitan la caracterización y determinación de todas las propiedades que definan al macizo rocoso. Para la matriz rocosa, los aspectos que deben describirse en campo son (González de Vallejo, 2002):

- Identificación geológica: composición mineralógica, forma-granulometría de los granos minerales, color y dureza.
- Grado de meteorización. Se estima visualmente según ISRM (Tabla I)

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN	GRADO
Fresco	No se aprecian signos visibles de meteorización. Algunas decoloraciones en discontinuidades	I
Ligeramente meteorizado	La decoloración indica la meteorización del material rocoso y de las superficies de las discontinuidades. Todo el material rocoso puede estar descolorido por efecto de la meteorización, pudiendo haber zonas débiles externamente.	II
Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del material esta descompuesto o desintegrado en suelo. Hay zonas de roca sana o descolorida común en trabado discontinuo o como fragmentos aislados.	III
Muy Meteorizado	Más de la mitad del material rocoso está descompuesto o desintegrado en suelo. Hay zonas de roca sana o descolorida común en trabado discontinuo o como fragmentos aislados.	IV
Completamente meteorizado	Todo el material rocoso está compuesto desintegrado y ha dado paso a un suelo. La estructura original del macizo rocoso esta sensiblemente intacta.	V
Suelo residual	Toda la roca se ha convertido en suelo, la estructura y la fábrica del macizo rocoso han desaparecido	VI

Tabla I: Grado de meteorización de la matriz rocosa. (ISRM, 1978).

- Resistencia a compresión simple (Tabla 2): Se estima en campo por medio del martillo de geólogo o con el ensayo in situ del martillo Schmidt.

GRADO	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN	VALOR (MPa)
R1	Roca muy débil	Deleznable con el pico del martillo y desconchable con una navaja	1-5
R2	Roca débil	Se desconcha con dificultad con navaja. Marcas poco profundas con la punta del martillo	5-25
R3	Roca media	No se raya ni se desconcha con la navaja. Las muestras se rompen de un solo golpe fuerte con el martillo	25-50
R4	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra	50-100
R5	Roca muy dura	Se necesitan muchos golpes con el martillo para romper la muestra	100-250
R6	Roca extremadamente dura	Solo rompen esquirlas de la muestra con el martillo	>250

Tabla II: Estimación de la Resistencia a Compresión Simple con el martillo de geólogo. (ISRM, 1978)

A partir del grado IV, la matriz rocosa empieza a comportarse geotécnicamente como un suelo (Jordá, in litt.)

3.3.2 Características de las Discontinuidades

Lo primero será distinguir los distintos tipos de discontinuidades entre las que hay que diferenciar los planos de estratificación, fracturas, lineaciones o foliaciones tectónicas y otras estructuras geológicas.

Se han distinguido tanto fallas como diaclasas. En las primeras se observa un movimiento relativo entre los dos bloques de roca separados, mientras que en las diaclasas o juntas, el desplazamiento es nulo.

Serán las discontinuidades y familias de éstas interés en las estaciones geomecánicas.

Las características y parámetros geométricos (Figura 5) de las discontinuidades y familias de discontinuidades a tomar en cada una de las estaciones geomecánicas son los siguientes:

- Resistencia a compresión simple
- Espaciado, a partir del cual se calcula el RQD del macizo rocoso.
- Continuidad o persistencia.
- Rugosidad y JRC.
- Apertura
- Relleno

- Presencia de Agua.

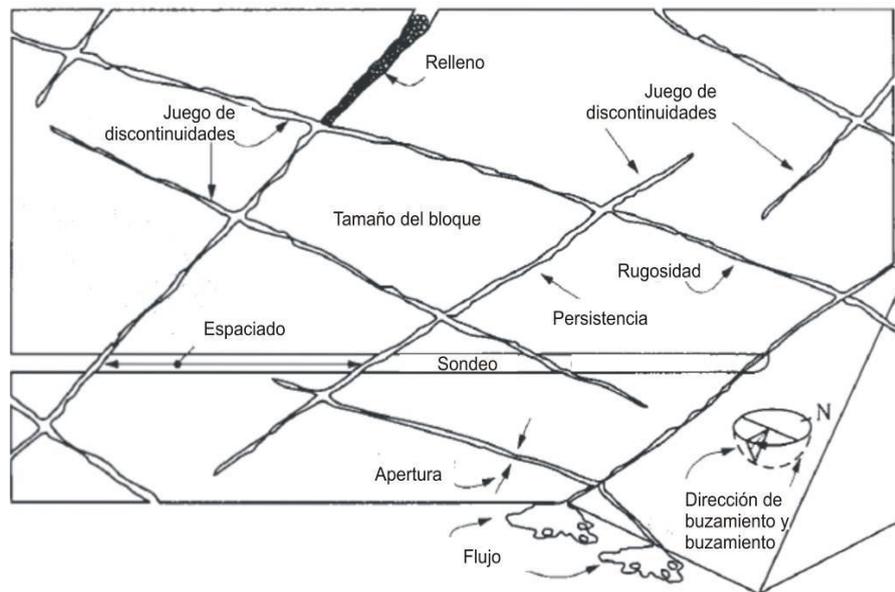


Figura 5: Esquema de las características de discontinuidades

3.3.2.1 Proyección estereográfica: Software DIPS

Se utilizará la red estereográfica polar equiangular, para la descripción espacial y estadística de fallas y familias de diaclasas y juntas. Para ello se utilizará el programa informático DIPS v5.

Esta herramienta digital, de la casa RocScience, permite representar en dicha red estereográfica polar, todos los planos de las juntas encontradas a lo largo de cada estación geomecánica levantada (midiendo para cada una de ellas, su dirección de buzamiento y

buzamiento), y representar, posteriormente, dichas juntas como planos, como polos y como nube de polos. A continuación, se lleva a cabo un análisis estadístico que permite deducir que familias o clases de familias son las más abundantes en el macizo rocoso, además de saber su grado de estabilidad-grado de peligrosidad y utilizar dichas estimaciones para el análisis geomecánico en cuestión.

3.4 Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas (en inglés “Rock Mass Classification”) tienen por objeto caracterizar ingenierilmente un determinado macizo rocoso y evaluar unas necesidades de sostenimiento y estabilidad en función de una serie de parámetros a los que se les asigna un cierto valor. Una vez puntuado el macizo, se clasifica en una categoría de entre varias existentes en función del rango de puntos. Es crucial considerar que cada una de estas categorías se puede traducir en una serie de recomendaciones sobre longitud de pase, tiempo de estabilidad de los vanos, necesidades y tipos de sostenimiento, etc (Jordá, in litt.)

A su vez, las clasificaciones geomecánicas se llevarán a cabo en cada una de las estaciones geomecánicas levantadas en

afloramientos o en la zona de interés de la mina que se encuentra en estudio.

3.4.1 RQD

Propuesta por Deere y colaboradores (1967), se basa en clasificar el terreno únicamente por el valor del “Rock Quality Designation” o RQD, a partir de sondeos de testigos (Jordá, in litt.)

Como en este proyecto no se dispone de testigos de sondeos, se utilizará la siguiente metodología:

- Índice de Fracturas por metro lineal (λ) (Priest & Hudson, 1981); viene expresado por la siguiente expresión:

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

Donde λ es la frecuencia de discontinuidades o número de juntas por metro lineal. La metodología consiste en contar todas aquellas discontinuidades que intersecten la recta métrica hecha con una cinta métrica. Si se hacen medidas en distintas direcciones y por tanto, se obtienen distintos λ , se llevará a cabo una media aritmética de dichas medidas.

La calidad del macizo rocoso en función del RQD (Deere, 1967), viene dado por la tabla 3:

RQD%	Calidad Macizo Rocoso
<25%	Muy Mala
25-50%	Mala
50-75%	Media
75-90%	Buena
>90%	Muy Buena

Tabla III: Calidad del Macizo rocoso en función del Índice RQD (Deere, 1967)

3.4.2 RMR de Bieniawski

El sistema de clasificación “Rock Mass Rating”, conocido como RMR fue desarrollado por Bieniawski (1972-73, modificado en 1976, 1979 y 1989). Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de los cinco parámetros del terreno siguientes:

- 1) Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- 2) Grado de fracturamiento según el Índice RQD
- 3) El espaciamiento entre discontinuidades.
- 4) Estado de las diaclasas: en función de la persistencia, apertura, rugosidad, relleno y grado

de alteración de las juntas.

5) Condiciones hidrogeológicas.

6) El estado-orientación de las discontinuidades respecto a la excavación.

Para su aplicación, el macizo se dividió según la dirección que tiene la labor minera y a las características geológicas dadas, en estaciones geomecánicas. Posteriormente, se dispuso de llevar a cabo el puntaje de los anteriores parámetros señalados según unos datos ya normalizados (ANEXOS 1). La suma de estos parámetros se expresan mediante $RMR=0-100$, dándole una clase y calidad a la roca (ANEXO 1a-b-c)

El RMR, como se dijo anteriormente, es la suma de los parámetros individuales RMR1, RMR2, RMR3, RMR4 y RMR5, los cuales, definen lo que se conoce como RMR_{89} -básico (ANEXO 1), es decir, aquel RMR en el que no se ha llevado a cabo ninguna corrección al no tener en cuenta la orientación de las discontinuidades con respecto a la obra civil dada (Jordá, in litt.)

Entonces:

RMR1: Resistencia Uniaxial de la Roca

Tiene una valoración máxima de 15 puntos. Se estima con el martillo de geólogo o con el esclerómetro o martillo Schimdt.

La valoración del RMR1 se obtiene con la siguiente figura:

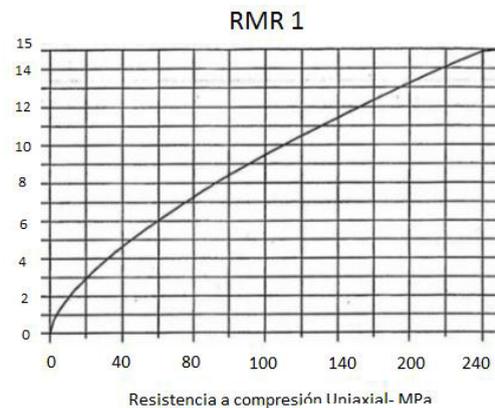


Figura 6: Ábaco para la valoración de la resistencia de la roca a partir de la resistencia a compresión uniaxial de la roca (Bieniawski, 1989)

RMR2: RQD%

Tiene una valoración máxima de 20. El RQD se calcula con la fórmula propuesta anteriormente de Priest y Hudson (1981). El valor de RMR2 se obtiene con la siguiente correlación:

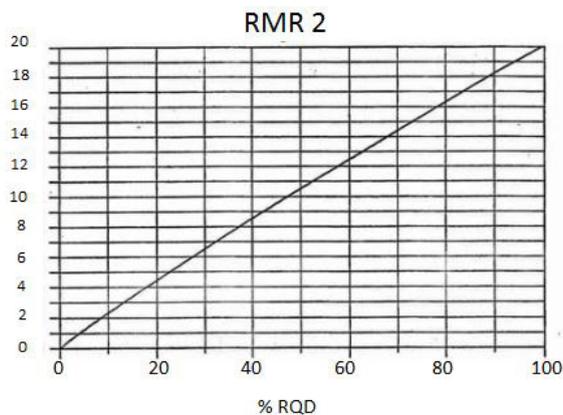


Figura 7: Ábaco para la puntuación o valoración del RQD (Bieniawski, 1989)

RMR3: Espaciado de las juntas

Con un valor máximo de 20, es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de la misma familia. El RMR3 se estima a partir de la siguiente figura:

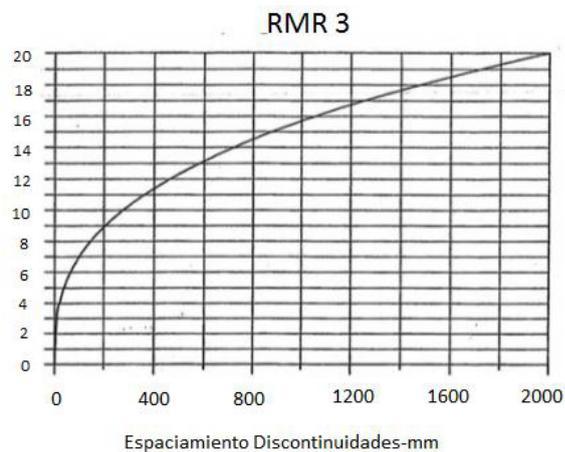


Figura 8: Ábaco para la valoración del espaciamiento medio (Bieniawski, 1989)

RMR4: Estado de las juntas

Tiene una valoración máxima de 30 puntos. Los parámetros que se estiman en este punto, vienen indicados en la tabla 1.b (Anexo1).

RMR5: Presencia de agua

Tiene un valor máximo de 15 (1a, ANEXO 1).

Como ya se mencionó anteriormente, estos cinco parámetros conforman el RMRbásico, el cual, teniendo en cuenta la orientación de las discontinuidades con respecto a la obra civil

dada (RMR6, 1c y 1d, ANEXO 1), hay que corregir. A partir de esto, se le denomina RMRcorregido. Viene dado por:

$$RMR_{\text{corregido}} = RMR_{\text{básico}} - RMR_6$$

Así se obtiene la calidad del macizo rocoso según el RMR (Tabla IV).

CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0

Tabla IV: Valoración del macizo rocoso según RMR (Bieniawski, 1989)

3.4.3 Índice Q de Barton

Este sistema de clasificación, desarrolla por Barton y otros entre los años 1971 y 1974; y se basa en la evaluación cuantitativa de los siguientes parámetros:

- RQD
- Jn o índice de diaclasado: indica grado de fracturación del macizo rocoso.
- Jr o índice de rugosidad de las discontinuidades.
- Ja o índice de alteración de las discontinuidades.
- Jw o coeficiente reductor por presencia de agua.

- SRF (Stress Reduction Factor) o coeficiente de influencia del estado tensional al que se encuentra el macizo rocoso.

Por tanto, el RQD junto con J_n describen el tamaño de bloques, mientras que J_r y J_a definen la resistencia al corte entre los bloques. Por último, los parámetros J_w y SRF estiman la influencia del estado tensional del macizo.

A partir de las tablas normalizadas (ANEXOS 2), con las cuales se puntúa a cada parámetro anteriormente explicado, se calcula el índice Q a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

La valoración de la roca según este índice es exponencial, viniendo indicado la siguiente tabla:

INTERVALO	DESCRIPCIÓN O CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO
0,001-0,01	Roca excepcionalmente mal
0,01-01	Roca extremadamente mala
0,1-1	Roca muy mala
1-4	Roca mala
4-10	Roca media
10-40	Roca Buena
40-100	Roca muy Buena
100-400	Roca extremadamente buena
400-1000	Roca excepcionalmente buena

Tabla V: Calidad del Macizo rocoso en función del Índice Q (Jordá L., in litt.)

Se procede entonces a obtener la valoración de cada uno de los parámetros geomecánicos; en primer caso, el RQD:

Calidad Macizo Rocoso		%RQD
A	Muy Mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-75
D	Buena	75-90
E	Excelente	90-100
Notas: Cuando se obtienen valores del RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el Índice Q. Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc, tienen suficiente precisión.		

Tabla VI: Índice RQD para valoración del Índice Q (Cornejo & Salvador, 1996)

Posteriormente, se da la valoración a los parámetros J_n , J_a , J_r , J_w y SRF (ANEXO 2). Para estimar J_n , se debe llevar a cabo croquis esquemáticos o una identificación correcta mediante DIPS v5 de cada familia de diaclasas.

3.5 Sostenimientos según clasificaciones geomecánicas

Los distintos sostenimientos que se podrán aplicar en la labor minera en cuestión se deducen a partir de distintos criterios:

- Q de Barton (1993)
- Bieniawski, (1989)

Será el primer criterio el que se utilizará en este proyecto de investigación.

3.5.1 Sostenimientos y presiones según Q de Barton

En este criterio, para el cálculo y estimación de los sostenimientos, se deben estimar los siguientes parámetros geomecánicos:

- De o Diámetro Equivalente del túnel, según la siguiente expresión:

$$De = \frac{\text{anchura, diámetro o altura (m)}}{ESR}$$

- ESR o “Excavation Support Ratio”, que es un factor dependiente del tipo de excavación. Se estima a partir de la tabla VII.

Tipo de Excavación		ESR
A	Labores mineras de carácter temporal	3-5
B	Pozos verticales: -Sección circular -Sección rectangular/cuadrada	2,5 2
C	Huecos mineros permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas, de suministro de agua, túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones	1,6
D	Túneles menores de carretera y ferrocarril, chimeneas de equilibrio, túneles de acceso, colectores	1,3
E	Centrales eléctricas subterráneas, cámaras de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles importantes de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles	1
F	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas	0,8
G	Cavernas muy importantes y huecos subterráneos con una duración de vida larga, ~ 100 años o sin acceso para mantenimiento	0,5

Tabla VII: Valores del índice ESR (traducido de NGI, 2013)

ESTABILIDAD f(VANO.ANCHO GALERÍA)

Los sostenimientos o el grado de estabilidad a calcular en cada estación geomecánica se pueden obtener mediante los anteriores parámetros señalados, tanto de manera separada como en combinación.

En el primer caso, se puede deducir el grado de estabilidad de una excavación u obra subterránea a partir de la relación directa entre vano u ancho de la excavación (en m.) sin sostener y el índice Q (Figura 9).

En el segundo, caso, se deduce la estabilidad de la excavación o mina a partir de combinar la relación directa de vano sin sostener en m con el Índice RMR-Índice Q y un factor de seguridad estimado para aquellas excavaciones que no requieran sostenimientos (Figura 10).

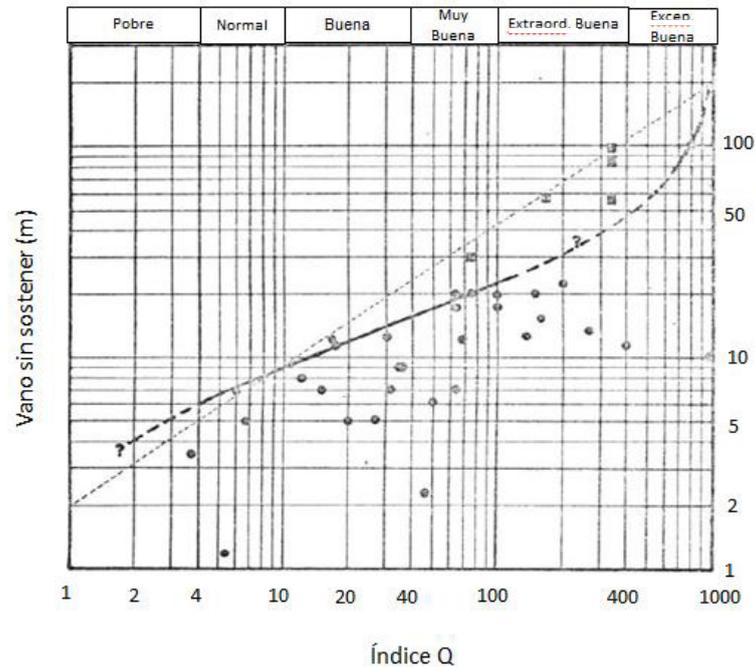


Figura 9: Vano o ancho de excavaciones sin sostenimiento frente a calidad del macizo rocoso (índice Q). Tomado de (Jordá, López, & Romero, in litt)

Los círculos representan excavaciones hechas por el hombre y que no tienen sostenimiento alguno. Los cuadrados representan 5 casos de huecos naturales, de las cuevas de Carlsbad en Nuevo México (USA). La envolvente curva es una estimación del máximo vano de diseño para excavaciones permanentes hechas por el hombre, mientras que la línea de puntos englobaría además las cuevas naturales (Jordá, López, & Romero, in litt).

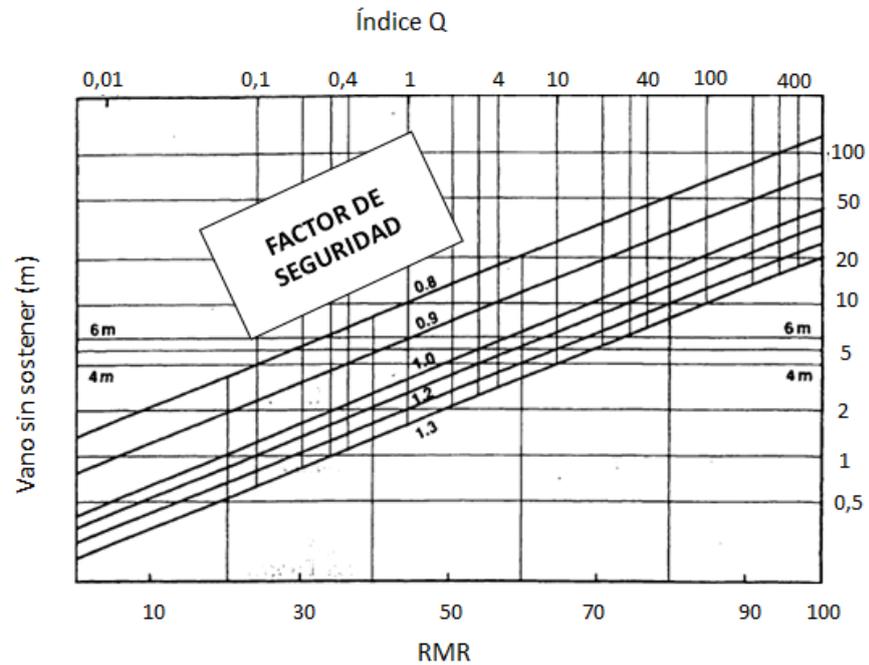


Figura 10: Factor de seguridad estimado para excavaciones subterráneas sin sostenimiento, en función del ancho del hueco y la calidad del macizo rocoso, según Q y RMR (Bieniawski, 1989), (Houghton & Stacey, 1980).

Entonces, combinando los dos ábacos de la figuras 9 y 10, se obtiene un nuevo ábaco que combina todos los parámetros, excepto el Índice RMR, es decir, que tiene en cuenta el vano o ancho de la excavación (m), el índice Q y el factor de seguridad (Figura 11). Este ábaco se utilizará, por tanto, para analizar la estabilidad de la mina en función de dichos parámetros.

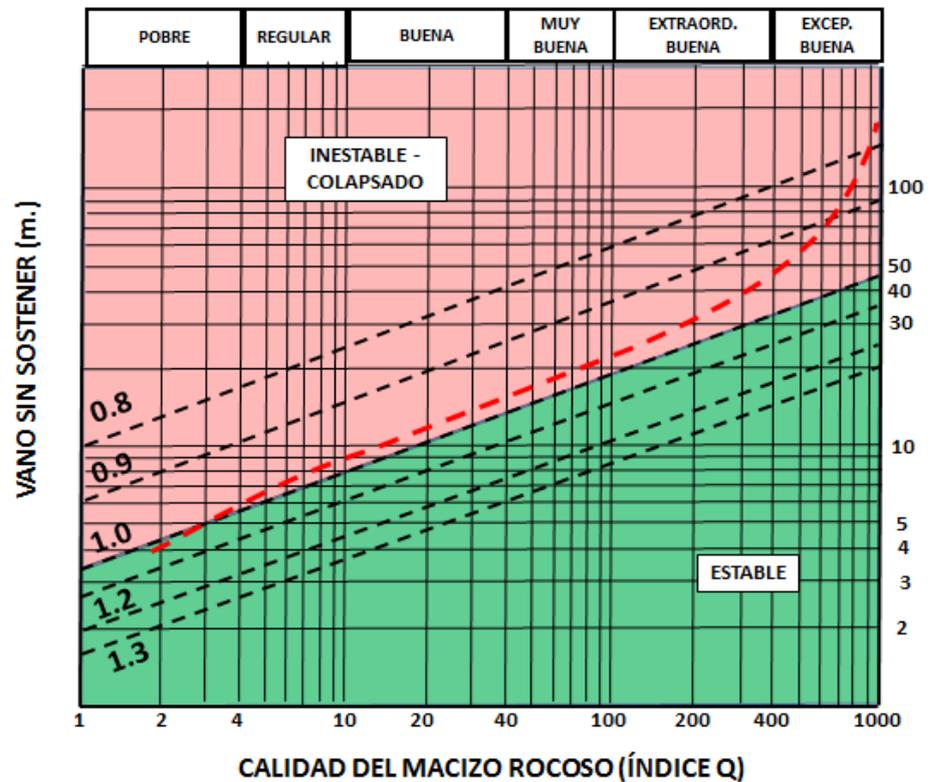


Figura 11: Ábaco para estimar la estabilidad de la excavación a partir del Índice Q, el Vano sin sostener (m) y el Factor de Seguridad. Según el autor.

La importancia de este ábaco reside en conocer el límite de la zona autoestable (que no precisa sostenimientos) de las zonas que necesitan refuerzo.

ESTABILIDAD f(D equivalente)

Como se ha mencionado anteriormente, los sostenimientos que se aplicarán en una zona determinada de la excavación se estiman mediante el parámetro D equivalente vs Índice Q, y a partir del ábaco-figura siguiente:

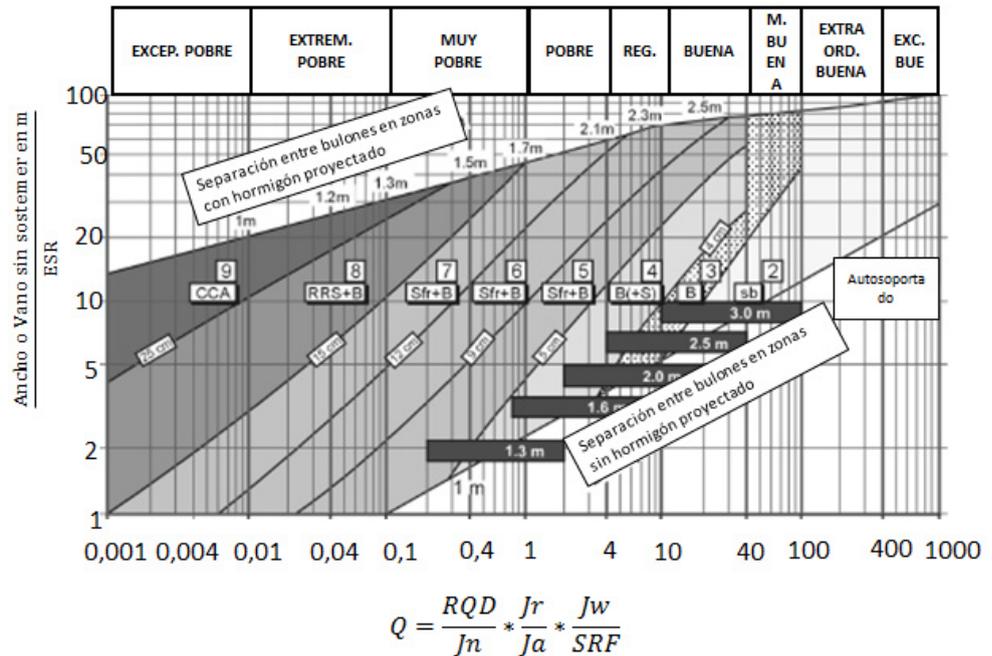


Figura 12: Ábaco para estimar los distintos sostenimientos posibles a partir de la relación D equivalente e Índice Q (Grimstad & Barton, 1993).

3.6 Análisis de cuñas

En obras subterráneas, tal como es la Mina San Juan, el modo de rotura más importante que se da en el macizo rocoso fracturado es el de tipo cuñas.

Este tipo de rotura se produce cuando en el macizo rocoso hay al menos tres familias de discontinuidades. La resistencia de las discontinuidades o juntas se estudiará a partir del Criterio de Barton-Bandis (1977), el cual nos permitirá calcular los parámetros de cohesión (c) y ángulo de rozamiento (φ) por medio del programa ROCDATA.

A partir de estos parámetros, junto con las familias de discontinuidades principales distinguidas en cada estación geomecánica levantada, se utilizará el programa UNDWEDGE para el mencionado análisis de cuñas.

3.6.1 Resistencia al corte de discontinuidades: Criterio de Barton-Bandis: Software RocData

Este criterio de rotura, definido por Barton y Bandis en 1977, es una relación empírica que se utiliza para modelizar discontinuidades en rocas o macizos rocosos y que permite llevar a cabo estudios de bloques y cuñas. Este criterio es del tipo no lineal, el cual relaciona la resistencia al corte de las discontinuidades con la tensión normal. Viene dado por la siguiente expresión:

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right\}$$

Dónde:

- ϕ_b es el ángulo de fricción básico de las discontinuidades, el cual permite calcular el ángulo de rozamiento residual (ϕ_r), según la siguiente fórmula matemática (Barton & Choubey, 1977):

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \left(\frac{r}{R} \right)$$

Siendo r el valor del rebote del esclerómetro en la pared de la junta en estado meteorizado-natural y R el valor del rebote con el martillo Schmidt en la pared en estado sano.

- **JRC** es la rugosidad de la junta medida en la escala de 10 cm (Figura 13).
- **JCS** es la resistencia a la compresión simple de la junta o σ_{ci} en MPa, medida en las paredes de las diaclasas con escala de 10 cm.

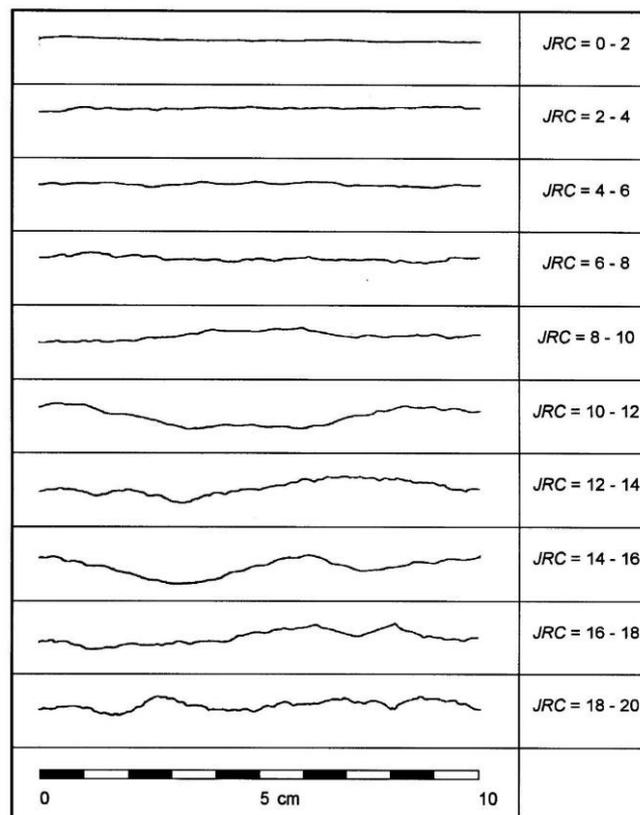


Figura 13: Plantilla para la estimación de JRC_0 en una escala de 10 cm. Se aplica también al parámetro JCS_0 (Barton & Choubey, 1977).

A partir de este concepto, se debe tener en cuenta el efecto escala que afecta tanto a la matriz rocosa como al grupo de discontinuidades. Por tanto, se debe llevar a cabo una corrección de los parámetros JRC y JCS, los cuales se deben estimar para la longitud y escala real de las diaclasas consideradas; se obtienen mediante las siguientes fórmulas:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03JRC_0}$$

Siendo:

- JRC_n es la rugosidad para la longitud real de las juntas y JRC₀ la rugosidad para la escala de 10 cm.
- JCS_n es la resistencia a la compresión uniaxial real y que tiene en cuenta el efecto escala; JCS₀ es la RCS para la escala de 10 cm.
- L_n es la longitud real media de todas las juntas consideradas.
- L₀ es la longitud sin efecto escala, es decir, 10 cm.

Se debe tener en cuenta también la profundidad media a la que se encuentra el túnel (en m) y el peso específico medio de la litología que conforma el macizo rocoso (en MN/m³).

Por último, hay que mencionar que aunque el estudio de cuñas y bloques se lleve a cabo en cada una de las EGMs, los parámetros de JRC_n , JCS_n , L_n , c y ϕ_r es para toda la mina San Juan.

Mediante el software RocData, se va a proceder, mediante todos los parámetros anteriormente señalados, a calcular empíricamente la cohesión (c) y ángulo de rozamiento residual (ϕ_r) (ANEXO 5) de las rocas encontradas en la Mina San Juan.

Estos datos obtenidos se exportarán al programa UNDWEDGE para llevar a cabo el análisis de cuñas, el cual es objeto este subcapítulo.

3.6.2 Análisis de cuñas mediante el programa UNDWEDGE v3

Este programa informático, perteneciente a la casa Rocscience, realiza, de manera automática, la estimación de posibles cuñas combinando las discontinuidades existentes con las orientaciones de las labores mineras o excavaciones.

Permite calcular el Factor de Seguridad de cuñas de rocas y evaluar las necesidades de sostenimientos, así como el tratamiento que se debe de llevar a cabo, a partir de un criterio de rotura que se debe elegir previamente. Los

criterios utilizados son el de Mohr-Coulomb y el de Barton-Bandis.

El criterio de Mohr-Coulomb expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones (esfuerzo normal y esfuerzo tangencial) según la siguiente expresión matemática (González de Vallejo, 2002):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Dónde:

- τ y σ_n son las tensiones tangencial y normal respectivamente y que actúan sobre el plano de rotura.
- c y ϕ son la cohesión y ángulo de rozamiento de la matriz rocosa, los cuales, se calculan empíricamente mediante el programa ROCDATA.

Hay que mencionar que el criterio de Mohr-Coulomb se utiliza para estudiar la rotura o resistencia de la matriz rocosa, mientras que el criterio de Barton y Bandis, como se indicó anteriormente, se utiliza para analizar la resistencia al corte de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.

3.6.3 Descripción y características de cuñas

El análisis de cuñas sigue la siguiente metodología de campo

y gabinete:

- Determinación del buzamiento y dirección del buzamiento medio en una serie significativa de juntas en cada estación geomecánica levantada.
- Identificación, por medio del software UNDWEDGE v3, potenciales cuñas que puedan deslizar o caer desde los hastiales y la clave.
- Calcular el FS de cada cuña según el modo de rotura, a partir del Criterio de Barton-Bandis y el Criterio de Mohr-Coulomb (parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento).
- Describir y sintetizar las características de cada bloque o cuña, tales como el peso, altura del ápice, etc, junto con un esquema-modelo obtenido.

CAPITULO IV

RESULTADOS: ESTUDIO GEOMECÁNICO Y PUESTA EN VALOR DE LA MINA SAN JUAN

4.1 Caracterización de la mina

La mina San Juan consiste en una galería general o principal de casi un km de largo y de dirección N-N90. En general, la galería principal y los cruceros miden entre 1 a 2,5 metros de alto, mientras que de ancho no supera los 1,5 metros.

La galería principal se encuentra en roca estéril que va intersectando distintas vetas de oro nativo con sulfuros de Cu (masivos y diseminados), las cuales llevan una dirección aproximada de NW-SE, y cuyas potencias no superan el medio metro.

Así mismo, la paragénesis mineral que se identificó fue pirita + calcopirita + pirrotina + bornita + magnetita + óx. Fe-Mn + Au. También pueden aparecer arsenopirita, esfalerita, galena,

molibdenita, cuarzo y epidota.

De promedio, las vetas presentan 18g/ton, encontrándose en la veta del fondo los valores más altos (25-30 g/ton), ya que en esta aparece Au libre.

La mina no cuenta con luz eléctrica ni raíles para vagones de carga. Todo el material minero y mineral lo transportan los propios trabajadores.

Como se ha mencionado, esta mina pertenece al grupo de minería denominado Minería artesanal, es decir, es una mina cuya extracción de mineral no supera las 0,5 ton/día; además, se caracteriza por no contar con luz eléctrica ni raíles para vagones de carga. Todo el material minero y el mineral lo transportan los propios trabajadores, acumulándose el estéril a lo largo de los cruceros y a modo de escombrera junto a la bocamina.

4.1.1 Levantamiento topográfico

Para este trabajo se realizó el levantamiento topográfico tipo espeleológico. Con el programa informático VISUAL TOPO v4.7, se ha obtenido el siguiente modelo 3D de la mina San Juan:

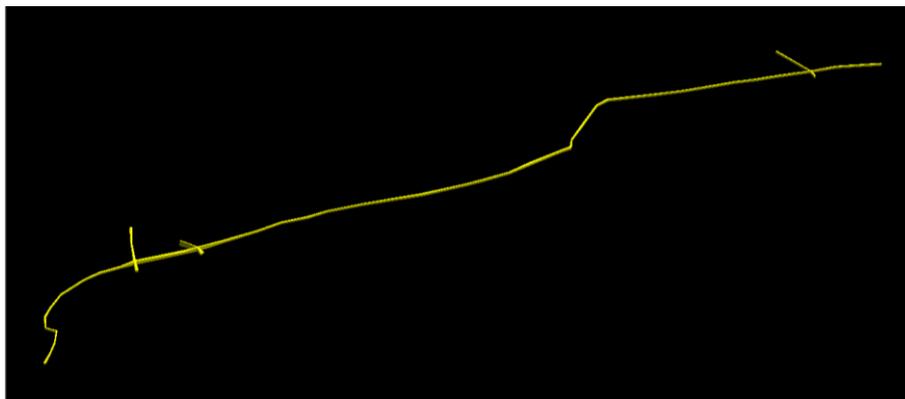


Figura 14: Modelo 3D de la mina San Juan obtenido con el programa de espeleología VISUAL TOPO. Según el autor.

Los datos de la mina (Puntos topográficos y distancia entre estos, dirección del túnel, ancha y alta) vienen en (ANEXOS 6).

4.1.2 Levantamiento Geológico

Este apartado consiste básicamente en la descripción de visu de ocho muestras de roca junto con una cartografía geológica de la Mina San Juan.

4.1.2.1 Descripción Macroscópica de las muestra tomadas

Se ha llevado a cabo el análisis macroscópico de distintas muestras tomadas en esta formación:

- CPE-SMSJ-01: Roca grisácea oscura de densidad media-alta, parcialmente meteorizada y con fracturación muy

irregular. Presenta una textura afanítica, sin fenocristales. Las mineralizaciones consisten en sulfuros de cobre masivos y diseminados, completamente anhedrales (pirita, pirrotina y calcopirita; también galena subhedral). Por último, se observa una drusa de cuarzo milimétrica altamente meteorizada. Se deduce que se trata de una andesita basáltica o basalto andesítico.

- CPE-SMSJ-02A: Roca grisácea de densidad alta y con fracturas irregulares, junto con un claro aspecto bandeado, y hasta brechificado. Dicho bandeamiento está definido por una vetilla cuarzosa tabular. También se observan algunos niveles milimétricos verdosos (posiblemente alteración propilítica). Hay presencia de cristales euhedrales muy abundantes y brillantes de galena, habiendo también calcopirita diseminada. No se identifica el tipo de roca, aunque posiblemente se trate de una andesita basáltica brechificada.

- CPE-SMSJ-2B: Fragmento anguloso de roca de color negro pero con tonos blancos y amarillentos. Densidad media. Presenta fracturas muy irregulares, con altos contenidos en mineralizaciones: pirita, pirrotina, bornita y galena. La mayor parte de la roca consiste en un gran cristal de cuarzo lechoso conteniendo dichas mineralizaciones; también se observa una veta tabular centimétrica de cuarzo altamente meteorizada y de color marrón. Se deduce que se trata de una parte del filón mineralizado.
- CPE-SMSJ-2C: Muestra similar a la 2A, con el característico aspecto bandeado y brechificado. Abundantes niveles verdosos alternantes con niveles de espesores variables (varios cms como máximo) mineralizados de cuarzo y de sulfuros de Cu; puede contener posiblemente granos milimétricos de Au. Se trataría de la parte del filón-veta mineralizada.

- CPE-SMSJ-3: Roca de densidad media con fractura angulosa-irregular y con superficies muy meteorizadas, presentando un aspecto gris verdoso. En las partes frescas presenta una textura afanítica. Las únicas mineralizaciones encontradas consisten en diseminaciones de cuarzo y sulfuros de Cu muy meteorizados. Posiblemente consista en una andesita basáltica o basalto.
- CPE-SMSJ-4: Roca de densidad media con fractura muy angulosa; color verde oscuro-negruzco. Presenta una textura completamente afanítica, siendo muy similar a la muestra 3, aunque la 4 no tan meteorizada. Se observan unas pocas acumulaciones milimétricas de sulfuros de Cu, siendo seguramente de pirrotina y covellina. Dichas acumulaciones aparecen siguiendo planos de fractura determinados y paralelos entre sí.
- CPE-SMSJ-5A: Roca de densidad media-

alta con fracturación angulosa-irregular. En sus partes frescas tiene un color gris oscuro, con una textura completamente afanítica. Esta muestra se encuentra cortada por filones centimétricos de cuarzo y sulfuros de Cu, ambos muy meteorizados, junto con minerales negros, seguramente sulfuros de Fe. También abundantes niveles verdosos (posiblemente alteración propilítica). Se puede apreciar abundantes manchas de Óx. de Fe y Mn. A partir de esto se puede deducir que se trata de un basalto andesítico o andesita basáltica situada en una zona muy fracturada con circulación de agua meteórica.

- CPE-SMSJ-5B: Fragmento de roca de densidad media altamente meteorizados y fáciles de fracturar (Se parten con las manos). Esta roca presenta un aspecto altamente verdoso (posiblemente importante desarrollo propilítico). En las partes frescas se observa una textura afanítica de color

gris negruzco. Presencia de sulfuros de Cu y Fe diseminados y meteorizados. También algún filón de Q de morfología muy irregular. Por último, yeso en planos de fractura, formando posiblemente espejos de juntas o de falla. Se deduce por tanto que se trate de un basalto andesítico o andesita basáltica situada en una zona de falla.

Las mineralizaciones se encuentran a lo largo de fracturas y fallas a modo de vetas y vetillas que cortan al encajante. Las mineralizaciones encontradas, a partir del estudio macroscópico de las muestras anteriormente expuestas, son las siguientes:

- Masivas y diseminadas, con tamaños de granos centimétricos euhedrales y subhedrales, de calcopirita, bornita, galena y estibina, con Au asociados.
- Vetas y vetillas mili-centimétricas de pirita, calcopirita, bornita y cuarzo, apareciendo

también como drusas. Presentan niveles de oxidación de Fe y Mn muy variables. A lo largo de estas estructuras se pueden identificar la alteración propilítica con su característico color verde.

4.1.2.2 Hoja cartográfica de la Mina San Juan

Se realizó una cartografía geológica 1:2000 en la mina San Juan (Mapa 3, ANEXO 3), en la que se identificaron las distintas litologías y se estudiaron diferentes estructuras geológicas.

Litología:

Se observaron como rocas predominantes varios tipos de andesitas; un tipo de andesita plagioclásica de color gris oscuro fractura irregular, con una potencia estimada de 150 a 200 m, caracterizada por presentar una textura porfídica definida por fenocristales mili-centimétrico de plagioclasas blancas; y una andesita basáltica o basalto andesítico color muy oscuro, negruzco, con un espesor aproximado de 550-600 metros, de textura completamente afanítica, sin fenocristales.

También se encontró una serpentinita paralela a la falla F5. Se caracteriza por presentar un color verde oscuro. Su espesor se calculó en 5 metros aproximadamente, aunque se desconoce su continuidad lateral. Esta roca se piensa que pueda estar relacionada con dicha falla (F5) y el movimiento de fluidos hidrotermales por algún basalto que haya sufrido metamorfismo hidrotermal.

Por último, en las fallas con mayor movimiento vertical, tales como la F1 y F5, se ha encontrado asociado a éstas, brechas de falla, caracterizadas por encontrarse completamente trituradas y con gran desarrollo de arenización-argilización. Tienen un color blanquecino a marronáceo. Hay que añadir que no se denominaron milonitas al no considerarse que estas hayan sufrido un metamorfismo dinámico.

Estructura:

A lo largo de toda la mina cartografiada se han identificado hasta seis fallas distintas, las cuales tienen una dirección que van desde NW-SE, N-S y SW-NE. Consisten todas ellas en fallas normales

inclinadas o subverticales ($>45^{\circ}<90^{\circ}$), con o sin desarrollo de vetas-filonos. A continuación se explicará cada estructura en detalle:

La Falla F1, cuyo plano de falla tiene una orientación de 228/62 (rumbo NW-SE), presenta un importante componente vertical, con un movimiento de más de 20 metros, afectando a unas andesitas plagioclásicas. No desarrolla mineralizaciones, aunque si se han observado rocas de falla con alto contenido en arcillas. Esta falla es paralela a las fallas locales Río Tenguel y Margarita, por lo que se deduce que se formaron bajo el mismo campo de esfuerzos y por tanto son singenéticas (mismo sistema de fallas).

Las Fallas F2, F4 y F6, ésta última con una orientación de 85/85, consisten en fallas normales inclinadas con un rumbo NNW-SSE desarrollando mineralizaciones de sulfuros de Cu. Como son subparalelas a F1, posiblemente formen parte del mismo sistema de fallas que ésta, es decir, al sistema de fallas A, y por tanto, sean singenéticas entre sí. Es en la falla F6 donde se ha identificado

las siguientes fases minerales: Pirita, calcopirita, pirrotina, bornita, magnetita y otros Óx. de Fe y Mn (Potencia de la veta, 20 cm).

De la falla F3 solo se ha tomado el dato estructural de su plano de falla: 272/88.

La falla F5, cuyo plano de falla tiene una orientación de 311/67, está relacionada con la masa serpentínica anteriormente descrita. Como lleva una dirección paralela al Sistema de Fallas B, se deduce que es anterior a las fallas F1, F2, F4 y F6.

Por último, se tiene un diagrama de rosa de todas las discontinuidades medidas en la mina San Juan (Figura 15). Se observan dos sistemas de discontinuidades diferentes, uno con dirección NW-SE y el otro con dirección NE-SW, lo que coincide con las direcciones de los sistemas de fallas A y B, respectivamente.

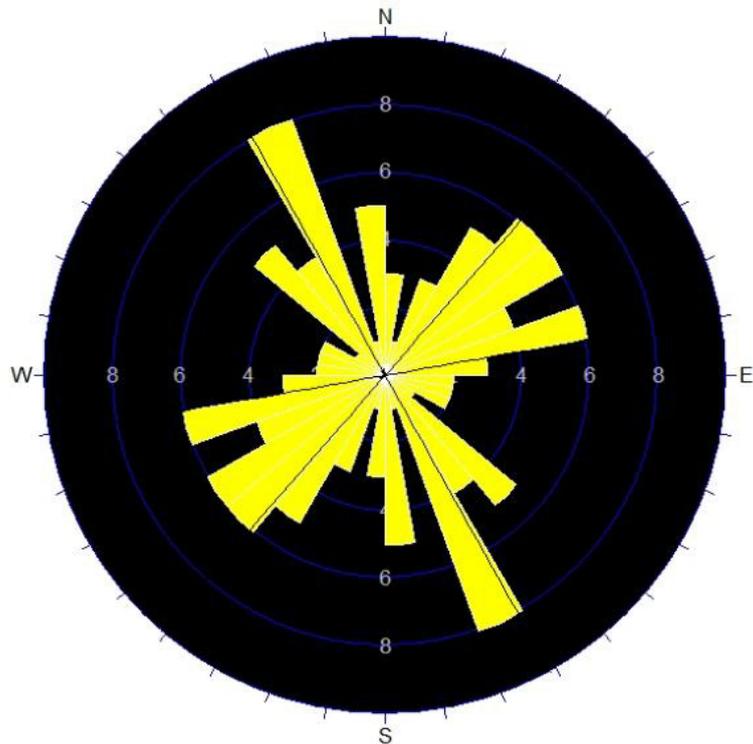


Figura 15: Diagrama en rosa de todas las discontinuidades medidas en la Mina San Juan. Programa DIPS v5. Según el autor.

4.2 Estaciones Geomecánicas

Se llevaron a cabo las siguientes estaciones geomecánicas:

4.2.1 Estación Geomecánica 1 (EGM1)

Esta estación geomecánica se llevó a cabo entre los puntos topográficos 6 y 7. La geología observada consiste en andesitas porfídicas plagioclásicas afectadas y cortadas por una falla normal (F1). En la estación in situ no se observan formación de cuñas ni bloques caídos, pero si abundante agua en el suelo. Así mismo, la calidad del macizo rocoso

para tomar los datos geomecánicos y levantar aquí una EGM es excelente.

A continuación se enumeran las propiedades, características y principales parámetros geomecánicos de las juntas, de la matriz y del macizo rocoso:

- Litología: Andesitas plagioclásicas de textura porfídica de la Fm. Macuchi. Presentan una densidad media, con colores grises oscuros. Meteorización únicamente superficial, tanto en la matriz como en los planos de fractura.
- Profundidad a la que se encuentra aproximadamente es de 50 metros.
- Resistencia a compresión: se estimó mediante esclerómetro en 48 MPa, es decir, se trata de una roca de dureza media.
- Grado de meteorización del macizo y de las juntas: GMII-GMI.
- Juntas por metro lineal o λ : 5
- Espaciamiento medio varía entre los 200 mm hasta más de dos metros, con una media de 400-600 mm.
- Continuidad de las juntas, varía entre 1 a 10 metros,

aunque la falla F1 presenta una continuidad de más de 20 metros.

- La apertura de dichas juntas es muy variada, desde completamente cerradas hasta abiertas más de 5-15 cm en el caso de la falla F1. La apertura observada en esta estación sería entre 0,1 a 10 mm.
- La rugosidad de los planos de las juntas van de Ligeramente Onduladas a Rugosas, con un JRC estimado entre 6-8 y 10-12.
- El macizo se encuentra húmedo, posiblemente por la presencia de la falla F1 y juntas pertenecientes a su misma familia (J1) y gran persistencia.
- La falla F1 presenta relleno de brechas de falla y arcillas con espesores entre 5-15 cm. Las juntas pueden o no presentar relleno arcilloso o arenoso con potencia menor a 1mm.

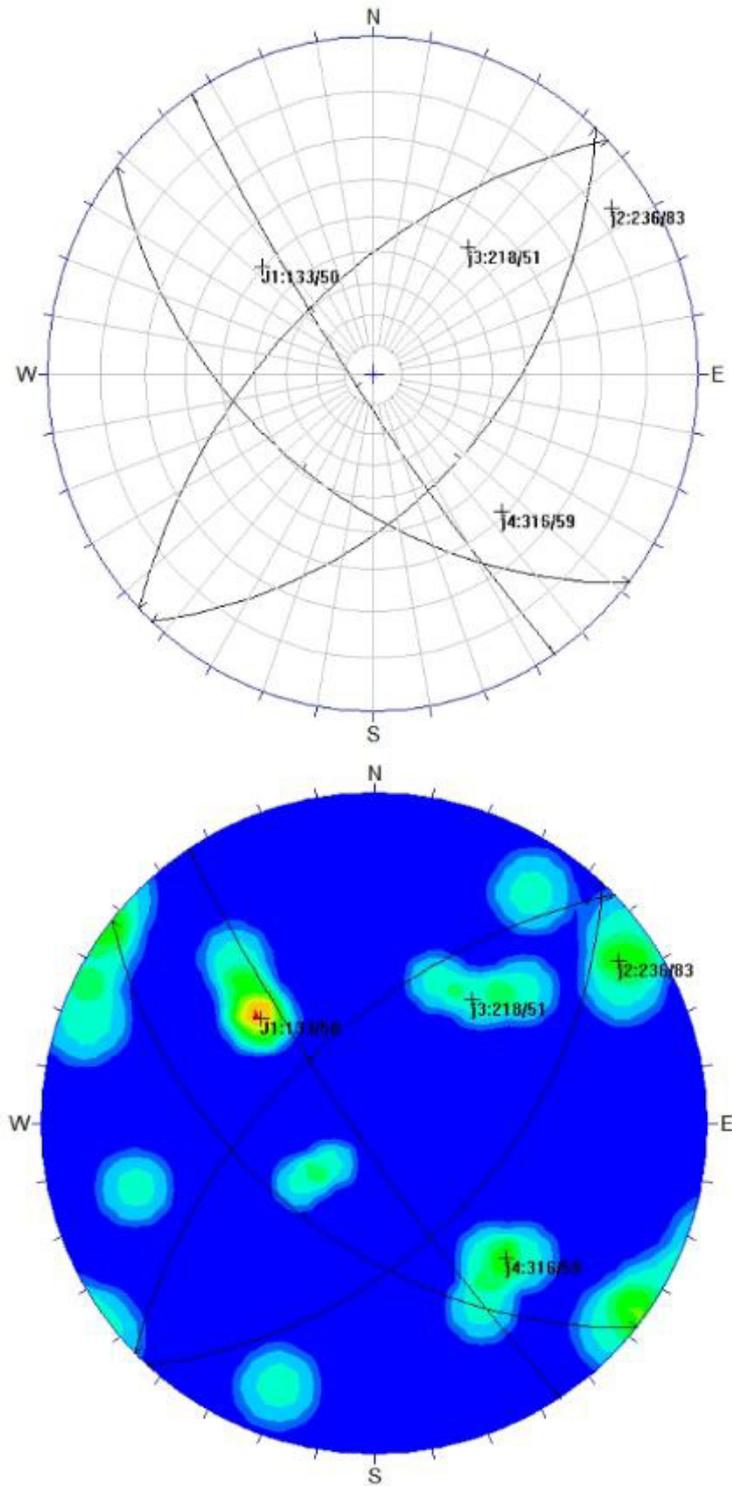


Figura 16: Estereograma de familia de juntas. EGM1. Según el autor.

Estereograma de las principales familias de diaclasas, observándose hasta cuatro familias distintas, siendo tres principales y algunas diaclasas aleatorias. Las familias son las siguientes: J1:133/50 (Falla F1); j2:236/83; j3:218/51 y j4:316/59. Según el autor.

A partir de los datos geológico-geomecánicas tomados, se llevará a cabo el cálculo del RQD, RMR y Q de Barton, respectivamente.

El RQD se calculó a partir de la fórmula dada por (Priest & Hudson, 1981), con el índice λ :

$$RQD = 100 * e^{-0,1*\lambda} * (0,1 * \lambda + 1);$$

Como en esta estación $\lambda = 5$, entonces:

$$RQD = 100 * e^{-0,1*5} * (0,1 * 5 + 1) = 91\%$$

Por tanto, la calidad de la roca según el RQD es muy buena.

RMR

A continuación se calculará el RMR básico y posteriormente el

RMR corregido:

Sabemos que:

$$RMR_{básico} = RMR1 + RMR2 + RMR3 + RMR4 + RMR5;$$

RMR1

Como la RCS del macizo rocoso fue estimado en 48 MPa,

RMR1=6

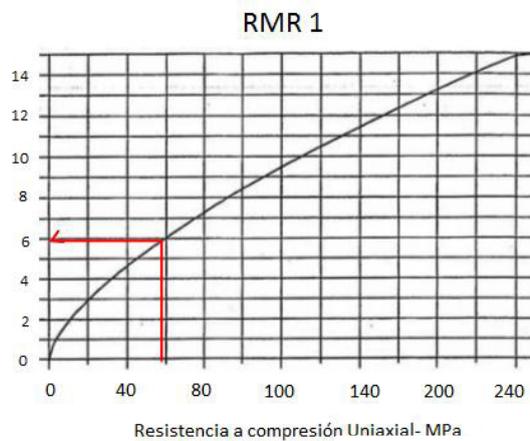


Figura 17: Estimación de RCS (RMR1) para la EGM1. Según el autor.

RMR2

Como el RQD=91%, se obtiene que RMR2=18.

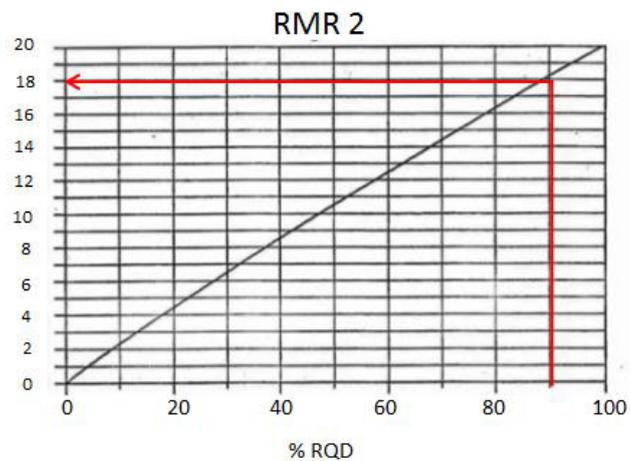


Figura 18: Valoración RQD (RMR2) para la EGM1. Según el autor.

RMR3

Como la separación de juntas varía entre 2m a 0,2m, obtenemos dos tendencias distintas, es decir, dos RMR3 distintos: RMR3 mínimo y RMR3 máximo, los cuales tienen un

valor respectivamente de 9 y 20.

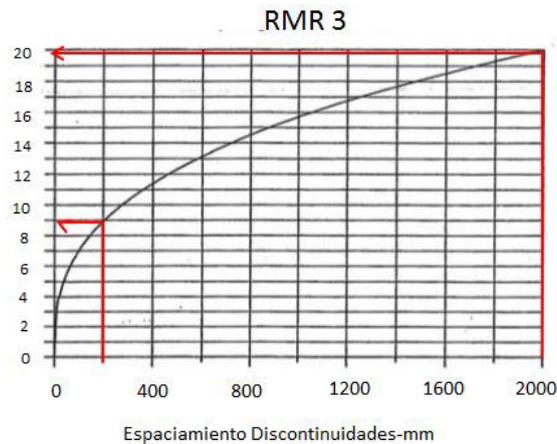


Figura 19: Valoración del espaciado medio (RMR3) en la EGM1. Según el autor.

RMR4

Este factor se obtuvo con la puntuación de los siguientes parámetros:

Parámetro	Descripción	Valor considerado
Persistencia y continuidad	Mínimo entre 1-3m. y máximo más de 20 m.	0-4
Apertura	Nada hasta 1mm.	4-6
Rugosidad	Ondulada	1
Relleno	Nada o menos de 1mm.	6
Alteración	De grado I a II (Inalterado a ligeramente Alterado)	5-6
Total Mím-Máx.		16-23

Tabla VIII: Valoración del RMR4 para la EGM1. Según el autor.

Por tanto, el RMR4 mínimo tiene un valor de 16, mientras que el RMR4 máximo un valor de 23.

RMR5

Se observa que la roca se encuentra húmeda, por tanto

RMR5=7.

RMRbásico

A partir de los valores estimados anteriormente, se calcula el RMRbásico, tanto el mínimo como el máximo:

$$RMRbásicomím. = 6 + 18 + 9 + 16 + 7 = 56\%$$

$$RMRbásicomáx. = 6 + 18 + 20 + 23 + 7 = 74\%$$

RMRcorregido

El RMRcorregido se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$RMRcorregido = RMRbásico - RMR6$$

Por un lado, sabemos que la dirección media del túnel es N33,5°, y de que la orientación de la familia de discontinuidades principal es de 133/55, siendo dicha dirección de dicha familia es paralela al túnel y con buzamiento mayor a 45°, por lo que se obtiene una valoración cualitativa muy desfavorable y cuantitativa de RMR6=-12

Entonces:

$$RMRcorregidomím = 56 - 12 = 44\%$$

$$RMRcorregidomáx = 77 - 12 = 65\%$$

Por tanto, para la EGM1, hemos obtenido un RMR=44-65%.

La clase de la roca es de tipo III a II, es decir media-regular a buena.

A continuación, se ha calculado la Q de Barton. Los valores estimados para cada parámetro son los siguientes:

- RQD=91%
- Índice de diaclasamiento: se han observado un máximo de tres familias de diaclasas principales J1, j2 y j3, y algunas ocasionales, por lo que $J_n=12$.
- Índice de rugosidad Jr: Dado que los labios de la roca presentan pequeños desplazamientos y la rugosidad es del tipo ondulada y hasta rugosa, $J_r=3$.
- Índice de alteración Ja: Se ha observado que los labios de las juntas se encuentran inalterados o ligeramente meteorizados, por tanto, $J_a=1$.
- Coeficiente reductor por presencia de agua Jw: A lo largo de la estación geomecánica se ha apreciado que se encuentra en estado seco y filtraciones pequeñas locales hasta filtraciones medias con lavados ocasionales de rellenos, por tanto, $J_w=0,66-1$.
- Condiciones tensionales SRF: Por un lado sabemos que la roca es competente bajo influencia del estado tensional

.Por otro $\sigma_c = 48 \text{ MPa}$ y $\sigma_1 = 0,026 * 50 = 1,3 \text{ MPa}$.

Obtenemos que $\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 36,9$. Entonces; $\text{SRF}=1$.

Valor de Q de Barton:

$$Q_{\text{mínimo}}: Q = \frac{91}{3} * \frac{3}{1} * \frac{0,66}{1} = 15,02$$

$$Q_{\text{máximo}}: Q = \frac{91}{3} * \frac{3}{1} * \frac{1}{1} = 22,75$$

La roca de la estación 1 es, según el índice Q, de calidad muy buena.

4.2.2 Estación Geomecánica 2 (EGM2)

La Estación Geomecánica 2 se levantó en el punto topográfico 11, y considerando también los puntos 100, 101 y 200. Se levantó en la intersección entre la galería principal y el primer crucero de la Mina San Juan, el cual lleva una dirección de N02 a N195, siguiendo una veta-filón, el cual presenta una orientación de 80/40. Se aprecian andesitas porfídicas plagioclásicas en contacto con andesitas basálticas afaníticas oscuras separadas por dicha veta-filón mineralizado. La calidad del macizo rocoso para tomar los datos geomecánicos y levantar aquí esta estación es excelente.

A continuación, las propiedades, características y principales

parámetros geomecánicos de las juntas, de la matriz y del macizo rocoso:

- Litología: Andesitas plagioclásicas de textura porfídica en contacto neto con andesitas basálticas afaníticas de la Fm. Macuchi. Presentan una densidad media, con colores grises oscuros. Meteorización ligera, tanto en la matriz como en los planos de juntas.
- Se encuentra a una profundidad aproximada de 100 metros.
- Resistencia a compresión: se estimó mediante el martillo de geólogo, dando como resultado R6, es decir, más de 250 MPa, tratándose de roca extremadamente dura.
- Grado de meteorización del macizo y de las juntas: GMII.
- Juntas por metro lineal o λ : 9.
- Espaciamiento presenta como valor mínimo los 60 mm, y máximos hasta los 600 mm.
- La continuidad supera los 20 metros de longitud.
- La apertura de las juntas es monótona, superando en todas ellas los 5 mm. de espesor.
- La rugosidad de los planos de las juntas es del tipo ondulada, con un JRC constante en 4-6.
- El macizo se encuentra húmedo o incluso goteando,

debido a la gran continuidad de las juntas.

- No se observa ningún tipo de relleno, por lo que las juntas se encuentran completamente abiertas.

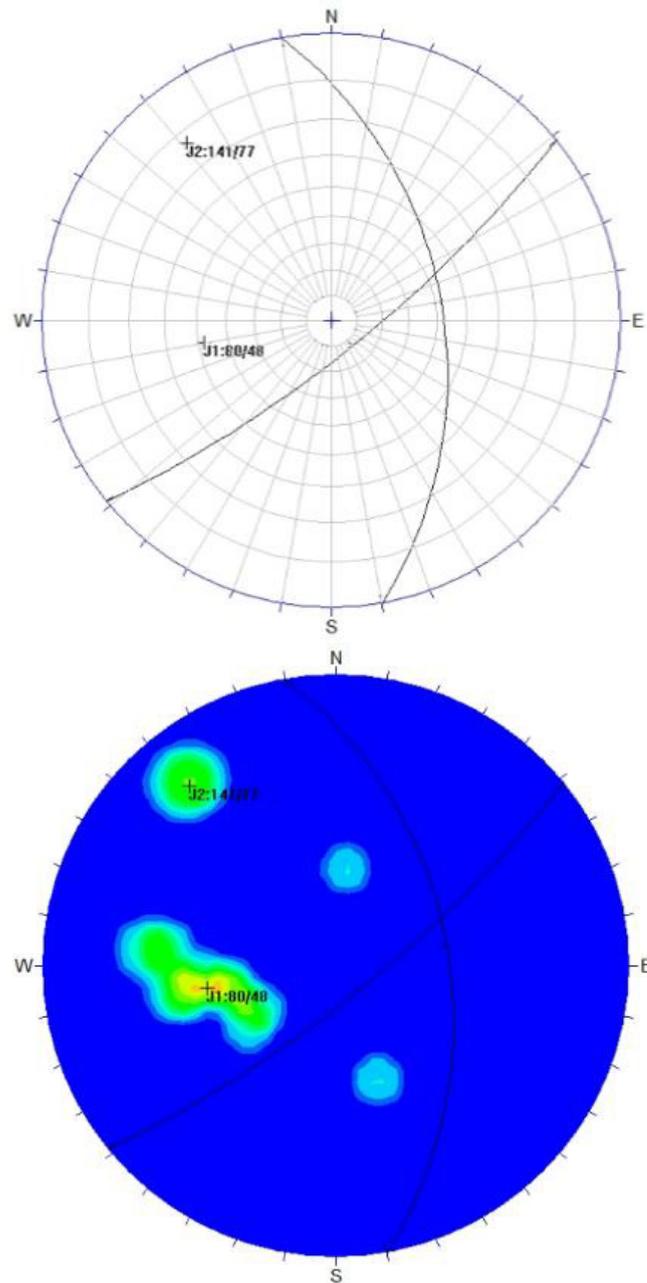


Figura 20: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM2. Según el autor.

Las familias son las siguientes: J1:80/48 y J2:141/77, observándose también alguna diaclasa ocasional.

A partir de los datos geológico-geomecánicos tomados, se llevará a cabo el cálculo del RQD, RMR y Q de Barton, respectivamente.

El RQD se calculó a partir de la fórmula dada por (Priest & Hudson, 1981), con el índice λ :

$$RQD = 100 * e^{-0,1*\lambda} * (0,1 * \lambda + 1);$$

Como en esta estación $\lambda = 9$ entonces:

$$RQD = 100 * e^{-0,1*9} * (0,1 * 9 + 1) = 77,25\%$$

Según la clasificación de Deere (1969), la calidad del macizo rocoso es buena.

A continuación se calculará el RMR básico y posteriormente el RMR corregido:

Sabemos que:

$$RMR_{básico} = RMR1 + RMR2 + RMR3 + RMR4 + RMR5;$$

RMR1

Como la RCS del macizo rocoso fue estimado en más de 250 MPa, por tanto, RMR1=15.

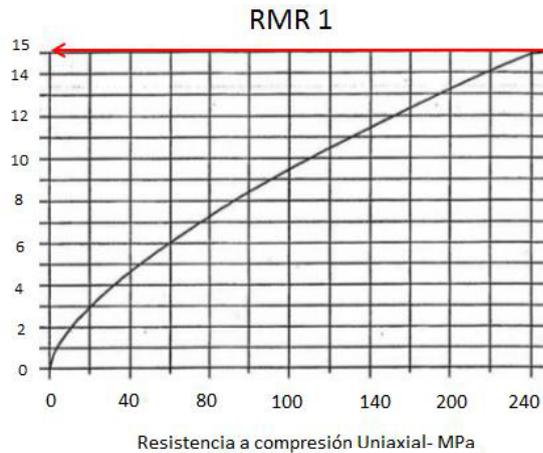


Figura 21: Valoración de RCS (RMR1) para la EGM2. Según el autor.

RMR2

Como el RQD=77,25%, se obtiene que RMR2=16.

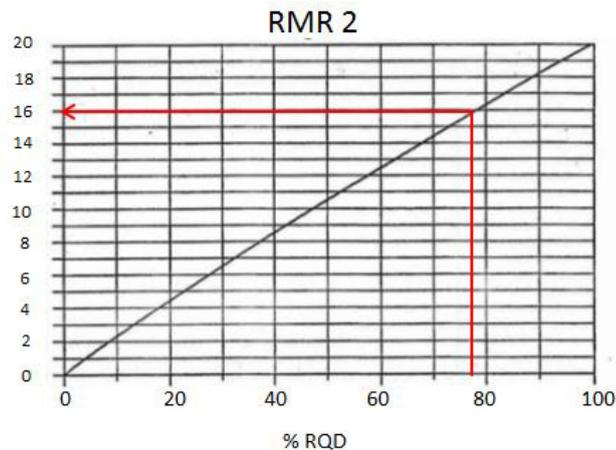


Figura 22: Valoración del RQD (RMR2) para la EGM2. Según el autor.

RMR3

Como la separación de juntas varía entre 60 mm. hasta los 600 mm, obtenemos dos tendencias distintas, es decir, dos RMR3 distintos: RMR3 mínimo y RMR3 máximo, los cuales tienen un valor respectivamente de 5 y 13.

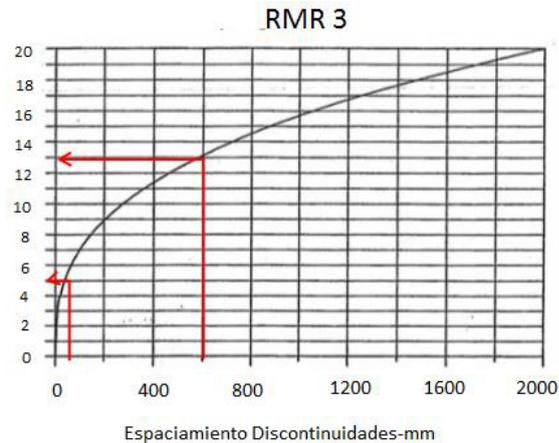


Figura 23: Valoración del espaciado medio (RMR3) en la EGM2. Según el autor.

RMR4

Este factor se obtuvo con la puntuación de los siguientes parámetros:

Parámetro	Descripción	Valor considerado
Persistencia y continuidad	>20 metros	0
Apertura	>5 mm.	0
Rugosidad	Ondulada	1
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Grado II (Ligeramente alterado)	5
Total		12

Tabla IX: Valoración del RMR4 para la EGM2. Según el autor.

Por tanto, el RMR4 tiene un valor total de 12.

RMR5

Se observa que la roca se encuentra húmeda e incluso

goteando, por tanto, se toma un RMR5mínimo y máximo, con puntuaciones respectivamente de 4 y 7.

RMRbásico

A partir de los valores estimados anteriormente, se calcula el RMRbásico, tanto el mínimo como el máximo:

$$RMRbásicomím. = 15 + 16 + 5 + 12 + 4 = 52\%$$

$$RMRbásicomáx. = 15 + 16 + 13 + 12 + 7 = 63\%$$

RMRcorregido

El RMRcorregido se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$RMRcorregido = RMRbásico - RMR6$$

Para este apartado, se considera como familia de diaclasa principal la veta-filón mineralizado, el cual tiene una orientación de 80/40. Por un lado, para la galería, cuya dirección N76, se considera perpendicular al filón, por lo que la situación estructural es favorable: puntuación en -2. Por otro lado, el crucero con dirección N02-N195 y por tanto paralelo al propio filón; su situación estructural es desfavorable, con un valor de -10.

Entonces:

$$RMRcorregidomímGalería = 52 - 2 = 50\%$$

$$RMRcorregidomáxGalería = 63 - 2 = 61\%$$

$$RMR_{\text{corregido m\u00edn}}^{\text{Crucero}} = 52 - 10 = 42\%$$

$$RMR_{\text{corregido m\u00e1x}}^{\text{Crucero}} = 63 - 10 = 53\%$$

Por tanto para la EGM2, hemos obtenido, en general, un RMR=42-61%. La clase de la roca es de tipo III y II, es decir, del tipo regular-normal y buena.

A continuaci\u00f3n, se ha calculado la Q de Barton. Los valores estimados para cada par\u00e1metro son los siguientes:

- RQD=77,25%.
- \u00cdndice de diaclasamiento: se han observado dos familias de diaclasas principales, J1 y J2, m\u00e1s algunas diaclasas ocasionales, por lo que $J_n=6$. Como nos encontramos en una intersecci\u00f3n, $J_n * 3 = 18$.
- \u00cdndice de rugosidad Jr: Dado que los labios de la roca presentan peque\u00f1o desplazamientos y la rugosidad es del tipo ondulada, Jr=2.
- \u00cdndice de alteraci\u00f3n Ja: Se ha observado que los labios de las juntas se ligeramente alterados-meteorizados, por tanto, Ja=2.
- Coeficiente reductor por presencia de agua Jw: Aunque en esta estaci\u00f3n las juntas se encuentren h\u00famedas o goteando, la excavaci\u00f3n en este punto se

encuentra seca o con filtraciones pequeñas, por lo que $J_w=1$.

- Condiciones tensionales SRF: Por un lado sabemos que la roca es competente encontrándose bajo la influencia del estado tensional. Por otro $\sigma_c = 250$ MPa y $\sigma_1 = 0,026 * 100 = 2,6$ MPa. Obtenemos que $\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 96,15$. Entonces; SRF=1.

Valor de Q de Barton:

$$Q = \frac{77,25}{18} * \frac{2}{2} * \frac{1}{1} = 4,3$$

Por tanto, la roca es de calidad media.

4.2.3 Estación Geomecánica 3 (EGM3)

La EGM3 fue estudiada en el punto topográfico 39, en la intersección con un crucero de un filón-veta mineralizada (puntos topográficos 500 y 600). La geología consiste en andesitas basálticas afaníticas afectadas por una falla normal con desarrollo de mineralizaciones (sulfuros de Cu y Fe). En la estación se observa algún bloque caído; la excavación se encuentra completamente seca. Así mismo, la calidad del macizo rocoso para tomar los datos geomecánicos y levantar aquí esta estación es excelente.

A continuación se enumeran las propiedades, características y principales parámetros geomecánicos de las juntas, de la matriz y del macizo rocoso:

- Litología: Andesitas basálticas de textura afaníticas oscuras. Presentan una densidad media-alta. El macizo rocoso apenas se encuentra meteorizado.
- Profundidad a la que se encuentra aproximadamente es de 200 metros.
- Resistencia a compresión: se estimó mediante el martillo geólogo en varias muestras de rocas, dando como resultado un R4 y R5, es decir, rocas duras a muy duras, con un intervalo de 50 a 250 MPa.
- Grado de meteorización del macizo y de las juntas: GMI.
- Juntas por metro lineal o λ : 4
- Espaciamiento medio es de menos de 60 mm.
- Continuidad de las juntas es escasa, no supera el metro de persistencia, aunque alguna diaclasa puede presentar casi 3 metros de largo
- No se observa apertura en las juntas. Se encuentran completamente cerradas.
- Por lo general, las juntas pueden presentar paredes lisas o ligeramente onduladas, con un JRC que varía entre 4-6

y 10-12.

- El macizo rocoso se encuentra completamente seco, debido seguramente a la escasa persistencia de las juntas y otras discontinuidades (alta presión vertical).

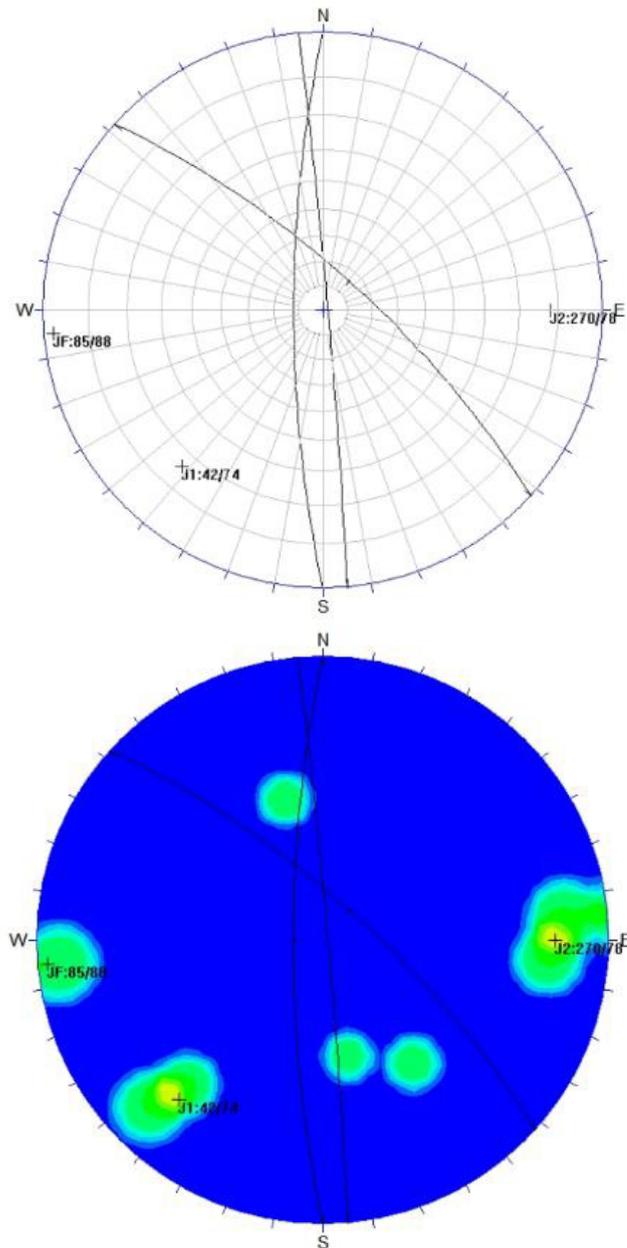


Figura 24: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM3. Según el autor.

Se identifica la falla normal F5 con una orientación de 85/85 y otras dos familias J1 y J2 como 42/74 y 270/78, respectivamente. Según el autor.

A partir de los datos geológico-geomecánicos tomados, se llevará a cabo el cálculo del RQD, RMR y Q de Barton, respectivamente.

El RQD se calculó a partir de la fórmula dada por Priest y Hudson (1981), con el índice λ :

$$RQD = 100 * e^{-0,1*\lambda} * (0,1 * \lambda + 1);$$

Como en esta estación $\lambda = 4$, entonces:

$$RQD = 100 * e^{-0,1*4} * (0,1 * 4 + 1) = 93,85\%$$

Por tanto, la calidad de la roca según el RQD es muy buena.

RMR

A continuación se calculará el RMR básico y posteriormente el

RMR corregido:

Sabemos que $RMR_{básico} = RMR1 + RMR2 + RMR3 + RMR4 + RMR5$;

RMR1

Se estimó RCS entre 50 MPa y 250 MPa, por lo que se obtiene un $RMR1_{m\acute{m}}=6$ y un $RMR1_{m\acute{a}x}=15$.

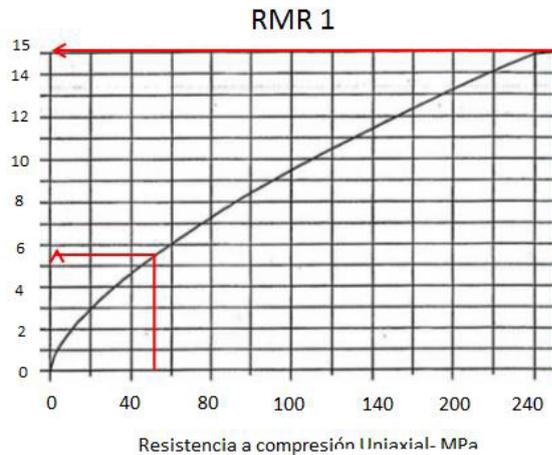


Figura 25: Valoración del RCS (RMR1) para la EGM3. Según el autor.

RMR2

Como el $RQD=93,85\%$, se obtiene que $RMR2=19$.

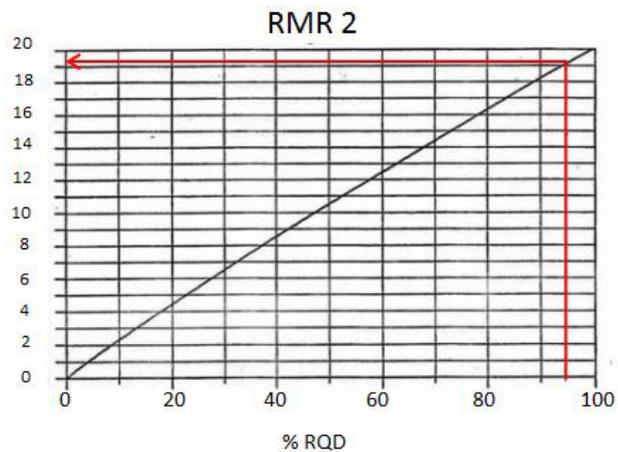


Figura 26: Valoración RQD (RMR2) para la EGM3. Según el autor.

RMR3

La continuidad de las juntas es en todas ellas menor a 60 mm., por tanto, $RMR3=6$.

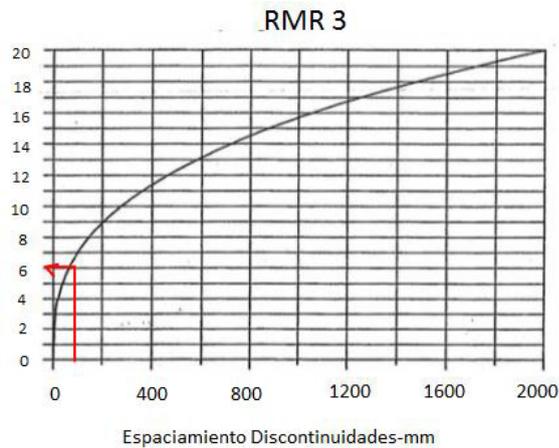


Figura 27: Valoración espaciado medio (RMR3) de la EGM3. Según el autor.

RMR4

Este factor se obtuvo con la puntuación de los siguientes parámetros:

Parámetro	Descripción	Valor considerado
Persistencia y continuidad	Casi todas las juntas tienen una continuidad menor a 1 metro	6
Apertura	Nada	6
Rugosidad	Lisas y Ligeramente Onduladas: suaves.	0-1
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Grado I (Sin meteorizar o sano)	6
Total Mím-Máx.		24-25

Tabla X: Valoración del RMR4 para la EGM3. Según el autor.

Por tanto, el RMR4 mínimo tiene un valor de 24, mientras que el RMR4 máximo un valor de 25.

RMR5

Se observa que la roca se encuentra completamente seca, por tanto RMR5=15.

RMRbásico

A partir de los valores estimados anteriormente, se calcula el RMRbásico, tanto el mínimo como el máximo:

$$RMRbásicomím. = 6 + 19 + 6 + 24 + 15 = 70\%$$

$$RMRbásicomáx. = 15 + 19 + 6 + 25 + 15 = 80\%$$

RMRcorregido

El RMRcorregido se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$RMRcorregido = RMRbásico - RMR6$$

En este punto, se considera como familia de discontinuidad principal la veta-filón mineralizado, el cual tiene una orientación de 85/85. Por un lado, para la galería, cuya dirección N85 se considera perpendicular al filón, por lo que la situación estructural es favorable: puntuación en -2. Por otro lado, el crucero con dirección N350 y N175, y paralelo al propio filón; su situación estructural es desfavorable, con un valor de -10.

Entonces:

$$RMR_{\text{corregido mím Galería}} = 70 - 2 = 68\%$$

$$RMR_{\text{corregido máx Galería}} = 80 - 2 = 78\%$$

$$RMR_{\text{corregido mím Crucero}} = 70 - 10 = 60\%$$

$$RMR_{\text{corregido máx Crucero}} = 80 - 10 = 70\%$$

Por tanto, para la EGM3, RMR=60-78%. La calidad del macizo rocoso es de clase III y II, es decir, de calidad media y buena.

A continuación, se ha calculado la Q de Barton. Los valores estimados para cada parámetro son los siguientes:

- RQD=93,85%
- Índice de diaclasamiento: se han observado hasta tres familias de diaclasas principales JF, J1 y J2; pero, debido a la escasa persistencia de dichas discontinuidades, se considera que el macizo rocoso está afectado por una familia de diaclasas principal y el resto ocasionales. Y como se trata de una intersección, $J_n = 3 * 3 = 9$.
- Índice de rugosidad Jr: Dado que los labios de la roca presentan pequeño desplazamientos y la rugosidad es del tipo ondulada y lisa, Jr=2.
- Índice de alteración Ja: Se ha observado que los labios de las juntas se encuentran inalterados o ligeramente meteorizados, por tanto, Ja=1.

- Coeficiente reductor por presencia de agua J_w : Excavación en este punto completamente seca, por tanto, $J_w=1$.
- Condiciones tensionales SRF: Por un lado sabemos que la roca es competente bajo influencia del estado tensional.

Por otro lado, $\sigma_{c(mín)} = 50 \text{ MPa}$; $\sigma_{c(máx)} = 250 \text{ MPa}$ y que $\sigma_1 = 0,026 * 200 = 5,2 \text{ MPa}$. Entonces:

$$\text{Mím } \frac{\sigma_{c\text{mím}}}{\sigma_1} = \frac{50}{5,2} = 9,62$$

$$\text{Máx } \frac{\sigma_{c\text{máx}}}{\sigma_1} = \frac{250}{5,2} = 48,08$$

Entonces; SRF=0,5-1-2. Se toma el valor del medio. Por tanto. SRF=1.

Valor de Q de Barton:

$$Q: Q = \frac{93,85}{9} * \frac{2}{1} * \frac{1}{1} = 20,9$$

La roca de la estación 3 es, según el índice Q, de calidad buena.

4.2.4 Estación Geomecánica 4 (EGM4)

Esta estación se levantó entre los puntos topográficos 26 y 27. En general, se aprecian andesitas porfídicas plagioclásicas. La calidad del macizo rocoso para tomar los datos geomecánicos

y levantar aquí esta estación es excelente.

A continuación, las propiedades, características y principales parámetros geomecánicos de las juntas, de la matriz y del macizo rocoso:

- Litología: Andesitas plagioclásicas de textura porfídica de la Fm. Macuchi. Presentan una densidad media, con colores grises oscuros. Sin meteorización.
- Se encuentra a una profundidad aproximada de 150 metros.
- Resistencia a compresión: se estimó mediante el martillo de geólogo, dando como resultado R5, es decir, entre 100 y 250 MPa, tratándose de una roca muy dura.
- Grado de meteorización del macizo y de las juntas: GMI.
- Juntas por metro lineal o λ : 4.
- Espaciamiento medio de 300 mm.
- La continuidad se mide entre 1-3 metros.
- La apertura de las juntas es menor a 0,1 mm, incluso se pueden encontrar cerradas.
- La rugosidad de los planos de las juntas es del tipo ligeramente rugosa a rugosa, con un JRC variante entre 4-6 y 16-18.
- El macizo se encuentra completamente seco.

- No se observa ningún tipo de relleno.

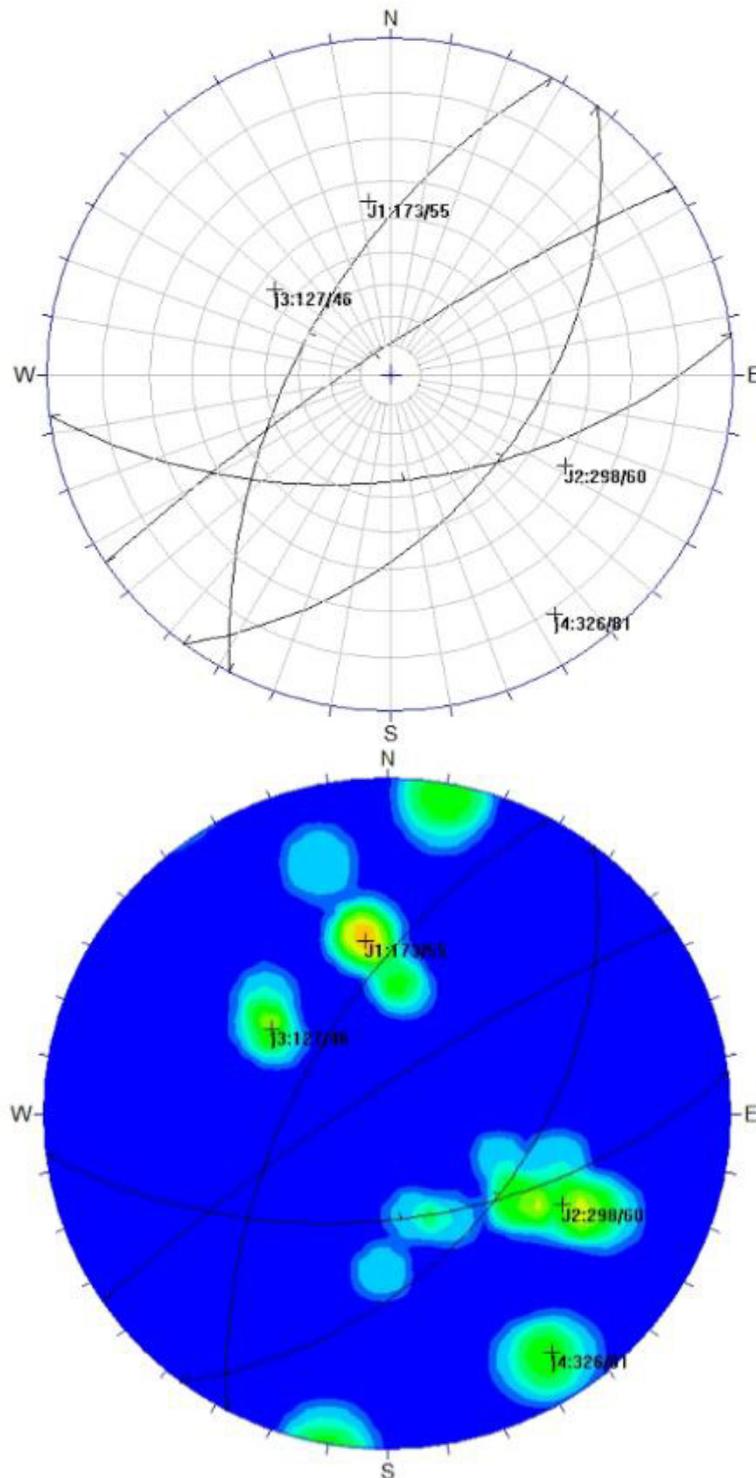


Figura 28: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM4. Según el autor.

Se observan hasta tres familias principales con algunas diaclasas ocasionales. Las familias son las siguientes: J1 173/55, J2 298/60 y j3 127/46. Ocasionales j4 326/81.

A partir de los datos geológico-geomecánicos tomados, se llevará a cabo el cálculo del RQD, RMR y Q de Barton, respectivamente.

El RQD se calculó a partir de la fórmula dada por Priest y Hudson (1981), con el índice λ :

$$RQD = 100 * e^{-0,1*\lambda} * (0,1 * \lambda + 1);$$

Como en esta estación $\lambda = 4$, entonces:

$$RQD = 100 * e^{-0,1*4} * (0,1 * 4 + 1) = 93,85\%$$

Según la clasificación de Deere (1969), la calidad del macizo rocoso es buena.

A continuación se calculará el RMR básico y posteriormente el RMR corregido:

Sabemos que $RMR_{básico} = RMR1 + RMR2 + RMR3 + RMR4 + RMR5$;

RMR1

Como la RCS del macizo rocoso fue estimado entre 100 y 250 MPa, por tanto, tenemos un $RMR1_{mím}=10$ y un

RMR_{máx}=15.

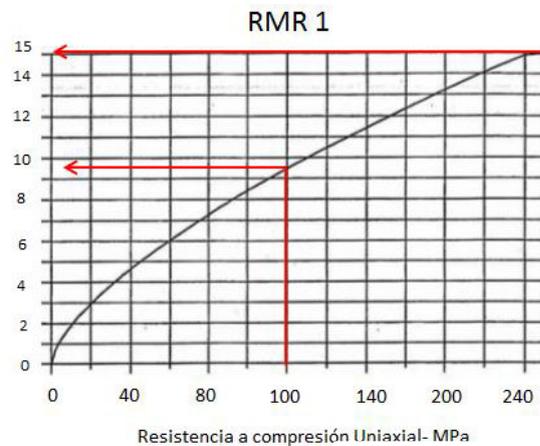


Figura 29: Valoración del RCS (RMR1) para la EGM4. Según el autor.

RMR2

Como el RQD=93,85%, se obtiene que RMR2=.19.

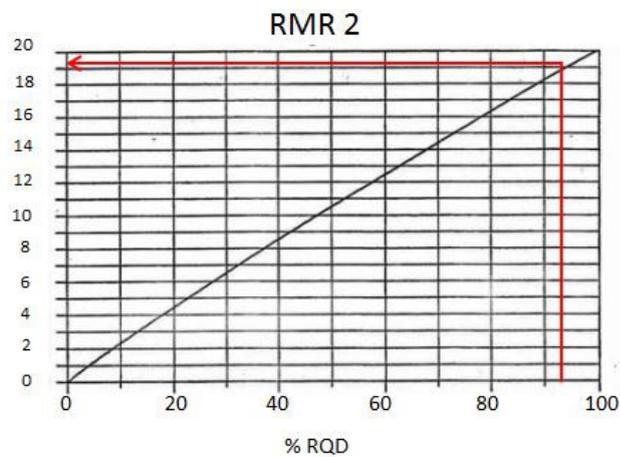


Figura 30: Valoración del RQD (RMR2) para la EGM4. Según el autor.

RMR3

Como la separación de juntas se ha medido en 300 mm,

RMR3=10.

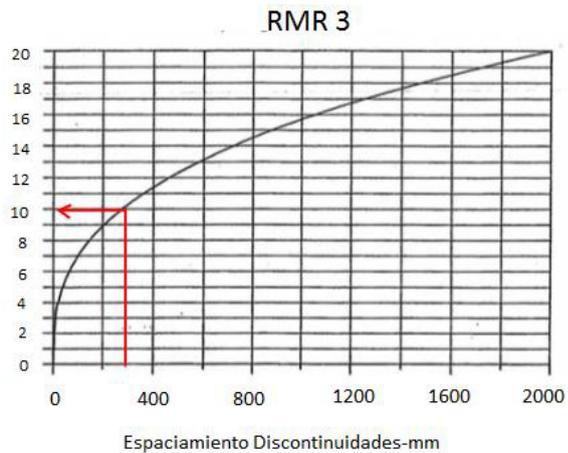


Figura 31: Valoración del espaciado medio (RMR3) para la EGM4. Según el autor.

RMR4

Este factor se obtuvo con la puntuación de los siguientes parámetros:

Parámetro	Descripción	Valor considerado
Persistencia y continuidad	1-3 metros	4
Apertura	De 0,1 mm a nada	5-6
Rugosidad	Lig. Rugosa a rugosa	3-5
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Grado I (Macizo Sano)	6
Total Mím-Máx.		24-27

Tabla XI: Valoración de RMR4 para la EGM4. Según el autor.

Por tanto, el RMR4 tiene un valor mínimo de 24 y un máximo de 27.

RMR5

En esta estación la excavación se encuentra completamente seca. Por tanto $RMR5=15$.

RMRbásico

A partir de los valores estimados anteriormente, se calcula el RMRbásico, tanto el mínimo como el máximo:

$$RMRbásicomím. = 10 + 19 + 10 + 24 + 15 = 78\%$$

$$RMRbásicomáx. = 15 + 19 + 10 + 27 + 15 = 86\%$$

RMRcorregido

El RMRcorregido se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$RMRcorregido = RMRbásico - RMR6$$

En esta estación, la dirección del túnel es de N68,5. La familia principal de discontinuidades J1 tiene una orientación de 173/55, por lo que la dirección de dicha familia es paralela al túnel y con buzamiento mayor a 45°; por tanto, la situación es muy desfavorable, con una puntuación de -12.

Entonces:

$$RMRcorregidomím = 78 - 12 = 66\%$$

$$RMRcorregidomáx = 86 - 12 = 74\%$$

Por tanto para la EGM4, hemos obtenido, en general, un $RMR=66-74\%$. La clase de la roca es de tipo II, es decir, de calidad buena.

A continuación, se ha calculado la Q de Barton. Los valores estimados para cada parámetro son los siguientes:

- RQD=93,85%.
- Índice de diaclasamiento: se han descrito hasta tres familias de diaclasas con algunas ocasionales, por tanto, $J_n=12$.
- Índice de rugosidad J_r : los planos de las juntas pueden ser ondulados y rugosos, por tanto, $J_r=3$.
- Índice de alteración J_a : Roca y paredes de juntas completamente sanas, únicamente ocasionales zonas manchadas. Por tanto, $J_a=1$.
- Coeficiente reductor por presencia de agua J_w : Excavación totalmente seca. $J_w=1$.
- Condiciones tensionales SRF: Por un lado sabemos que la roca es competente encontrándose bajo la influencia del estado tensional. Por otro, $\sigma_c = 100 - 250$ MPa y $\sigma_1 = 0,026 * 150 = 3,9$ MPa. Obtenemos que $\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 25,64-64,10$. Entonces; SRF=1.

Valor de Q de Barton:

$$Q = \frac{93,85}{12} * \frac{3}{1} * \frac{1}{1} = 23,46$$

Por tanto, la roca es de calidad buena.

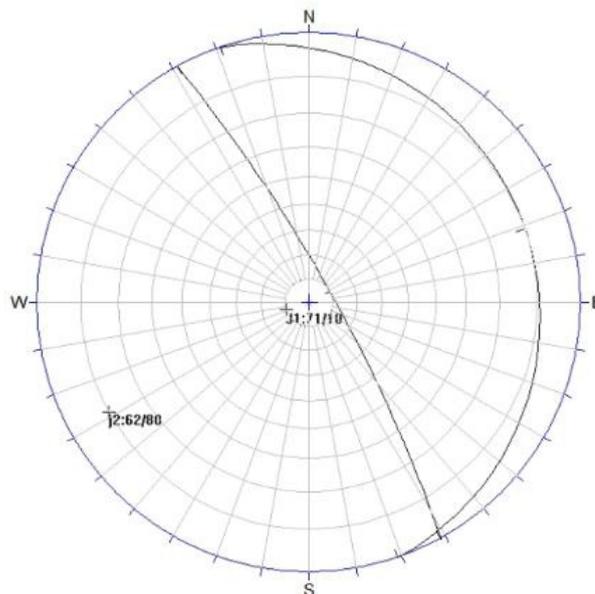
4.2.5 Estación Geomecánica 5 (EGM5)

La Estación Geomecánica 5 se llevó a cabo entre los puntos topográficos 2 y 3. Se aprecian andesitas porfídicas plagioclásicas muy fracturadas, a menudo formando cuñas inestables. La calidad del macizo rocoso para tomar los datos geomecánicos y levantar aquí esta estación es excelente.

A continuación, las propiedades, características y principales parámetros geomecánicos de las juntas, de la matriz y del macizo rocoso:

- Litología: Andesitas plagioclásicas de textura porfídica negras de la Fm. Macuchi. Se observan abundantes cuñas completamente inestables tanto en el techo como en los hastiales y algunos bloques caídos. Presentan una densidad media, rompiéndose las muestras con dos golpes de martillo. Meteorización ligera de grado II, tanto en la matriz rocosa como en los planos de juntas.
- Se encuentra a una profundidad aproximada de 25 metros.
- Resistencia a compresión: se estimó mediante el martillo de geólogo, dando como resultado R4, es decir, entre 50 a 100 MPa.

- Grado de meteorización del macizo y de las juntas: GMII.
- Juntas por metro lineal o λ : 9.
- Espaciamiento medio entre 60 y 200 mm.
- La continuidad se ha medido entre 1 a 10 metros.
- La apertura de las juntas varía entre 1mm y menos de 0,1mm.
- La rugosidad de los planos de las juntas varía entre ligeramente ondulada y lisa, con un JRC mayoritariamente de 4-6.
- El macizo se encuentra ligeramente húmedo.
- No se observa ningún tipo de relleno, por lo que las juntas se encuentran abiertas.



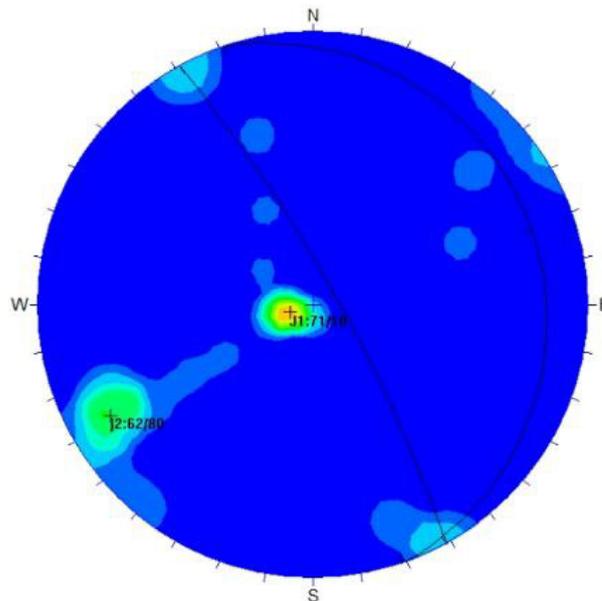


Figura 32: Estereograma de las principales familias de diaclasas, EGM4. Según el autor.

Se observan dos familias principales con algunas diaclasas ocasionales. Como en esta estación se han observado numerosas cuñas, posiblemente haya mínimo tres familias, aunque con DIPS solo se han descrito: J1:80/48 y j2:62/80.

A partir de los datos geológico-geomecánicos tomados, se llevará a cabo el cálculo del RQD, RMR y Q de Barton, respectivamente.

El RQD se calculó a partir de la fórmula dada por Priest y Hudson (1981), con el índice λ :

$$RQD = 100 * e^{-0,1*\lambda} * (0,1 * \lambda + 1);$$

Como en esta estación $\lambda = 9$, entonces:

$$RQD = 100 * e^{-0,1*9} * (0,1 * 9 + 1) = 77,25\%$$

Según la clasificación de Deere (1969), la calidad del macizo rocoso es buena.

A continuación se calculará el RMR básico y posteriormente el RMR corregido:

Sabemos que $RMR_{básico} = RMR1 + RMR2 + RMR3 + RMR4 + RMR5$;

RMR1

Como la RCS del macizo rocoso fue estimado entre 50 y 100 MPa, por tanto, $RMR1_{mím}=5$ y $RMR1_{máx}=9$.

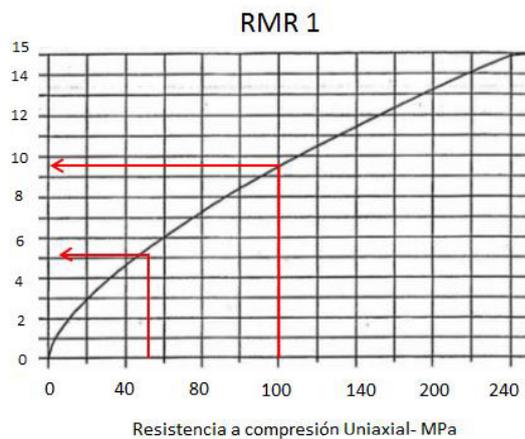


Figura 33: Valoración de RCS (RMR1) para la EGM5. Según el autor.

RMR2

Como el $RQD=77,25\%$, se obtiene que $RMR2=16$.

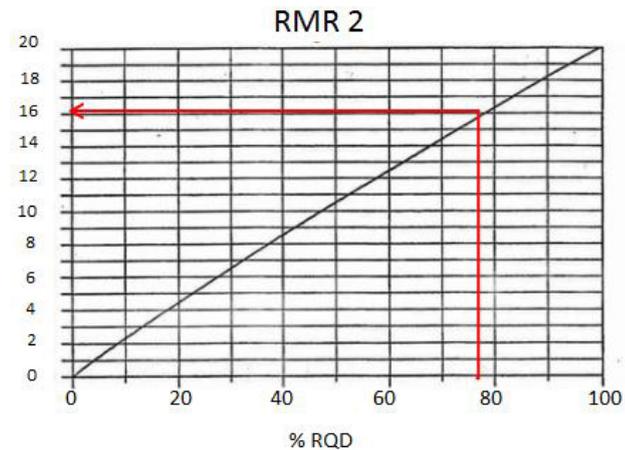


Figura 34: Valoración del RQD (RMR2) para la EGM5. Según el autor.

RMR3

Como la separación de juntas varía entre 60 mm. y 200 mm., obtenemos dos valores de RMR3 distintos, es decir, un RMR3 mínimo y RMR3 máximo, los cuales tienen valores respectivos de 5 y 9.

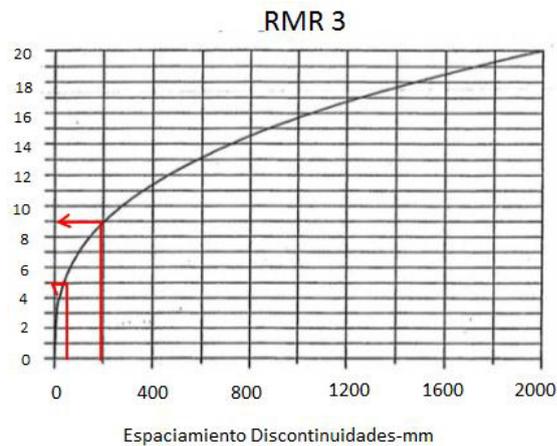


Figura 35: Valoración del espaciado medio (RMR3) para la EGM5. Según el autor.

RMR4

Este factor se obtuvo con la puntuación de los siguientes

parámetros:

Parámetro	Descripción	Valor considerado
Persistencia y continuidad	De 1-3 hasta 3-10 metros	2-4
Apertura	De <0,1 mm hasta 1mm.	4-5
Rugosidad	Ondulada o suave	0-1
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Grado II (Ligeramente alterado)	5
Total Mím-Máx.		17-21

Tabla XII: Valoración del RMR4 para la EGM5. Según el autor.

Por tanto, el RMR4 tiene un valor total de 17-21.

RMR5

Se observa que la roca se encuentra ligeramente húmeda. Por tanto, RMR5=10

RMRbásico

A partir de los valores estimados anteriormente, se calcula el RMRbásico, tanto el mínimo como el máximo:

$$RMRbásicomím. = 5 + 16 + 5 + 17 + 10 = 53\%$$

$$RMRbásicomáx. = 9 + 16 + 9 + 21 + 10 = 65\%$$

RMRcorregido

El RMRcorregido se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$RMRcorregido = RMRbásico - RMR6$$

En esta estación, se considera como familia de diaclasa

principal J1, la cual es subhorizontal. Por tanto, la dirección de buzamiento o rumbo no se tiene en cuenta. La situación estructural será, por tanto, desfavorable. Su valor es de -10.

Entonces:

$$RMR_{\text{corregido m\u00edn}} = 53 - 10 = 43\%$$

$$RMR_{\text{corregido m\u00e1x}} = 65 - 10 = 55\%$$

Por tanto para la EGM5, hemos obtenido un RMR=43-55%. La clase de la roca es de tipo III, es decir, del tipo regular-normal.

A continuación, se ha calculado la Q de Barton. Los valores estimados para cada par\u00e1metro son los siguientes:

- RQD=77,25%.
- \u00cdndice de diaclasamiento: se han observado mediante DIPS solo dos familias de juntas, aunque como en esta estaci\u00f3n se han apreciado numerosas cu\u00f1as inestables, se consideran m\u00ednimo tres familias diferentes de discontinuidades. Por tanto, $J_n=9$.
- \u00cdndice de rugosidad J_r : Dado que los labios de la roca presentan peque\u00f1o desplazamientos y la rugosidad se estim\u00f3 en ondulada y lisa, $J_r=2$.
- \u00cdndice de alteraci\u00f3n J_a : Se ha observado que los labios de

las juntas se ligeramente alterados-meteorizados, por tanto, $J_a=2$.

- Coeficiente reductor por presencia de agua J_w : El macizo rocoso se encuentra seco o con algunas filtraciones muy locales. Entonces, $J_w=1$.
- Condiciones tensionales SRF: Por un lado sabemos que la roca es competente, encontrándose bajo la influencia del estado tensional. Por otro $\sigma_c = 50 - 100$ MPa y $\sigma_1 = 0,026 * 25 = 0,65$ MPa. Obtenemos que $\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 76,92-153,85$. Por tanto, $SRF=1$.

Valor de Q de Barton:

$$Q = \frac{77,25}{9} * \frac{2}{2} * \frac{1}{1} = 8,6$$

Por tanto, la roca es de calidad media.

4.3 Estimación de las necesidades de sostenimiento a partir de Q de Barton

A partir del Índice Q de Barton, se ha estimado el grado de estabilidad de la excavación en cada una de las estaciones geomecánicas. Primero, en función del vano o ancho de la mina.

Posteriormente, a partir del D equivalente.

4.3.1 Estabilidad en función Vano, D equivalente vs Q de Barton

Los valores de Q junto con el ancho medio de cada EGM, se resumen en la siguiente tabla.

Estaciones Geomecánicas	Vano o ancho en metros	Índice Q
1	1,2	60,09-91
2	Galería: 2,21	4,3
	Crucero: 1,94	
3	Galería: 1,6	20,9
	Crucero: 1,35	
4	1,3	23,46
5	1,05	8,6

Tabla XIII: Ancho de la excavación e Índice Q para cada EGM. Según el autor.

A partir de la anterior tabla, se calcula el grado de estabilidad de cada estación geomecánica (Figura 35)

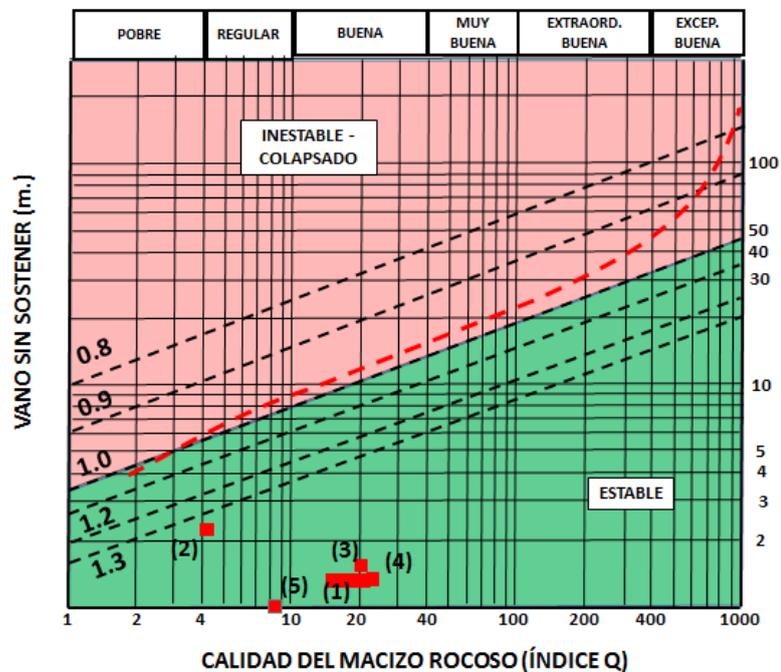


Figura 36: Grado de estabilidad para cada estación geomecánica (vano vs Q)

Los números indican la estación geomecánica dada y los cuadros rojos el valor Vano/Q para cada EGM. Según el autor.

Se observa, entonces, que al tenerse en cada una de las estaciones geomecánicas un ancho menor a 4-10 metros, el túnel es autoportable, es decir, se sostiene sin refuerzos. Si se excediera el ancho del túnel entre los 4 a 10 metros, según el caso, la mina perdería estabilidad, ya que el efecto escala es mayor y por tanto las cuñas son más grandes y peligrosas

A continuación se estima el grado de estabilidad y el tipo de refuerzo a llevar a cabo en función de D equivalente e Índice Q.

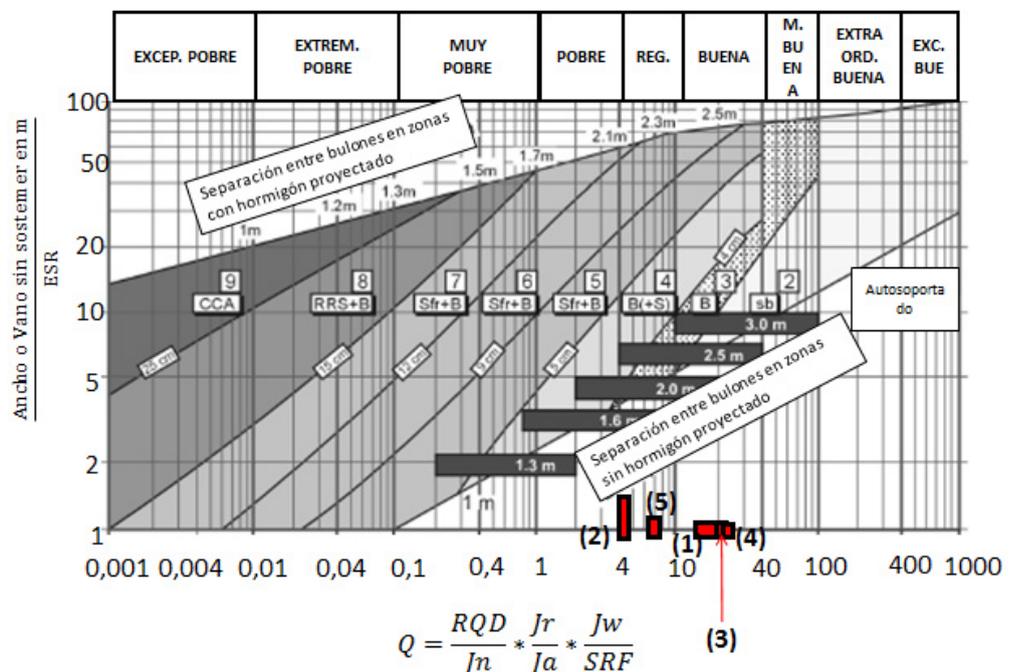


Figura 37: Representación de las estaciones geomecánicas (D equivalente vs Q)

Los números indican la estación geomecánica. Los cuadros y

rectángulos rojos indican la relación D Equivalente vs Q de Barton para cada EGM. Según el autor.

En la anterior figura se deduce que todas las estaciones geomecánicas se encuentran en la zona de estabilidad, sin necesidad de ningún tipo de sostenimientos. Por tanto son completamente estables y se pueden considerar autosoportantes. Como en el caso anterior, hay que tener en cuenta el ancho máximo a excavar y por tanto el efecto escala y la intersección de cuñas de mayor tamaño, subsecuentemente.

Esta estabilidad se debe a que el ancho de la excavación en todas las estaciones es pequeño, sin superar los 2,5 metros, junto con Índices Q medios-altos. Por otro, el ESR o factor de seguridad de la labor minera es alto, entre 1,6 y 3.

4.4 ANÁLISIS DE CUÑAS EN ESTACIONES GEOMECÁNICAS

Primeramente, con el programa ROCDATA v3 se realizó el cálculo de los parámetros de cohesión (c) y el ángulo de rozamiento interno residual (ϕ_r).

Posteriormente, se llevó a cabo la estimación de la geometría y el factor de seguridad de las cuñas mediante el programa UNDWEDGE v3 por medio de los criterios Mohr-Coulomb y Barton-

Bandis.

4.4.1 Cálculo de la cohesión y ángulo de rozamiento interno residual mediante ROCDATA

En primer lugar, se tiene que:

- JRC_0 tiene como valor predominante 4-6, por lo que el valor a considerar es $JRC_0=5$.
- $JCS_0=48$ MPa.
- Como las litologías predominantes son andesitas-andesitas basálticas, se considerarán como basaltos para la elección del ángulo de rozamiento básico (ϕ_b)=31°-36°.
- $L_n= 2$ metros (se este valor al ser la distancia media considerada en la formación de cuñas) y $L_0=10$ cm.

A partir de este primer paso, se debe tener en cuenta el efecto escala para cada uno de estos parámetros, de tal forma que se llevará la corrección de JRC. Entonces:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02JRC_0}$$

$$JRC_n = 5 \left(\frac{2}{0,1} \right)^{-0,02*5} = 3,71$$

Posteriormente se debe llevar a cabo la corrección de JCS:

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03JRC_0}$$

$$JCS_n = 48 \left(\frac{2}{0,1} \right)^{-0,03*5} = 30,63 \text{ MPa}$$

Según el software ROCDATA, para un basalto con un ángulo de rozamiento básico de 31°-36°, se tiene que:

$$\phi_r = 33,5^\circ$$

Se debe, como último paso, indicar el peso específico de la roca y la profundidad media a la que se encuentra la excavación. Se señalan a continuación:

$$\gamma = 0,026 \text{ MN/m}^3$$

$$Z = 200 \text{ m}$$

A partir de lo anteriormente expuesto, se obtienen los siguientes resultados de cohesión y ángulo de rozamiento del Criterio de Mohr-Coulomb, el cual se utilizará posteriormente, en el programa UNDWEDGE:

- $C = 0,06 \text{ MPa}$
- $\varphi = 36,49^\circ$

A través del programa informático UNDWEDGE v3, se han obtenido distintos resultados en función del Criterio de rotura (Mohr-Coulomb y Barton-Bandis) que se utilizó en cada estación geomecánica.

Al utilizar el criterio de Mohr-Coulomb, se consideró dos casos diferentes, uno real ($C_1=0,06 \text{ MPa}$) y un caso extremo ($C_2=0 \text{ MPa}$),

manteniendo constante el ángulo phi ($\varphi = 36,49^\circ$).

En cambio, al considerar el criterio de Barton-Bandis, se tiene que:

- $JRC_n=3,71$
- $JCS_n=30,63$
- $\phi_r=33,5$

4.4.2 Caracterización y Factor de Seguridad de cuñas

- Para la estación geomecánica 1 (EGM1), en la cual se han modelizado dos secciones diferentes del túnel, una de ellas junto a la falla F1 y la otra diez metros de distancia, se tienen los siguientes datos estructurales:

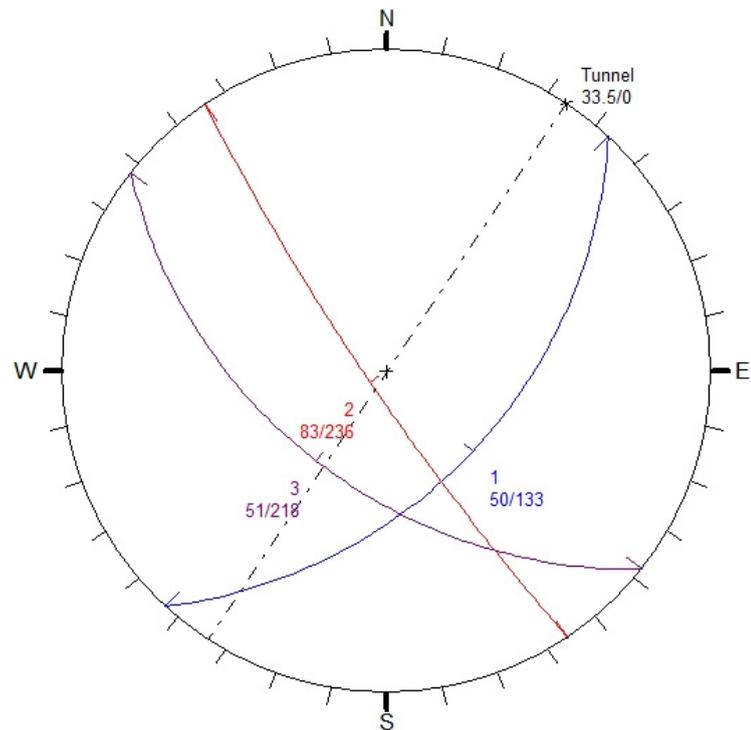


Figura 38: Red estereográfica con los datos estructurales de las juntas y eje del túnel en la EGM1. Según autor.

Los datos que se han utilizado para el modelo UNDWEDGE de la estación 1, son los indicados en la siguiente tabla:

JUNTAS	DIP	DIP DIR.	C ₁	C ₂	φ	JRCn	JCSn	ϕ_r
J1	50	133	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J2	83	236	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J3	51	218	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
Eje Túnel	N33,5°							

Tabla XIV: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM1.

Los resultados para la estación 1, son los siguientes:

Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C ₁	C ₂				
2 (Falla F1)	Clave y hastial	8,38	0,79	1,2	23,6	5,93	
2	Clave y hombro	32,04	0,87	1,33	0,4	1,76	

Tabla XV: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 1. Según el autor.

- En la estación geomecánica 2 (EGM2), solo se han descrito dos familias de diaclasas principales, junto con algunas ocasionales. Por tanto, obtenemos modelos distintos en función de los planos de discontinuidades que tomemos:

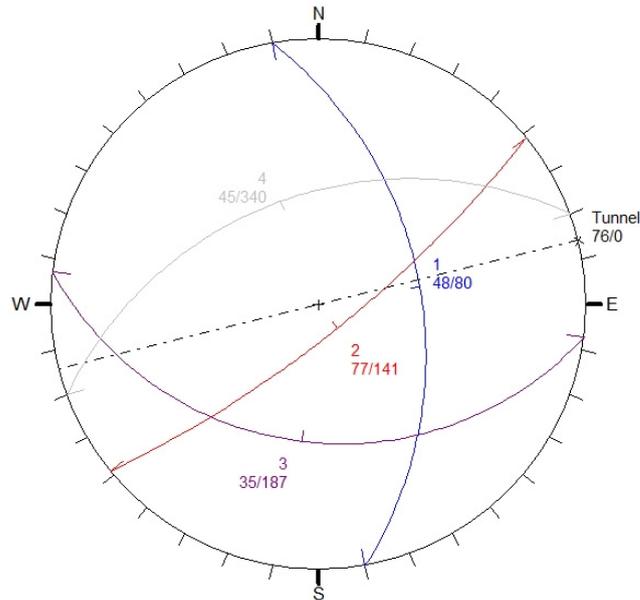


Figura 39: Red estereográfica con los datos estructurales de las juntas y eje del túnel en la EGM2. Según el autor.

Los datos que se han utilizado para el modelo UNDWEDGE de la estación 2, son los indicados en la siguiente tabla:

Juntas	Dip	Dip Dir.	C1	C2	φ	JRCn	JCSn	ϕ_r
J1	48	80	0,06	0	36.49	3,71	30,63	33,5
J2	77	141	0,06	0	36.49	3,71	30,63	33,5
j3	35	187	0,06	0	36.49	3,71	30,63	33,5
j4	45	340	0,06	0	36.49	3,71	30,63	33,5
Eje Túnel	N76°							

Tabla XVI: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM2. Según el autor.

- Para las juntas ocasionales con el plano 187/35, se han obtenido los siguientes modelos:

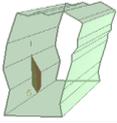
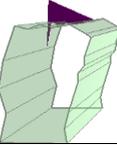
Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C ₁	C ₂				
5	Hastial	3,71	1,06	1,41	0,6	0,41	
6	Clave	4,8	0,17	0,26	2,3	1,02	

Tabla XVII: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 187/35. Según el autor.

- Considerando el plano de discontinuidad 340/45, entonces se obtienen los siguientes resultados:

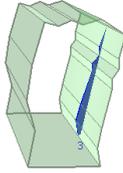
Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C ₁	C ₂				
3	Hastial	30,70	1,32	1,82	0,3	0,1	
4	Techo	9,1	0,9	1,25	9,9	2,78	

Tabla XVIII: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 340/45. Según el autor.

- En el caso de la estación 3(EGM3), se han observado dos familias de diaclasas principales de escasa persistencia junto con una falla principal F5. Se obtiene los siguientes modelos:

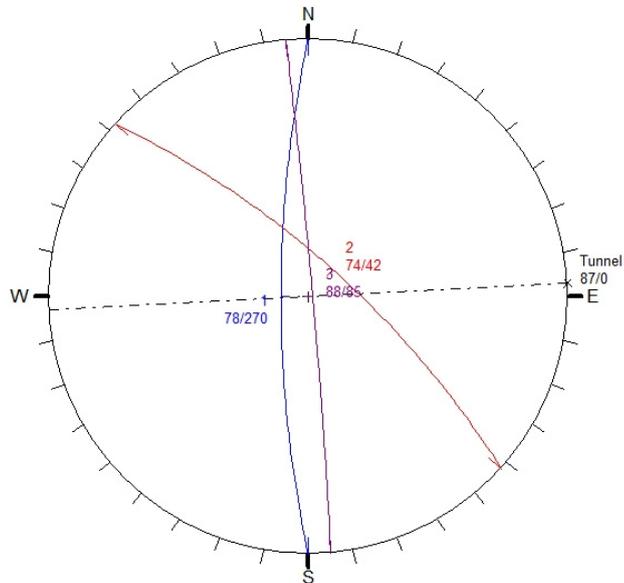


Figura 40: Red estereográfica con los datos estructurales de las juntas y eje del túnel en la EGM3. Según el autor.

Juntas	Dip	Dip Dir.	C_1	C_2	ϕ	JRCn	JCSn	ϕ_r
J1	78	270	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J2	74	42	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J3	88	85	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
Eje Túnel	N87°							

Tabla XIX: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM3. Según el autor.

Los resultados obtenidos en la EGM3, a partir de los datos señalados anteriormente, son los siguientes:

Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C ₁	C ₂				
6	Techo, hombro y hastial	21,8	0,66	1,01	1,5	2,23	

Tabla XX: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 3. Según el autor.

- Para la estación geomecánica 4 (EGM4), se consideraron solo tres familias de diaclasas. La proyección estereográfica de dichas discontinuidades con respecto a la dirección del túnel es la siguiente.

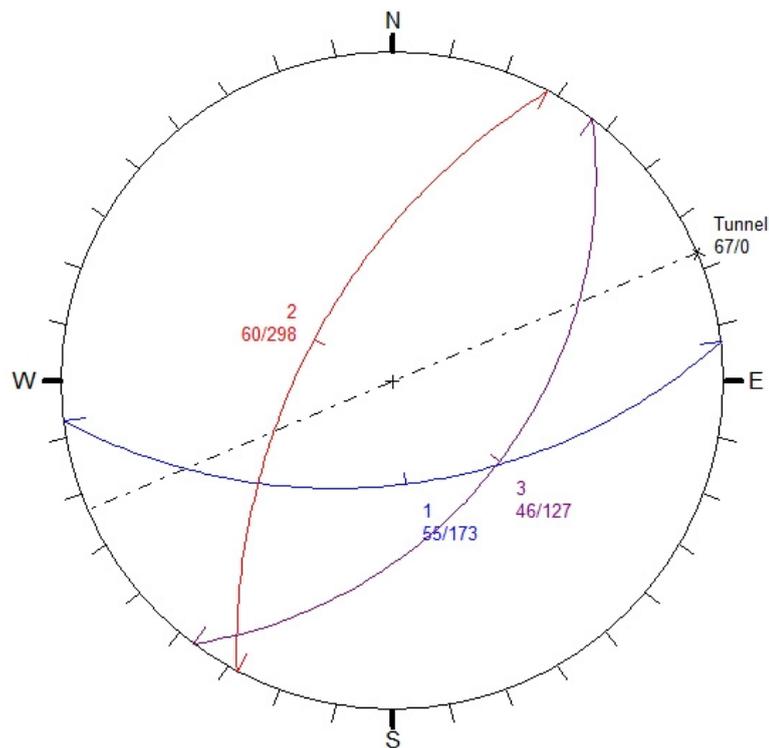


Figura 41: Red estereográfica con los datos estructurales y el eje del túnel en la EGM4.

Juntas	Dip	Dip Dir.	C ₁	C ₂	φ	JRCn	JCSn	ϕ_r
J1	55	173	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J2	60	298	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J3	46	127	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
Eje Túnel	N67°							

Tabla XXI: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM4. Según el autor.

Los resultados obtenidos para la estación #4 son los siguientes:

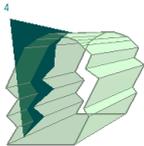
Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C ₁	C ₂				
4	Hombro y hastial	8,1	0,52	0,76	3	1,28	

Tabla XXII: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 4. Según el autor.

- En el caso de la estación geomecánica 5 (EGM5), se han observado in situ la formación de cuñas de escalas decimétricas a métricas muy inestables, tal como se describió en el subcapítulo 4.4. En contraste, el programa DIPS 5.0 nos ha dado como resultado que en esta estación solo hay presencia de dos familias de discontinuidades principales. Se toma en cuenta por tanto que debe haber al menos otra familia de discontinuidad, ya sea ésta principal u ocasional (se obtiene, por medio del DIPS, que esta familia podría ser

331/88 o 152/86. Los datos vienen expuestos a continuación:

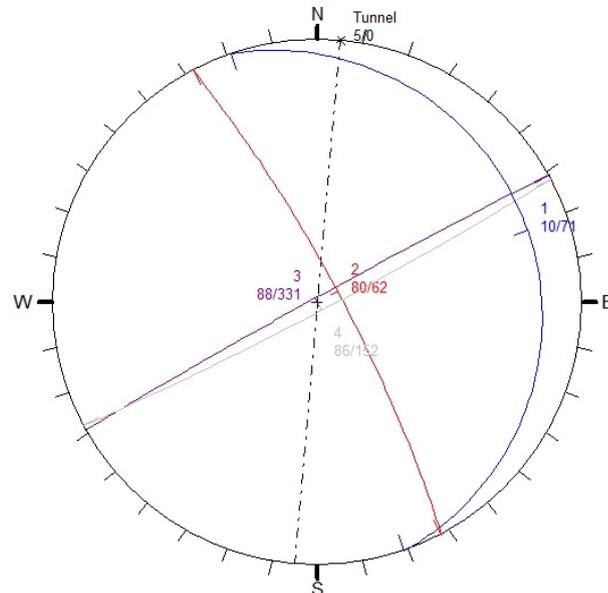


Figura 42: Red estereográfica con los datos estructurales y el eje del túnel en la EGM5.

Para la estación 5 tenemos los siguientes datos:

Juntas	Dip	Dip Dir.	C_1	C_2	φ	JRCn	JCSn	ϕ_r
J1	10	71	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
J2	80	62	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
j3	88	331	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
j4	86	152	0,06	0	36,49	3,71	30,63	33,5
Eje Túnel	N5°							

Tabla XXIII: Datos estructurales y parámetros geomecánicos a utilizar en el estudio de la EGM5. Según el autor.

- Para el caso del plano j3 331/88:

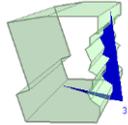
Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C1	C2				
3	Hastial	Estable	Estable	Estable	0,4	0,3	
6	Clave y hastial	15,5	0,13	0,22	0,2	0,22	

Tabla XXIV: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 331/88. Según el autor.

- Para el caso del plano j4 152/86:

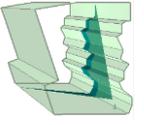
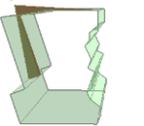
Nº	Zona Cuña	FS MohrCoulomb		FS Barton Bandis	Peso (ton)	Altura Ápice (m)	Modelo
		C ₁	C ₂				
4	Hastial	Estable	Estable	Estable	0,6	0,42	
5	Clave y Hastial	22,5	0,18	0,3	0,3	0,26	

Tabla XXV: Características y geometría de cuñas obtenidas en la estación geomecánica 2 considerando el plano 152/86. Según el autor.

4.5 Resumen y análisis de resultados

La mina San Juan se encuentra ubicada dentro de la Fm. Macuchi (Paleoceno-Eoceno Medio), la cual está conformada por andesitas y andesitas basálticas, como demostró la descripción de visu de muestras de roca. Estas rocas se encuentran afectadas por dos

lineamientos estructurales distintos: Sistema de Falla A, de dirección NW-SE y el Sistema de Falla B, de dirección NE-SW. A este último grupo de fallas se le relaciona directamente con los cuerpos intrusivos miocénicos causantes de las mineralizaciones y alteraciones hidrotermales.

En esta mina se ha llevado a cabo una metodología que consistió en un levantamiento topográfico, geológico y geomecánico, se han obtenido los siguientes valores de clase y calidad del macizo rocoso a partir de las clasificaciones geomecánicas descritas y calculadas en cada EGM. Los resultados, en general, son los siguientes: a) RQD=77,25%-93,85%, por tanto calidad buena-muy buena; b) RMR=42-78%, por lo cual la clase de la roca es tipo III-II, con una calidad que varía de media a buena y c) $Q=4,3-23,64$, con una calidad media-buena.

Por otro lado, según los gráficos de los sostenimientos que relacionan los parámetros Vano-Ancho sin sostener en m., ESR, Factor de Seguridad e Índice Q, se obtiene que la mina San Juan es estable, siendo su factor principal en la estabilidad, el ancho de la excavación. Según la topografía levantada, el ancho máximo de la labor minera no supera los 2,5 m. Por otro lado, mediante las gráficas de sostenimientos se ha llegado al resultado de que el umbral de estabilidad se encuentra en los vanos máximos

comprendidos entre 6-10 metros. Por tanto, si se superan dichos anchos, se aumenta el efecto escala, entrando en juego un mayor número de discontinuidades y, entonces, se intersectarán a otras cuñas de grandes dimensiones, las cuales podrían afectar de manera directa a la estabilidad de la excavación.

Por último, el análisis de cuñas mediante la herramienta digital UNDWEDGE ha permitido, por medio de los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis, obtener distintos factores de seguridad, así como distintas características geométricas y físicas de cada cuña modelizada. Para:

- Criterio $c=0$ MPa; Para todas las estaciones, las cuñas son totalmente estables, con FS 30 veces mayor al límite $FS=1$. Se puede observar que no es un buen criterio para análisis de cuñas, ya que se alejan mucho de la realidad.
- Criterio $c=0,06$ MPa, se obtienen FS que se aproximan a 1, por lo que son valores que se consideran reales.
- Criterio Barton-Bandis, se obtienen a igual que el anterior criterio, valores muy cercanos a 1, y por tanto, muy aproximados a la realidad. Se debe añadir que este criterio tiene en cuenta, a diferencia del anterior, distintos parámetros tenso-deformacionales, tales como la resistencia

al corte de las discontinuidades, la resistencia uniaxial y el efecto escala.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A partir de lo anteriormente expuesto, se concluye lo siguiente:

1. La mina San Juan se encuentra afectada por una serie de fallas normales con direcciones NNW-SSE y NE-SW, las cuales se pueden separar en dos Sistemas de Fallas, A y B, respectivamente. Estas vienen estrechamente relacionadas con las diaclasas, identificándose en la mina hasta tres familias de diaclasas distintas con otras ocasionales. Las fallas pueden dar lugar a vetas con minerales de rendimiento económico en una dirección de NNW-SSE.
2. Las muestras de roca examinadas permiten deducir que la Mina San Juan se encuentra ubicada dentro de la Fm. Macuchi (Paleoceno-Eoceno Medio), consistiendo ésta en andesitas, andesitas basáltica y una ocasional serpentinita (basalto metamorfizado). Así mismo, la paragénesis mineral observada tanto en las muestras como en las vetas es: pirita + calcopirita + pirrotina + bornita + magnetita + óx. Fe-Mn + Au. También pueden aparecer arsenopirita, esfalerita, galena,

molibdenita, cuarzo y epidota.

3. La mina San Juan se encuentra ubicada en un área de depósitos predominantemente volcánicos (Fm. Macuchi) y de naturaleza andesítica-basáltica y de edad paleocena-eocénica, la cual se encuentra afectada por intrusivos granodioríticos, dioríticos y gabrosos responsables de la fracturación y mineralización cortical. Otros depósitos aflorantes son los siliciclásticos de la Fm. Yunguilla (Cretácico Sup.) y aluviones-culuviones cuaternarios.
4. La mina San Juan se caracteriza por ser en general, estable, ya que el macizo rocoso no se encuentra altamente fracturado, estando este conformado por andesitas y andesitas basálticas apenas meteorizadas. Además las dimensiones de la propia excavación permiten que las labores mineras sean autosoportadas. Se debe añadir de que si el ancho de la excavación se supera entre los 6 a 10 metros (el vano máximo depende de la zona de la mina), la galería se volvería inestable, dando lugar a la formación de cuñas y bloques y hasta posiblemente el derrumbe de la mina. A su vez, la carga litostática estimada para la profundidad media de la excavación (200 m.), considerando el peso específico de la roca en $0,026 \text{ MN/m}^3$, es de $\sigma_1 = 5,4 \text{ MPa}$.
5. Mediante el programa informático ROCDATA v3, de la casa RocScience, se ha obtenido el valor de la cohesión ($c=0,06 \text{ MPa}$) y el

valor del ángulo de rozamiento ($\phi = 36,49^\circ$).

6. Se ha elaborado un estudio de cuñas mediante el programa UNDWEDGE, empleando tres criterios diferentes de análisis: a) considerando cohesión y fricción en la juntas, b) considerando solo fricción y $c=0$ MPa y c) aplicando de forma estricta el criterio de Barton Bandis. En general, se aprecia que el criterio a) con cohesión salen factores de seguridad altísimos y los casos b) y c) son más parecidos entre sí y más coherentes con la realidad, además, de ser un criterio más conservador y seguro. Se considera, por tanto, más realista modelizar sin tener en cuenta la cohesión o con el criterio de Barton-Bandis. Cuando se produce la voladura y excavación del túnel, se abren las juntas y estas pierden su cohesión.
7. El hecho de tener valores de Q y RMR medios o altos no es incompatible con la presencia de cuñas; de hecho, las cuñas se forman en terrenos buenos. En terrenos malos, se desmoronan las galerías. Del análisis de Q, se ve que las galerías son estables, siendo esto observable en persona en la propia mina. También en esta excavación hay cuñas que se han diferenciado y que se han obtenido como resultado en el análisis de UNDWEDGE. Por tanto, son galería estables con algunas cuñas caídas ($FS < 1$), posiblemente, al realizar la voladura. Las cuñas, entonces, no comprometen la estabilidad.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda, durante el levantamiento topográfico de una mina, excavación o túnel, realizar la topografía espeleológica, ya que esta permite llevar a cabo cartografías topográficas de manera rápida, óptima y rápida.
2. Se recomienda el uso de estadillos normalizados durante el levantamiento geomecánico ya que estos permiten recoger abundante y valiosísima información geológica-geomecánica en muy poco espacio, pudiendo ser rápidamente transformado a formato digital.
3. Se recomienda, durante la realización de un estudio geomecánico de túneles, llevar a cabo las principales clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso (RQD, RMR y Q) y comparar sus resultados entre sí. Sin embargo, se concluye que el Índice Q es la mejor clasificación geomecánica a utilizar ya que tiene en cuenta las dimensiones de la mina y el factor de seguridad ESR, parámetros que las otras dos clasificaciones no tienen en cuenta.
4. Se recomienda no superar el ancho máximo de Autosoportado (6-10 metros), ya que de este vano máximo se pierde la estabilidad de la excavación y el efecto escala aumenta, dándose cuñas de mayor tamaño y peligrosidad.

5. Se recomienda, a la hora de llevar a cabo el modelaje y análisis de cuñas mediante el programa UNDWEDGE, utilizar el Criterio de Barton-Bandis para calcular el factor de seguridad, ya que es este criterio el que más se aproxima a la naturaleza, al considerar distintos parámetros tenso-deformacionales tales como la resistencia a compresión simple, la resistencia al corte de las discontinuidades y el efecto escala.
6. Se recomienda llevar a cabo más estudios, investigaciones y consultorías geológicas y geomecánicas en la Mina San Juan, incluyendo nuevas cartografías geológicas que permitan analizar más a fondo la estratigrafía, estructura, mineralogía y geomecánica del área de estudio.
7. Se recomienda el uso y aprendizaje continuo de las nuevas herramientas digitales relacionadas con la geología estructural y geomecánica DIPS, ROCDATA, UNDWEDGE, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) ARCOM (2015). Agencia de Regulación y Control Minero. Recuperado el día 20 de Julio de 2015. <http://www.controlminero.gob.ec/>
- 2) Baldock (1982) Mapa Geológico del Ecuador 1:1000000
- 3) Barton, N. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*.
- 4) Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10, 1-54.
- 5) Bastida, F. (2005). *Geología: Una visión moderna de las Ciencias de la Tierra*. Trea Ciencias Vol. 2.
- 6) Belandria, N. & Bongiorno, F. (2012). Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana. Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA). Universidad de los Andes. 1-20.
- 7) Bieniawski, Z. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. 4^a Cong. of the Int. Society for rock Mech (págs. 55-95). Montreux, Balkema, Boston: ISRM.
- 8) Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Chichester: Wiley.
- 9) Carrillo, G., & Astudillo, A. (2008-2009). Estudio de la generación de vapores de mercurio en la extracción de oro, y sus efectos en los

trabajadores de una área minera en el cantón Ponce Enríquez-Azuay.
Universidad de Cuenca.

- 10) Carrión, G. (2010). Estudio mineralógico para la determinación de oro refractario en los distritos mineros de Portovelo, Bella Rica y San Gerardo. Universidad Técnica Particular de Loja.
- 11) Cornejo, L., & Salvador, E. (1996). Manual de túneles interurbanos de carretera. Gobierno Vasco.
- 12) David, E. (2002). Visual Topo. Recuperado en julio de 2015, de <http://vtopo.free.fr/>.
- 13) Deere, D. (1967). Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock mech. and Eng. Geology 1., 17-22.
- 14) Deere, D. (1989). Rock Quality Designation (RQD) after twenty years. U.S. Army Corps. Engers. Contract. Report GL-89-1. Vicksburg, MS Waterways Experimental Station
- 15) Duque, P. (2000). Breve léxico Estratigráfico del Ecuador. Quito: UCP-PRODEMINCA Proyecto MEM.
- 16) Erraez, R. I. (2014). Vototransparente.ec. Recuperado el 21 de 8 de 2015, de http://vototransparente.ec/apps/elecciones-2014/images/planes_trabajo/AZUAY/ALCALDES%20MUNICIPALES/CAMILO%20PONCE%20ENRIQUEZ/LISTAS%2017/LISTAS%2017.pdf
- 17) Estupiñán, T. (2002). Diseño y explotación subterránea del nivel A de la Mina Expobonanza-San Gerardo ubicada en el Cantón Pucara

Provincia de Azuay. FICT-ESPOL.

- 18) Fiallos, J. A. (2013). Perfeccionamiento del sistema de laboreo del nivel principal de la Mina subterránea Liga de Oro, Somilor S.A. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- 19) Flores, C. & Pineda, C. (2015). Caracterización del Macizo Rocoso- Análisis retrospectivo y Aplicación al diselo de taludes mediante Análisis cinemático y Clasificación Geomecánica- Slope Mass Rating- Cantera BORCONS en el km 6^{1/2}de la Av. del Bombero, Guayaquil, Guayas, Ecuador. FICT-ESPOL.
- 20) González de Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- 21) Grimstad, E., & Barton, N. (1993). Updating of the Q-System fr NTM. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete- Modern use of wet mix sprayed Concrete for underground Support. Oslo: Kompen. Norwegian Concrete Association.
- 22) Houghton, D., & Stacey, T. (1980). Application of probability technique to underground excavation. 7^a Conf. for Africa on Soil Mech and Found Eng. (págs. 879-883). Accra: Balkema.
- 23) Hudson, J. (1989). Rock Mechanics principles in engineering practice. London: Ciria and Butterworths.
- 24) ISRM. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses . International Journal of Rock

Mechanics. Sci and Geomech Vol. 15, 319-368.

- 25) Jordá, L. (2008). La minería de los metales en la provincia de Madrid: Patrimonio minero y puesta en valor del espacio subterráneo. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- 26) Jordá, L. (in litt.). Manual básico de clasificación geomecánicas: Índice Q y Rock Mass Rating RMR. FICT-ESPOL.
- 27) Jordá, L., & Jordá, R. (11 de Septiembre de 2012). speleominas. Recuperado el 24 de Agosto de 2015, de <http://speleominas.blogspot.com/2012/09/topografia-de-minas-abandonadas-con.html>
- 28) Jordá, L., López, A., & Romero, P. (in litt). Evaluación de la estabilidad de cuevas naturales mediante métodos empíricos y clasificaciones geomecánicas. FICT-ESPOL.
- 29) Jumikis, A. (1979). Rock Mechanics. 1ª Trans Tech Publications (TTP).
- 30) Lonsdale, P. (1978). Ecuadorian Subduction system. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2454-2477.
- 31) NGI. (2013). Using the Q System. Handbook. Rock Mass classification and support design. NGI, Oslo, Norway.
- 32) Núñez del Arco, E. (2003). Geología del Ecuador. Guayaquil: FICT-ESPOL.
- 33) Priest, S., & Hudson, J. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey. International Journal of Rock

Mechanics and Mining Sciences Vol. 18, 183-197.

- 34) PRODEMINCA-Bermeo, A. (2000). Evaluación de Distrito Mineros del Ecuador: Depósitos porfídicos y epi-mesotermales relacionados con intrusiones de las cordilleras Occidental y Real. UCP PRODEMINCA Proyecto MEM.
- 35) RocScience INC. (2015). RocScience. Recuperado en Julio de 2015, de <https://www.rocscience.com/>
- 36) Rodríguez, A. (2014). Caracterización geomecánica de la Mina Antigua Pilar (Colmenarejo) de cara a su posible aprovechamiento turístico. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- 37) Sari, J. y Rodas, D. (2013). Propuesta del Sistema de Fortificación que se debe emplear a lo largo de la veta F-10 de la mina subterránea Liga de Oro de la empresa minera Somilor S.A. Cuenca. Universidad de Cuenca.
- 38) Vallejo et al, C. (2009). Evolución geodinámica de la cordillera occidental (Cretácico tardío-Paleógeno). Quito: Escuela Politécnica Nacional (EPN).

ANEXOS

ANEXOS 1

Tablas RMR

1. a Valoración

$$\text{RMR}_{\text{básico}} = \text{RMR1} + \text{RMR2} + \text{RMR3} + \text{RMR4} + \text{RMR5}$$

1	Resistencia de la roca sana (MPa)	SPT	>10	4-10	2-4	1-2	-		
		RCS	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	100-90	90-75	75-50	50-25	<25			
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Separación diaclasas	>2m	2-0.6m	0.6-0.2m	0.2-0.06m	<0.06m			
	Valoración	20	15	10	8	5			
4	Estado diaclasas	Muy rugosas Discontinuas Bordes sano y duro	Rig. Rugosas < 1mm Borde duro	Lig. Rugosas < 1mm Bordes Blandos	Rellenos < 5mm Abiertas continuas	Rellenos blandos > 5mm continuas			
	Valoración	30	25	20	10	0			
5	Presencia Agua	Q 10m en túnel	Nulo	<10L/min	10-25L/min	25-125L/min	>125L/min		
		$\frac{\sigma_w}{\sigma_3}$	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración	15	10	7	4	0			

1. b Valoración del estado de juntas o RMR4

PARÁMETRO	VALORACIÓN				
	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Persistencia-Continuidad	6	4	2	1	0
Apertura	Nada	<0,1mm	0,1-1mm	1-5mm	>5mm
	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Lig. rugosa	Suave	Estriada
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno Duro		Relleno Blando	
		< 5mm	> 5mm	<5mm	>5mm
	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterado	Lig. Alterado	Mod. Alterado	Muy Alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

1. c Orientaciones de las discontinuidades principales con respecto al túnel y posterior corrección con RMR6

Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del Túnel		Buzamiento 0-20° cualquier dirección
Exc. a favor buz.		Exc. contra buz		Buz > 45°	Buz 20°-45°	
Buz. >45°	Buz. 20°-45°	Buz. >45°	Buz. 20°-45°			
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Medio	Desfavorable

1. d Valoración de RMR6 para la corrección del RMRbásico

Rumbo y Buzamiento		Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
Valoración para:	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

ANEXO 2

2. a Valoración de Jn

Categoría	Descripción	Valor
A	Roca masiva, sin diaclasas o pocas juntas	0,5-1
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones.	15
J	Roca triturada, tipo suelo	20
Notas: En intersecciones de túneles se utiliza la expresión 3xJn En las bocas de los túneles se utiliza la expresión 2xJn		

2. b Valoración de Jr

Contacto entre las dos caras de la discontinuidad		
Contacto entre las dos cara de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm.		
A	Diaclasas continuas	4
B	Diaclasas rugosa, irregulares u onduladas.	3
C	Diaclasas Lisas, onduladas	2
D	Diaclasas estriadas, cizalladas, onduladas	1,5
E	Rugosas, irregulares, planares	1,5
F	Diaclasas lisas, planares	1
G	Diaclasas estriadas-cizalladas, planares	0,5
Notas: Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden		
No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente que impida el contacto entre caras de una discontinuidad	1
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente que impida el contacto entre caras de discontinuidad	1
Notas: Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m se debe aumentar el índice Jr en una unidad (dependiendo del tamaño del hueco subterráneo) En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia se puede utilizar el valor Jr=0,5		

2. c Valoración de Ja

Ja Índice de alteración		φ aprox.	Ja
Contacto entre planos de discontinuidades (sin relleno intermedio, solo recubrimientos-manchas)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, relleno impermeabl	-	0,75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficie ligeramente manchada	25°-35°	1
C	Planos de discontinuidad lig. Alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas	25°-30°	2
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arcillas arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20°-25°	3
E	Recubrimiento de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8°-16°	4
Contacto entre planos de discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla	25°-30°	4
G	Rellenos arcillosos fuertemente sobreconsolidados, no reblandecibles (continuos, espesores menores a 5mm)	16°-24°	6
H	Rellenos arcillosos con sobreconsolidación media a baja, con reblandecimientos (continuos, espesores mayores a 5mm)	12°-16°	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, tipo montmorillonita (continuos, espesores menores a 5mm). El valor de Ja depende del porcentaje de partículas expansivas tamaño arcilla	6°-12°	8-12
No se produce contacto entre los planos de discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos gruesos de mineral)			
K	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada. Fuertemente sobreconsolidadas	16°-24°	6
L	Zonas o bandas de arcilla, roca desintegrada o triturada. Media a baja sobreconsolidación o rellenos reblandecibles	12°-16°	8
M	Zonas o bandas, roca desintegrada o triturada. Arcilla expansiva. Ja depende del porcentaje de partículas expansivas tamaño arcilla	6°-12°	8-12
N	Zonas gruesas continuas o bandas de arcilla. Fuertemente sobreconsolidadas	12°-16°	10
O	Zonas continuas o bandas de arcilla, gruesas. Sobreconsolidación media a baja	12°-16°	13
P	Zonas continuas o bandas con arcilla, gruesas. Arcilla expansiva. Ja depende del porcentaje de partículas expansivas tamaño arcilla	6°-12°	13-20

2. d Valoración de Jw

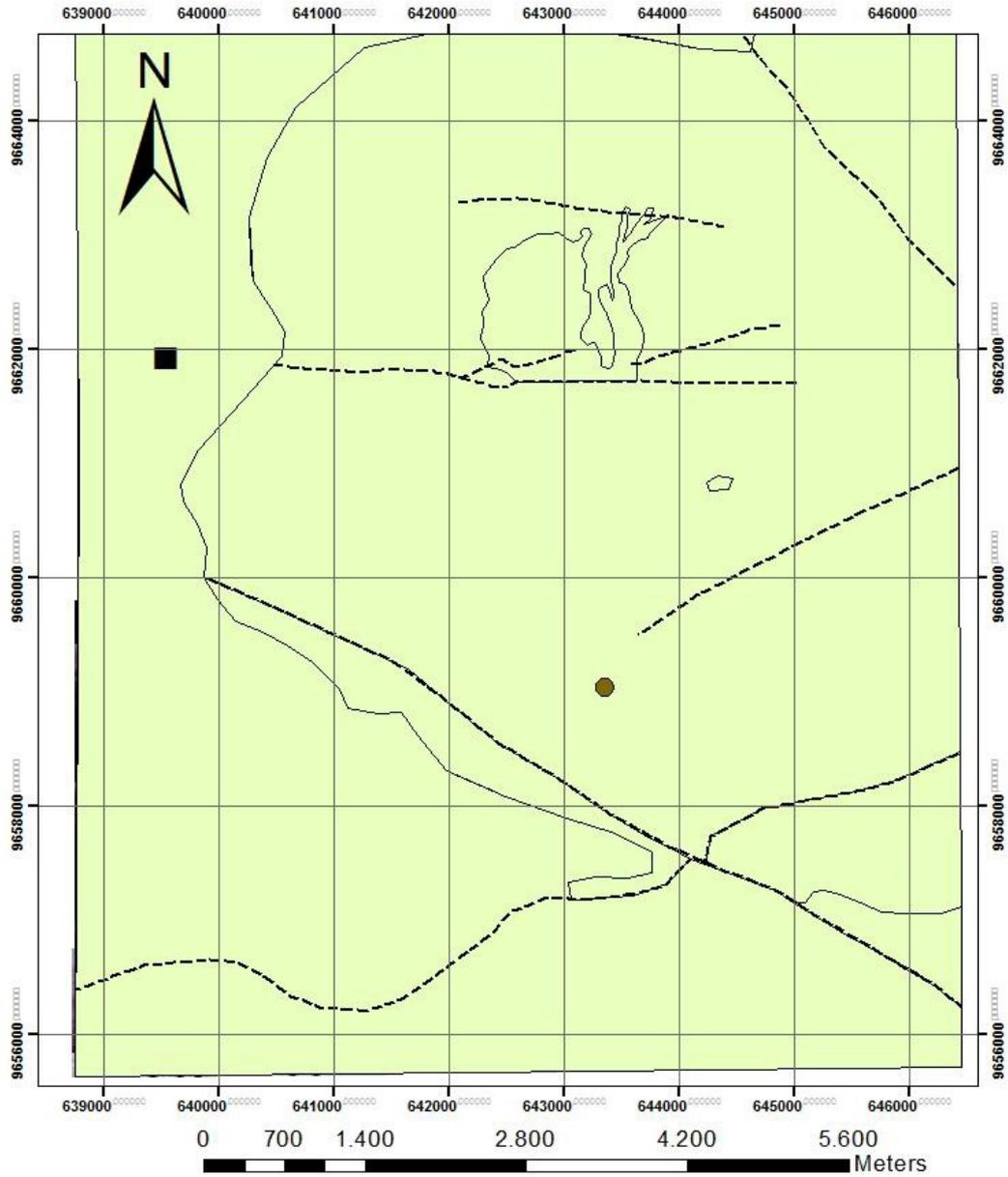
Factor de reducción por presencia de agua en juntas		Jw
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias (húmedo o pocas gotas)	1
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de rellenos de discontinuidades (muchas gotas-lluvia)	0,66
C	Afluencia en chorro o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	0,5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de la diaclasas	0,33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada decreciendo con el tiempo. Causa lavado de material y quizás sobreexcavación	0,2-0,1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable. Causa lavado de material y quizás sobreexcavación	0,1-0,05
Notas: Los factores C a F son simples estimaciones, se debe incrementar el valor de Jw si se drena el macizo rocoso No se consideran los problemas que pueda ocasionar el hielo		

2. e Valoración del SRF

Factor de reducción por tensiones		SRF		
Hay zonas débiles que intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel avanza				
A	Múltiples zonas débiles con pequeña porción conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad). O largas secciones con roca débil e incompetente (a cualquier profundidad). Para squeezing, categorías L y M	10		
B	Múltiples zonas de cizalla con corta sección en roca competente libre de arcillas y roca suelta alrededor (a cualquier profundidad)	7,5		
C	Zonas débiles aisladas con o sin arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad ≤ 50 m)	5		
D	Terreno suelto, diaclasas abiertas, intensamente fracturado (a cualquier profundidad)	5		
E	Zonas débiles aisladas con o sin arcilla o roca desintegrada químicamente (>50 m)	2,5		
Nota: Se reducen los valores expresados del SRF entre 25-50% si las zonas de fracturas solo ejercen influencia pero no intersectan a la excavación				
Rocas competentes, principalmente masivas, problemas tensionales		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
F	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	$<0,001$	2,5
G	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0,01-0,3	1
H	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Favorable para la estabilidad. Puede ser desfavorable para la estabilidad dependiendo de la orientación de las tensiones en relación con planos de debilidad o fracturación	10-5	0,3-0,4	0,5-2 2,5
J	Spalling, y/o lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-3	0,5-0,65	5-50
K	Spalling o estallido de roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0,65-1	50-200
L	Estallidos violentos de la roca y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	<2	>1	200-400
Notas: Si se comprueba la existencia de campos tensionales vírgenes, fuertemente anisótropos; cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, se disminuye el parámetro σ_c hasta $0,75 \sigma_c$; si $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, se tomará el valor de $0,5 \sigma_c$. Siendo: σ_c la resistencia a compresión simple, σ_1 y σ_3 son las tensiones principales mayor y menor y σ_θ es la tensión tangencial máxima. En los casos en los que la profundidad de la clave del túnel es menor que el vano de la excavación, se sugiere aumentar el valor de SRF de 2,5 a 5 (caso F)				
Rocas con fenómenos de squeezing: deformación plástica en roca incompetente sometida a altas presiones			σ_θ/σ_c	SRF
M	Presión de deformación (squeezing) baja	1-5		
N	Presión de deformación (squeezing) alta	>5		
Nota: Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades $H > 350Q^{1/3}$ (Singh et al, 1992)				
Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua				SRF
R	Presión de expansión baja	5-10		
S	Presión de expansión alta	10-15		

ANEXO 3

Mapa 1 Hoja Estructural 1:45000 Área de Estudio

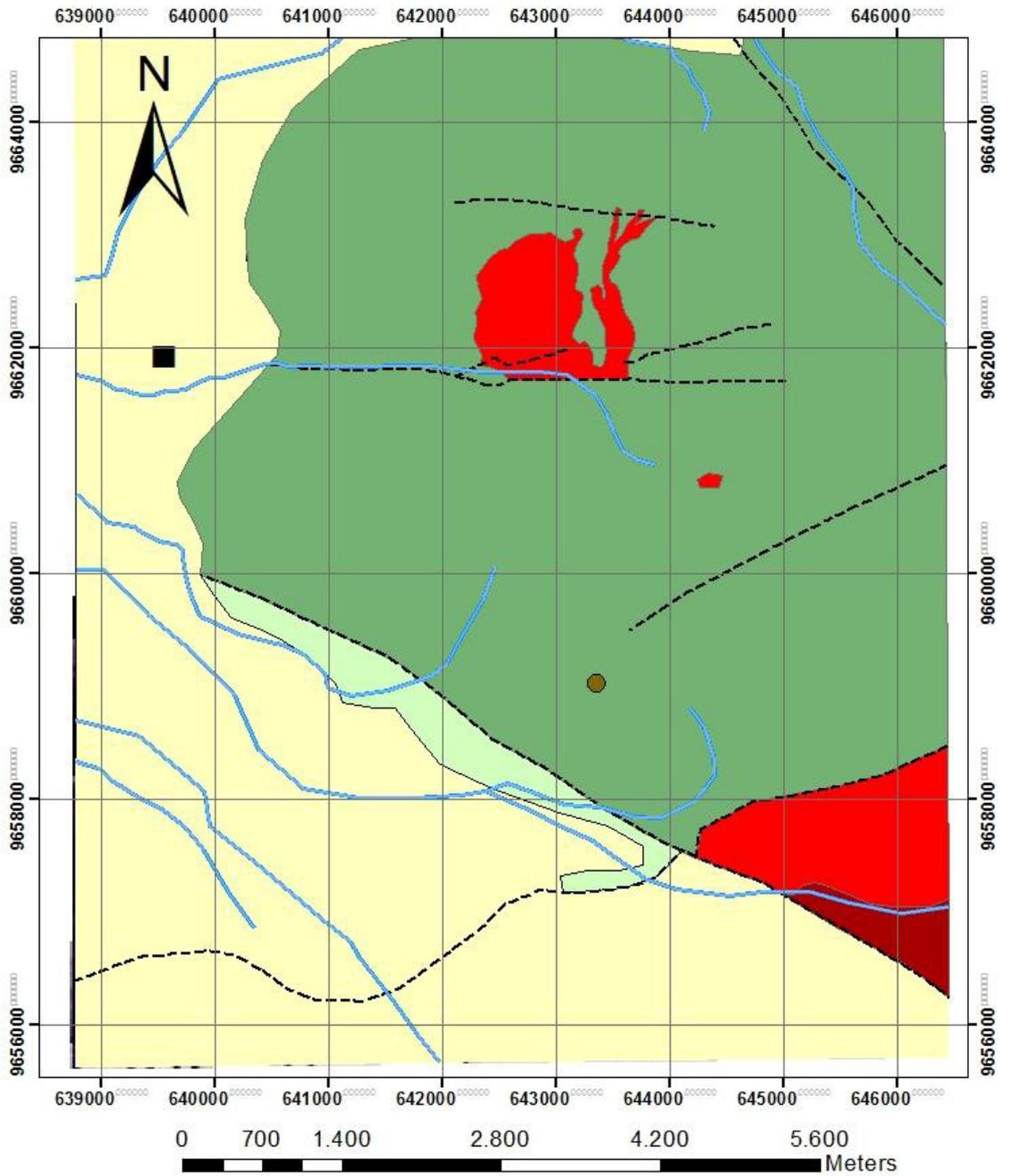


Mapa Estructural Ponce Enríquez

Leyenda

-  Mina San Juan
 -  Ponce Enríquez
 -  Falla
 -  Unidades Geológicas
- JOSÉ CUERVAS-MONS GLEZ. DE SELA

Mapa 2



- Leyenda
- | | |
|-----------------------------|---|
| ● Mina San Juan Geología | ■ Intrusivos Granodioríticos (Terciario) |
| ■ Ponce Enríquez Litologías | ■ Intrusivos Dioríticos-Gabroicos (Terciario) |
| — Ríos | ■ LLanuras Aluviales-Coluvionales (Cuaternario) |
| -- Falla | ■ Fm. Macuchi (Cretácico Superior) |
| | ■ Unidad Yunguilla (Cretácico Superior) |

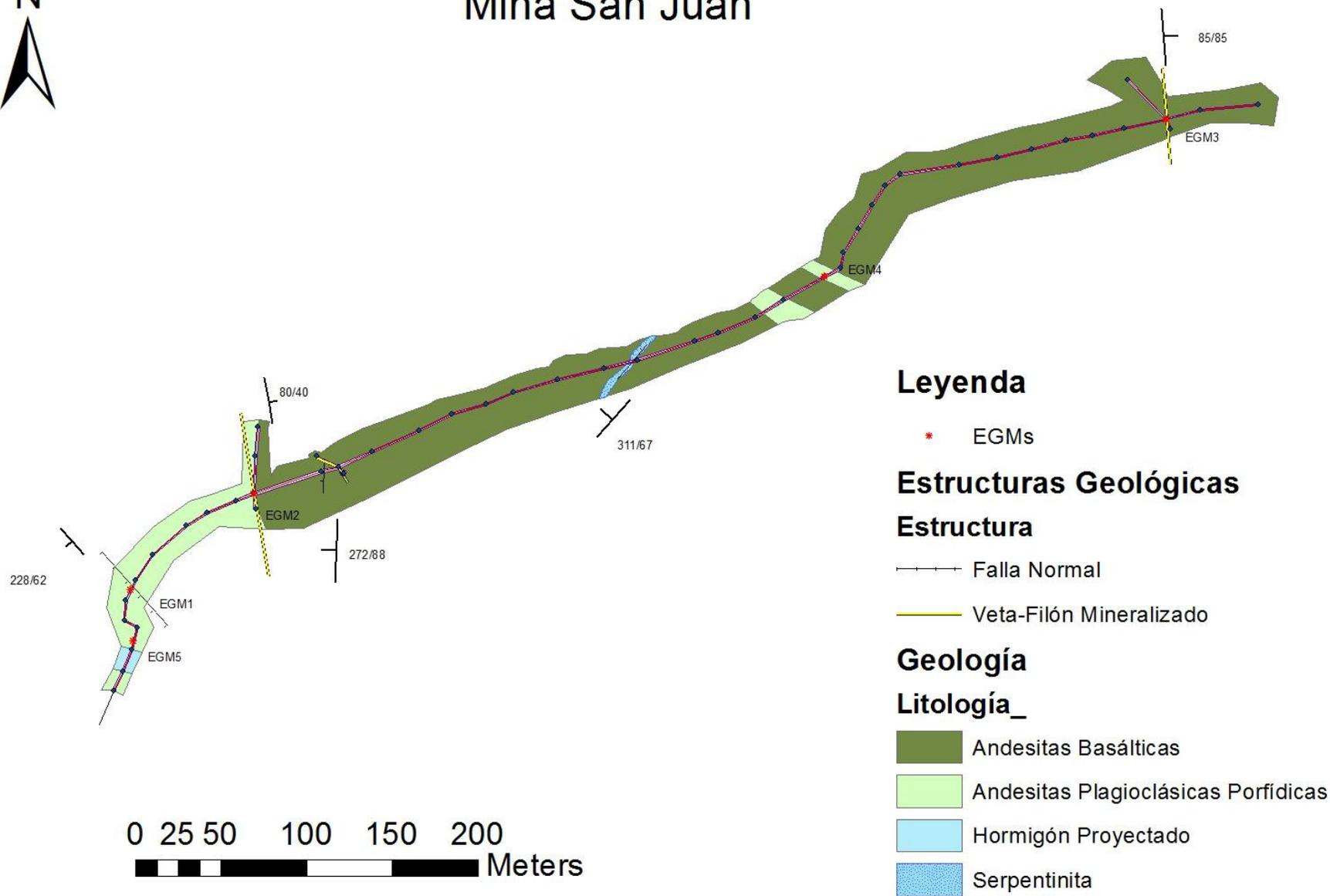
Mapa Geológico Local Ponce Enríquez-Mina San Juan

JOSÉ CUERVAS-MONS GLEZ. DE SELA

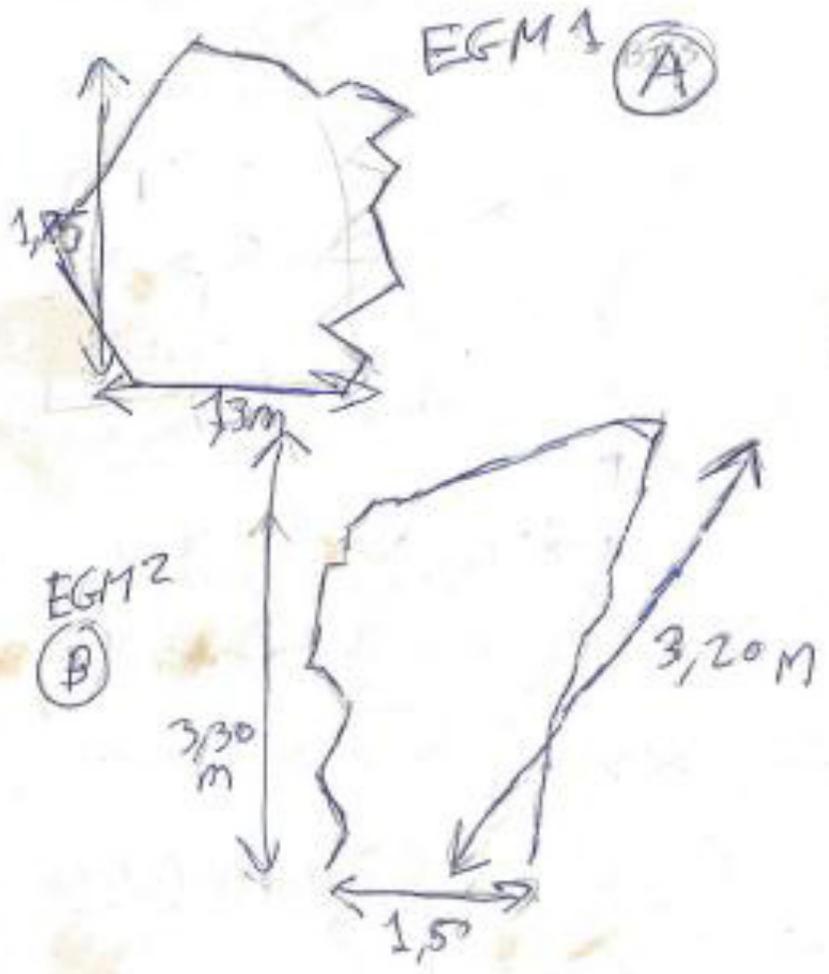
Mapa 3



Mina San Juan



J_1	J	J	J_1	J	J	J_2	J_2
130	75	110	135	330	20	240	233
50	73	85	48	65	80	81	87



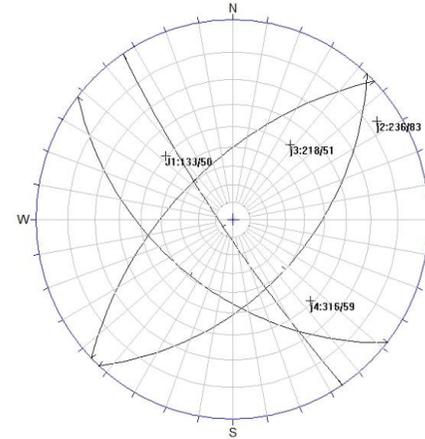
FICHA DE ESTACION GEOMECÁNICA 01

COORDENADAS: X: Y: Z: ESTACIÓN Nº: 1
 FECHA: jun-14 Calidad de afloramiento: EXCELENTE MINA SAN JUAN

MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Tipo de Plano	F	J	J	J	J	J	J	J	J	J	F									
DIP DIR	228	214	52	47	122	310	312	320	135	140	220	203	130	75	110	135	330	20	240	
DIP-	62	80	32	20	90	87	62	55	56	66	52	50	50	73	85	48	65	80	81	
ESPACIADO																				
> 2000 mm							X	X							20	21	22	23	24	
600 - 2000 mm					1400	1400									233					
200 - 600 mm	440	440	590	590					300	300					87					
60 - 200 mm																				
< 60 mm																	25	26	27	28
CONTINUIDAD																				
< 1 m				X																
1-3 m			X		X	X														
3-10 m							X	X	X	X										
10-20 m																				
>20 m	X	X																		
APERTURA																				
Nada			X	X																
< 0,1 mm					X	X														
0,1-1,0 mm							X	X	X	X										
1-5 mm		X																		
> 5 mm	X																			
RUGOSIDAD																				
Ondulación	Lo	Lo	Ru	Ru	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo										
JRC	10-12	10-12	12-14	12-14	6-8	6-8	8-10	8-10	8-10	8-10										
METOR. JUNTA																				
Grado	II	II	II	II	I	I	I	I	I	I										
AGUA																				
Seco																				
Lig. humedo				X																
Humedo	X	X	X		X	X	X	X	X	X										
Goteando																				
Fluyendo																				
RELLENO																				
Naturaleza	BF	Ar	SR	SR	SR	SR	Arn	Arn	Ar	Arn										
Espesor mm	>50	<5					<1	<1	<1	<1										

LITOLOGIA: ANDESITAS FORMACIÓN: MACUCHI
 METEORIZACION: Grado I RESISTENCIA: R6 = Extremadamente Dura

CROQUIS FRACTURAS (DIPS)

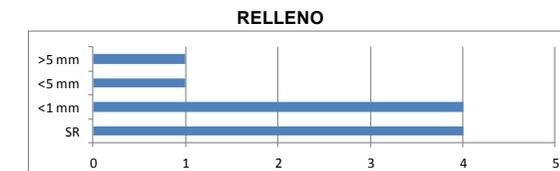
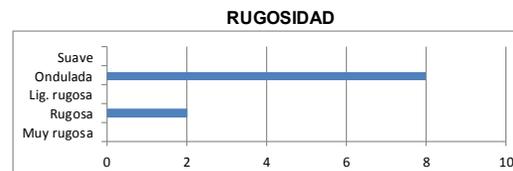


FAMILIAS	DIPDIR	DIP
J1	133	50
J2	236	83
J3	218	51
J4	316	59

RQD:	90,98%
λ1	5
λ2	
Jv	

	Martillo Schmidt				Media
	46	30	46	26	39
Juntas	30	35	34	51	51
	50	59	44	32	52
	49	50	42	62	51

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO - RMR (Bieniawski 1989)



ROCK MASS RATING - RMR - BIENIAWSKI

ESTACIÓN GEOMECÁNICA N°: 2 Punto Topográfico #11

FECHA: _____

LUGAR: _____

TÉCNICO RESPONSABLE: _____

1	Resistencia de la roca sana (MPa)	Ensayo carga puntual	> 10	4-10	2-4	1-2	--		
		Compr. simple	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Valoración			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
		Valoración	20	17	13	8	3		
3	Separación juntas		> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	< 0.06 m		
		Valoración	20	15	10	8	5		
4	Estado diaclasas		Muy rugosas Discontinuas Borde sano y duro	Ligeramente rugosas e < 1mm Borde duro	Ligeramente rugosas e < 1mm Bordes blandos	Rellenos e < 5 mm Abiertas Continuas	Rellenos blandos e > 5 mm Continuas		
		Valoración	30	25	20	10	0		
5	Presencia de agua	Caudal en 10m túnel	Nulo	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		σ_w / σ_3	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
	Estado	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo			
	Valoración	15	10	7	4	0			

Tabla 1: Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1979): Parámetros de clasificación

Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-13	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 2: Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1979): Corrección por orientación de las juntas

Galería galería

EXCAVACION GALERIA JANSIENKE -89-

Exc. a favor buzamiento		Exc. contra buzamiento		Buzamiento		Buzamiento: 0 - 20° Cualquier dirección
Buzamiento: > 45°	Buzamiento: 20-45°	Buzamiento: > 45°	Buzamiento: 20-45°	Buzamiento: > 45°	Buzamiento: 20-45°	
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Medio	Desfavorable

Tabla 3: Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1979): Orientación de las diaclasas

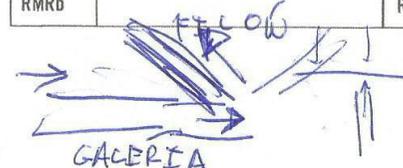
CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	Muy buena	Buena	Medio	Mala	Muy mala
RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Tiempo de estabilidad y longitud del vano	10 años 5 metros	6 meses 8 metros	1 semana 5 metros	10 horas 2.5 metros	30 minutos 1 metro
Cohesión (MPa)	> 0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	< 0.1
Rozamiento	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	15°

Tabla 4: Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1979): Clasificación y características

PARÁMETRO	VALORACIÓN				
Persistencia	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
Apertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro		Relleno blando	
		< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	6	4	2	2	0
Alteración	Intactado	Ligeramente alterado	Mediamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

Tabla 5: Guía para valorar el estado de las discontinuidades (según Bieniawski)

RMRb		RMRcorr.	
------	--	----------	--



ROD	
Descripción	Valor
A. Muy mala	0-25
B. Mala	25-50
C. Media	50-75
D. Buena	75-90
E. Excelente	90-100

Ja (Índice de alteración)	
Descripción	Valor
A. Masiva, sin o con juntas ocasionales	0-5
B. Una familia	5-10
C. Una familia y ocasionales	10-15
D. Dos familias	15-20
E. Dos familias y ocasionales	20-25
F. Tres familias	25-30
G. Tres familias y ocasionales	30-35
H. Cuatro o más familias, ocasionales o roca muy fracturada	35-40
I. Roca triturada, suelo	40-45

Observaciones:
 1. Se debe contabilizar el número de juntas reales, observadas en el frente, no el nº de juntas observadas regionalmente.
 2. Solo se contabilizan como familias los sistemas bien desarrollados.
 Se contabilizan como "ocasionales" si hay pocas discontinuidades visibles (desplazamiento < 3mm) discontinuas e inconsistentes.
 3. En intersecciones evitar 3x4
 4. En agujeros evitar 2x4

Jw (Índice de rugosidad)	
Descripción	Valor
a) Labios de roca en contacto (rodina fina sin rellenos)	4

b) Labios de roca en contacto con pequeños desplazamientos

A. Juntas discontinuas (terminan en roca)	Rugosidad microscópica	4
B. Concavidad	Rugosidad irregular	3
C. Ondulada	Lisa	2
D. Ondulada	Pulida	1,5
E. Plana	Rugosa o irregular	1,5
F. Plana	Lisa	1
G. Plana	Pulida	0,5

c) Labios de roca en contacto con grandes desplazamientos

H. Juntas con rellenos gruesos	1
I. Rellenos gruesos de roca triturada, arenoso o de grava	1

Observaciones:
 1. J_w y Ja se debe aplicar a la familia o discontinuidad menos favorable para la estabilidad, desde el punto de vista de la orientación y de la resistencia al corte (mayor relleno y menor J_w), en el caso de prevalencia de un sistema.
 2. Añadir 1 si la familia más riesgosa tiene un espaciamiento superior a 3 m
 3. Adoptar J_w=0 para Espallos de falla (junta plana, pulida con alineaciones)
 4. Juntas cortadas por el talud pero que originan desplazamientos de sólidos en resturas, se considerarán abiertas

SRF (Stress Reductor Factor)	
Descripción	Valor
a) Zonas débiles que intersectan la excavación y causan desplazamientos	10
A. Multitud de zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, extensa zona de descompresión alrededor del túnel (a cualquier profundidad)	5
B. Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (montera ≤ 50 m)	2,5
C. Idem (montera > 50 m)	7,5
D. Multitud de zonas cizalladas en roca competente (sin arcilla), zona circundante decomprimida (a cualquier profundidad)	5
E. Zonas cizalladas aisladas en roca competente (sin arcilla) (montera ≤ 50 m)	2,5
F. Idem (montera > 50 m)	5
G. Desplazamientos, juntas abiertas, gran fracturación o "cubitos de azúcar" etc. (a cualquier profundidad)	5

b) Roca competente cuya estabilidad depende del campo tensional

H. Tensiones bajas, cerca de superficie, juntas abiertas	>200
J. Tensiones medias; condiciones tensionales favorables	200-10
K. Tensiones altas; estructura muy cerrada. Normalmente favorece la estabilidad, pero pueden aparecer problemas en hastiales.	10-5
L. Desplazamientos moderados pasada una hora en roca competente	5-3
M. Desplazamientos y estallidos de roca pasados unos minutos en roca masiva	3-2
N. Estallido de roca severo y deformaciones dinámicas inmediatas en roca masiva	<2

c) Roca incompetente con fluencia plástica con altas tensiones

O. Squeezing moderado	5-10
P. Squeezing alto	10-20
d) Roca expansiva cuya actividad química depende de la presencia de agua	5-10
O. Presión de hinchamiento moderado	5-10
P. Presión de hinchamiento alto	10-15

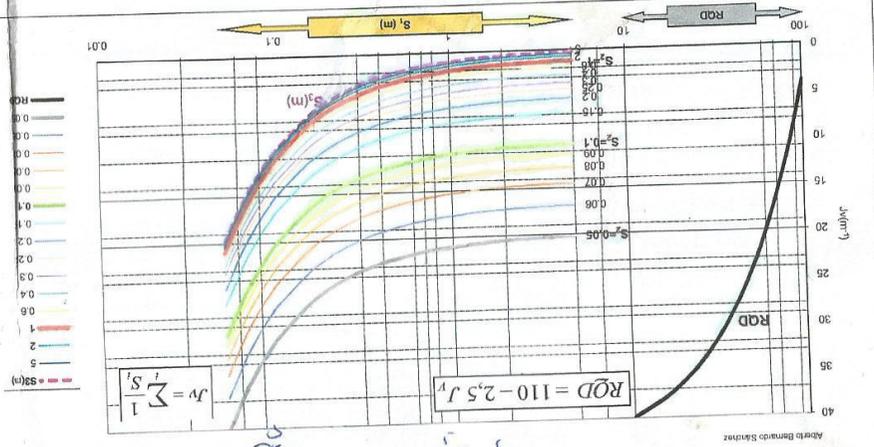
Observaciones:
 1. En la clase A, reducir los valores de SRF en un 25-50%, si las zonas cizalla influyen pero no intersectan a la excavación
 2. Si el estado tensional inicial (si está medido) es muy anisótropo (5σ₁/σ₃10), reducir σ_c a 0,75σ_c. Si σ₁/σ₃>10, reducir σ_c a 0,5σ_c
 3. Hay pocos datos donde la cobertura sea inferior al ancho del túnel. En estos casos, se sugiere incrementar SRF de 2,5 a 5 (clase H)

Ja (Índice de alteración)

Descripción	Valor
a) Labios de roca en contacto (rodina fina sin rellenos)	4
A. Soldada, dura, no reblanecible o relleno impermeable	0,75
B. Labios malterados, sólo superficie manchada	1
C. Labios algo alterados, sin alteraciones arcillosas o reblanecibles, partículas arenosas, etc.	2
D. Con intercalaciones limosas o arcillo-arenosas, con pequeña fracción arcillosa	3
E. Con alteraciones arcillosas reblanecibles o de baja fricción (caolinita, mica, chlorita, talco, yeso, gipso o pequeñas cantidades de arcilla expansiva)	4
b) Labios de roca en contacto con pequeños desplazamientos	4
F. Con partículas arenosas, roca descompuesta sin arcilla	6-8
G. Rellenos arcillosos no reblanecibles, muy sobreconsolidados (alteración continua pero de espesor inferior a 5 mm)	6
H. Rellenos arcillosos reblanecibles, sobreconsolidación media a baja (alteración continua pero de espesor inferior a 5 mm)	8
J. Rellenos de arcillas expansivas (alteración continua pero de espesor inferior a 5 mm). El valor depende del porcentaje de arcilla expansiva y acceso del agua	8-12
c) Labios de roca en contacto con grandes desplazamientos	4
K. Zonas de roca desintegrada o triturada y arcilla	6-8
L. Bandas de roca desintegrada o triturada y arcilla	8-12
N. Zonas o bandas limosas o arenó-arcillosas, con pequeña fracción de arcilla (no reblanecible)	5
O. Zonas continuas y potentes de arcillas	10-13
P. Bandas de arcillas potentes	13-20

Jw (Coeficiente reductor por presencia de agua)	
Descripción	Valor
A. Excavación seca o filtraciones pequeñas locales	1
B. Filtraciones medias o agua a presión, lavados ocasionales de rellenos	0,66
C. Grandes filtraciones o agua a gran presión en roca competente con juntas sin rellenos	0,5
D. Grandes filtraciones o agua a gran presión con lavado de rellenos	0,33
E. Filtración excepcionalmente alta inicialmente, decreciente con el tiempo	0,2-0,1
F. Filtración excepcionalmente alta constante en el tiempo	0,1-0,05

Observaciones:
 1. Las clases C a F son estimaciones groseras. Incrementar J_w si se toman medidas de drenaje
 2. No se han considerado los problemas derivados de la formación de hielo



Alberto Bermudo Sánchez

J = C0/32 : 80/58, 80/58, 340/45, 180/37, 95/60
 95/66, 85/40, 55/40, 141/77, 141/77, 75/40
 FILÓN, CRUCE CON GALERIA. BLOQUES CAÍDOS. FALLA INCLINADA EN CONTRA GALERIA.
 J₂ 80/40

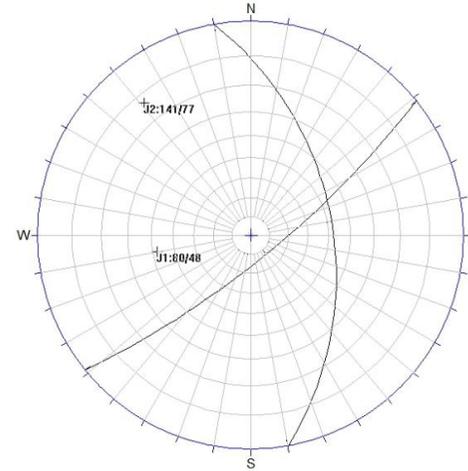
FICHA DE ESTACION GEOMECÁNICA 02

COORDENADAS: Y: Z: ESTACIÓN Nº: 2
 FECHA: jul-15 Calidad de afloramiento: EXCELENTE

LITOLOGIA: ANDESITAS PORFÍDICAS FORMACIÓN: MACUCHI
 METEORIZACIÓN: II RESISTENCIA: R6: Extremadamente dura

MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Tipo de Plano	F	J	J	J	J	J	J	J	J	J										
DIP DIR	80	60	80	80	340	186	96	95	85	55	143	140	75							
DIP-	40	32	58	54	45	37	60	66	48	40	77	78	40							
ESPACIADO																				
> 2000 mm																20	21	22	23	24
600 - 2000 mm																				
200 - 600 mm	X	X	X	X					X	X										
60 - 200 mm					X	X	X	X								25	26	27	28	
< 60 mm																				
CONTINUIDAD																				
< 1 m																				
1-3 m																				
3-10 m																				
10-20 m																				
>20 m	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
APERTURA																				
Nada																				
< 0,1 mm																				
0,1-1,0 mm																				
1-5 mm																				
> 5 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
RUGOSIDAD																				
Ondulación	On																			
JRC	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6										
METOR. JUNTA																				
Grado	II																			
AGUA																				
Seco																				
Liq. humedo																				
Humedo					X	X	X	X												
Goteando	X	X	X	X						X	X									
Fluyendo																				
RELLENO																				
Naturaleza																				
Espesor mm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5										

CROQUIS FRACTURAS (DIPS)



FAMILIAS		
	DIP	DIP
J1	80	48
J2	141	77

RQD: 77.25%	
λ1	9
λ2	
Jv	

Fracturas/metro (λ1)		
Fracturas/metro (λ2)		9
Juntas/m3 (Jv)		

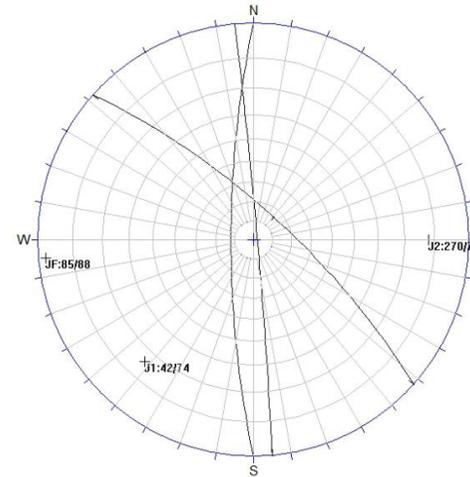
FICHA DE ESTACION GEOMECÁNICA 03

COORDENADAS: Y: Z: ESTACIÓN Nº: 3
 FECHA: jul-15 Calidad de afloramiento: EXCELENTE

LITOLOGIA: ANDESITAS BASÁLTICAS FORMACIÓN: MACUCHI
 METEORIZACIÓN: Grado I RESISTENCIA: R5-R4 (Muy dura-dura)

MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tipo de Plano	J	J	J	J	J	J	J	F											
DIP DIR	165	324	348	264	275	43	46	85											
DIP-	54	56	45	80	76	69	80	85											
ESPACIADO																			
> 2000 mm															20	21	22	23	24
600 - 2000 mm																			
200 - 600 mm	300																		
60 - 200 mm																			
< 60 mm		50	X	10	20	10	30	20											
CONTINUIDAD																			
< 1 m		X	X	X		X	X												
1-3 m	X				X														
3-10 m																			
10-20 m																			
>20 m								X											
APERTURA																			
Nada	X	X	X	X	X	X	X	X											
< 0,1 mm																			
0,1-1,0 mm																			
1-5 mm																			
> 5 mm																			
RUGOSIDAD																			
Ondulación	Lo	Ru	Ru	Lo	Lo	L	L	L											
JRC	8-10	8-10	8-10	10-12	10-12	4-6	4-6	6-8											
METOR. JUNTA																			
Grado	I	I	I	I	I	I	I	II											
AGUA																			
Seco	X	X	X	X	X	X	X	X											
Lig. humedo																			
Humedo																			
Goteando																			
Fluyendo																			
RELLENO																			
Naturaleza	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR											
Espesor mm																			

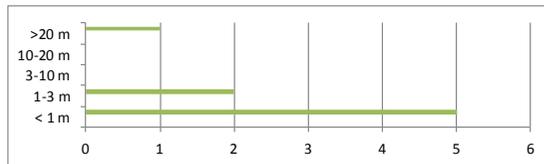
CROQUIS FRACTURAS (DIPS)



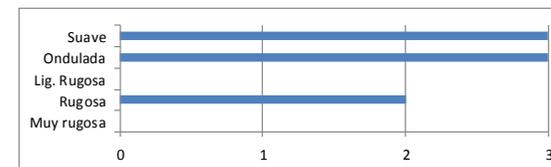
FAMILIAS		
	DIPDIR	DIP
F	85	88
J1	42	74
J2	270	78

RQD: 93.85%	
λ1	4
λ2	4
Jv	

CONTINUIDAD

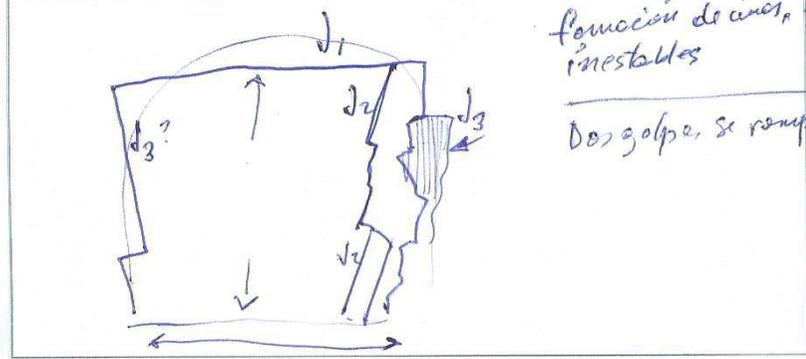


RUGOSIDAD



ESTACIÓN Nº: #5 *punto topográfico 5*
LITOLOGÍA: *arenas de brachi* **FORMACIÓN:** _____
METEORIZACIÓN: _____ **RESISTENCIA:** _____

CROQUIS FRACTURAS

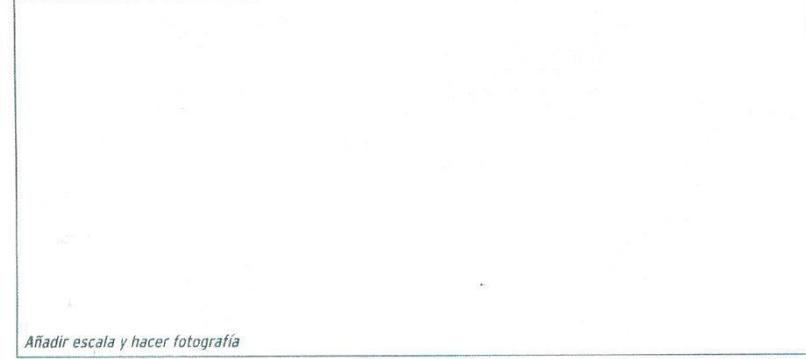


formación de uniones e inestables
Después de golpes, se rompe rica

Martillo Schmidt				Media	Fracturas/metro normalmente tomamos una sola scan line (1), pero abrimos la posibilidad a más de una	λ 1	8
Matriz						λ 2	10
Juntas					λ 3		
					λ 4		
					Jv		
					Ensayo Tilt-test	φ básico	

UCS según los golpes del martillo (Mpa):

CROQUIS AFLORAMIENTO



Añadir escala y hacer fotografía

FICHA DE ESTACIÓN GEOMECÁNICA Nº: 5

COORDENADAS: X: _____ Y: _____ Z: *d3/2 km desde un punto*
FECHA: *18/Julio* **Calidad de afloramiento:** *excelente*
152

MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Plano	J3	J3	J3	J3	J2	J2	J1	J1	S1	J1
Dir. Buz. (DIPDIR)	060	060	065	052	152	151	006	013	80	83
Buzamiento (DIP)	80	78	78	89	89	88	05	06	15	15
ESPACIADO										
> 2000 mm										
600-2000 mm										
200-600 mm										
60-200 mm	80	80	80	80	60	60	100	100	100	100
< 60 mm										
CONTINUIDAD										
< 1 m										
1-3 m	X	X	X	X	X	X				
3-10 m							X	X	X	X
10-20 m										
> 20 m										
APERTURA										
Nada										
< 0,1 mm	X	X	X	X	X	X				
0,1-1,0 mm							X	X	X	X
1-5 mm										
> 5 mm										
RUGOSIDAD										
Ondulación	L0	L0	L0	L0	L	L	L	L	L	L
JRC	4-6	4-6	4-6	6-8	4-6	4-6	4-6	4-1	4-6	4-
METOR. JUNTA										
Grado	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
AGUA										
Seco										
Lig. húmedo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Húmedo										
Goteando										
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza	gr	gr	gr	gr	gr	gr				
Espesor mm										

230/100
68/20
60/88
78/12
71/10
71/12
153/42
34/80
162/66
65/08
66/10
40/88
60/54
125/25
66/77
58/68
60/40
217/60

FICHA DE ESTACION GEOMECÁNICA 05

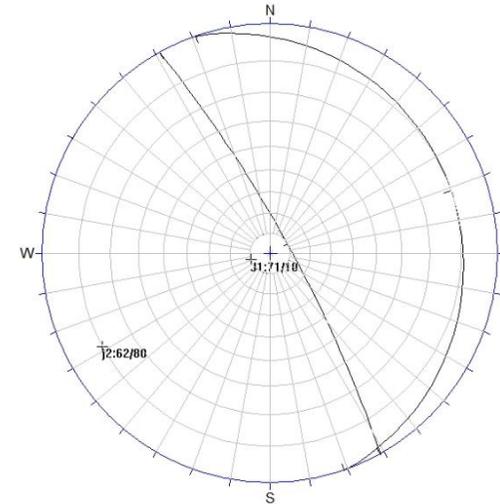
COORDENADAS: Y: Z: ESTACIÓN Nº: 5
 FECHA: jul-15 Calidad de afloramiento: EXCELENTE

MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Tipo de Plano	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J										
DIP DIR	60	60	65	52	152	151	6	13	80	83	230	68	60	78	71	71	153	340	162	
DIP-	80	78	78	89	89	89	5	6	15	15	74	20	88	12	10	12	42	80	66	
ESPACIADO																				
> 2000 mm															20	21	22	23	24	
600 - 2000 mm															65	66	40	60	125	
200 - 600 mm															8	10	88	54	25	
60 - 200 mm	80	80	80	80			100	100	100	100					25	26	27	28		
< 60 mm					60	60									66	58	60	247		
CONTINUIDAD															77	68	40	60		
< 1 m																				
1-3 m	X	X	X	X	X	X														
3-10 m							X	X	X	X										
10-20 m																				
>20 m																				
APERTURA																				
Nada																				
< 0.1 mm	X	X	X	X	X	X														
0.1-1.0 mm							X	X	X	X										
1-5 mm																				
> 5 mm																				
RUGOSIDAD																				
Ondulación	Lo	Lo	Lo	Lo	L	L	L	L	L	L										
JRC	4-6	4-6	4-6	6-8	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6										
METOR. JUNTA																				
Grado	II																			
AGUA																				
Seco																				
Lig. humedo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
Humedo																				
Goteando																				
Fluyendo																				
RELLENO																				
Naturaleza	SR																			
Espesor mm																				

LITOLOGIA: ANDESITAS BASÁLTICAS FORMACIÓN:MACUCHI

METEORIZACIÓN: II RESISTENCIA: R4: Dura

CROQUIS FRACTURAS (DIPS)

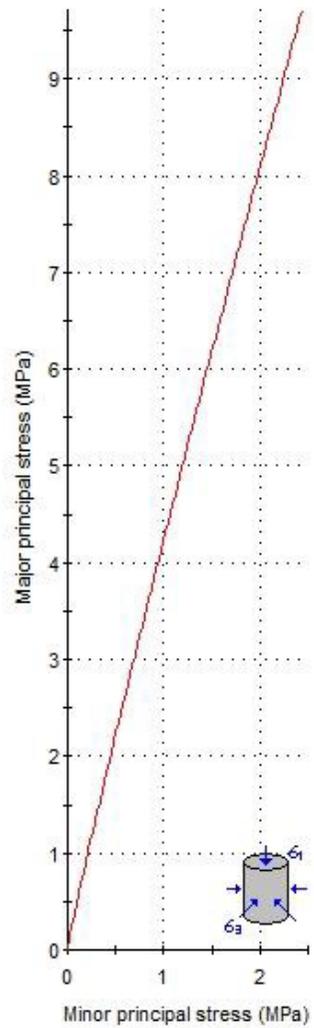


FAMILIAS		
	DIPDIR	DIP
J1	71	10
J2	62	80

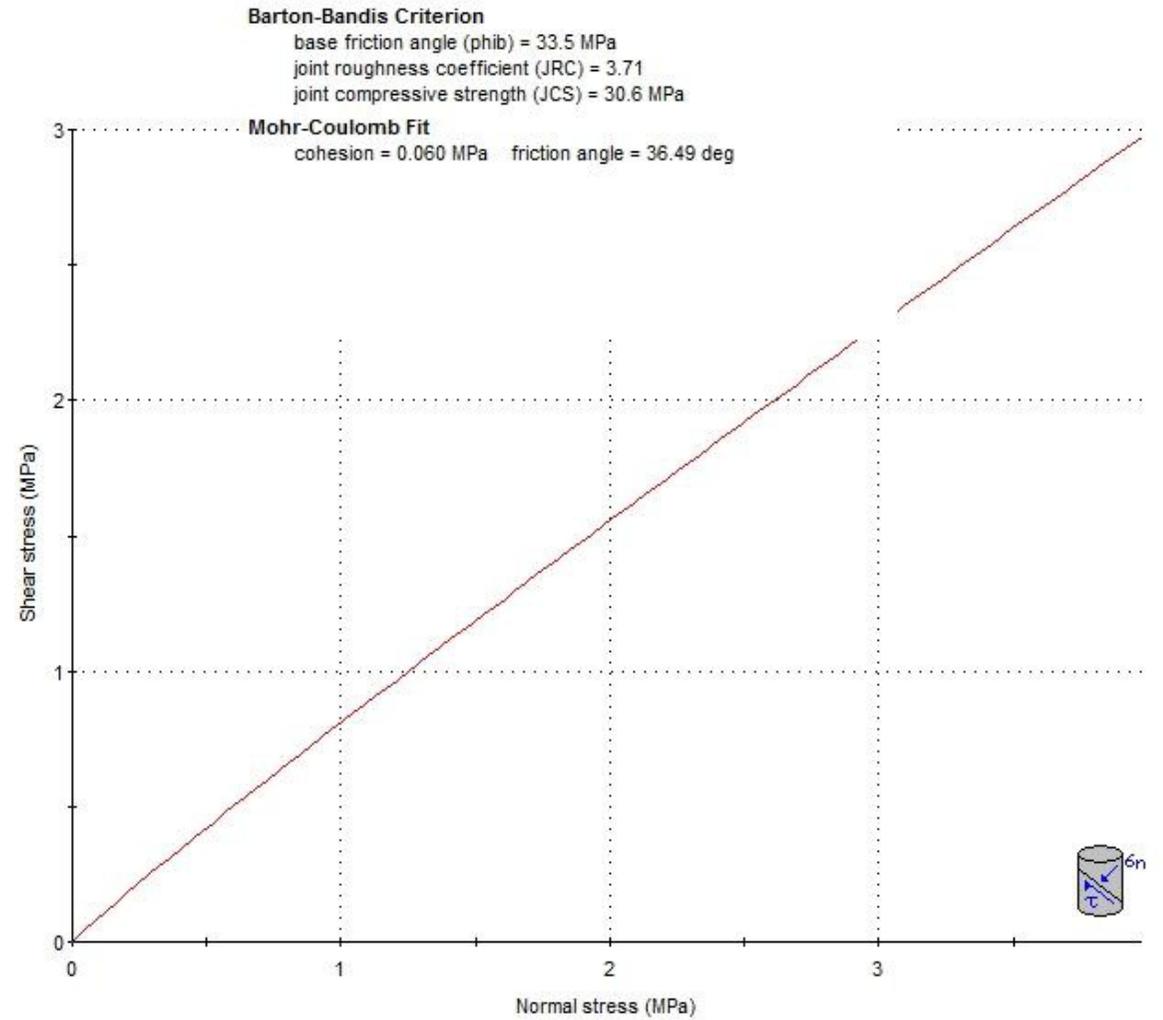
RQD: 77.25%	
λ1	8
λ2	10
Jv	



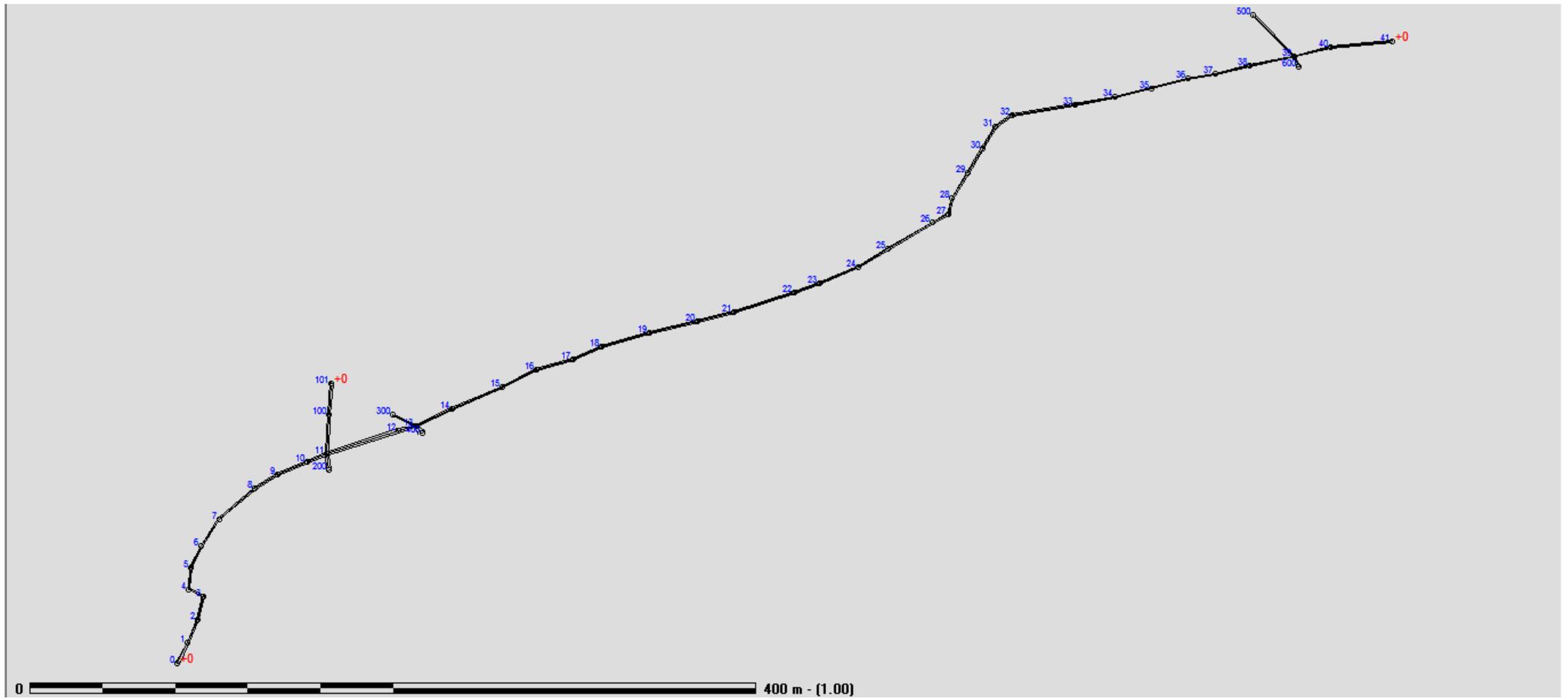
ANEXO 5 RESULTADOS ROCDATA



Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



ANEXO 6 DATOS TOPOGRÁFICOS



DE	HACIA	DISTANCIA	DIRECCIÓN	ANCHO IZD	ANCHO DCHA	ALTO
0	0	0,00	30,00	0,82	0,83	1,95
0	1	12,54	30,00	0,50	0,50	2,20
1	2	13,70	25,00	0,55	0,55	2,00
2	3	13,20	15,00	0,75	0,75	1,90
3	4	8,60	330,00	0,59	0,59	1,60
4	5	11,90	5,00	0,70	0,70	2,00
5	6	13,00	30,00	0,50	0,50	1,60
6	7	17,60	37,00	0,47	0,47	1,65
7	8	26,00	55,00	0,46	0,46	1,70
8	9	14,30	65,00	0,50	0,50	2,00
9	10	18,20	75,00	0,60	0,60	1,77
10	11	11,60	76,00	1,11	1,10	3,30
11	100	21,80	2,00	0,65	0,65	2,00
100	101	17,00	6,00	0,90	0,90	3,30
11	200	9,00	195,00	1,25	1,25	2,00
11	12	41,00	80,00	1,10	1,10	2,20
12	13	10,20	85,00	1,08	1,08	4,00
13	300	14,00	330,00	0,35	0,35	5,00
13	400	5,00	153,00	1,90	1,90	1,16
13	14	22,00	72,00	0,70	0,70	2,00
14	15	30,00	74,00	0,50	0,50	1,66
15	16	21,00	70,00	0,55	0,55	1,60
16	17	21,30	82,00	0,63	0,62	1,80
17	18	17,00	74,00	0,42	0,42	1,82
18	19	27,50	82,00	0,50	0,50	1,74
19	20	27,50	85,00	0,60	0,60	2,00
20	21	20,40	85,00	0,73	0,72	1,96
21	22	35,00	80,00	0,50	0,50	2,00
22	23	14,70	78,00	0,50	0,50	2,16
23	24	23,40	75,00	0,55	0,55	1,90
24	25	19,12	65,00	0,89	0,89	2,00
25	26	28,23	67,00	0,65	0,65	2,00
26	27	9,86	70,00	0,90	0,90	2,15
27	28	9,00	13,00	0,50	0,50	1,76
28	29	16,30	35,00	0,73	0,73	1,73
29	30	16,00	35,00	0,60	0,60	1,87
30	31	13,60	35,00	0,57	0,57	1,70
31	32	11,00	60,00	0,77	0,77	1,62
32	33	35,00	90,00	0,50	0,50	1,96
33	34	22,80	88,00	0,47	0,47	1,78
34	35	20,70	85,00	0,45	0,45	1,90
35	36	20,50	84,00	0,50	0,50	1,76
36	37	15,50	89,00	0,45	0,45	1,83
37	38	19,30	85,00	0,55	0,55	1,73
38	39	25,20	87,00	0,80	0,80	1,80
39	500	32,00	350,00	0,59	0,59	1,70
39	600	6,30	175,00	0,63	0,63	1,93
39	40	20,50	84,00	0,50	0,50	1,86
40	41	34,00	94,00	0,55	0,55	1,80