

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE
BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES
SAN PABLO – CAJAMARCA.**

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

Presentado por:

Bach. Brayan Augusto Benel Rivera

Asesor:

Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

Cajamarca – Perú

2020

DEDICATORIA

La presente tesis lo dedico con mucho amor y cariño a mis padres quienes me han dado su apoyo incondicional para ser cada día una mejor persona.

AGRADECIMIENTO

Agradesco en primer lugar a Dios, por bendecirme y guiarme por el camino de éxito.

A nuestra casa superior de estudios, la Universidad Nacional de Cajamarca por acogerme en sus majestuosas aulas llenos de conocimientos, respeto y de preparación para el futuro competitivo para ser un excelente profesional.

A mis docentes por su dedicación a mi formación profesional.

Especial agradecimiento a mi Asesor Dr. Reinaldo Rodriguez Cruzado.

Un eterno agradecimiento a mi familia por el apoyo y aliento constante que me brindan, para conseguir el éxito profesional y ser una persona de bien.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE PLANOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	3
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.....	4
2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES.....	5
2.2 BASES TEÓRICAS.....	7
2.2.1 CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS.....	7
2.2.2 TEORÍA DE SHEOREY (1994).....	25
2.2.3 CRITERIO DE ROTURA HOEK – BROWN (1980).....	26
2.2.4 SOSTENIMIENTO.....	28
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	30

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1 UBICACIÓN.....	32
3.2 ACCESIBILIDAD.....	33
3.3 CLIMA.....	34
3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	35
3.4.1 TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	36
3.4.2 POBLACIÓN.....	36

	Pág.
3.4.3 MUESTRA.....	36
3.4.4 UNIDAD DE ANÁLISIS.....	36
3.4.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	37
3.4.6 RECURSOS MATERIALES.....	38
3.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	41

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL	42
4.1.1 GRUPO CALIPUY	42
4.2 GEOLOGÍA LOCAL DEL NIVEL 3	43
4.2.1 LITOLOGÍA	43
4.2.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	45
4.3 HIDROLOGÍA	47
4.4 GEOHIDROLOGÍA	47
4.5 GEOMECÁNICA	49
4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
4.7 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	100

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
5.1 CONCLUSIONES	101
5.2 RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

ANEXOS

ANEXO A: DATOS GEOMECÁNICOS DE CAMPO	107
ANEXO B: PLANOS	113

LISTA DE ABREVIATURAS

WGS-84	:	Sistema Geodésico Mundial 1984.
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
GPS	:	Sistema de Posicionamiento Global.
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú.
Fm.	:	Formación.
MDT	:	Modelo Digital del Terreno.
MEF	:	Método de Elementos Finitos.
MDE	:	Modelo digital de elevaciones.
FS	:	Factor de Seguridad.
S.A.	:	Sociedad Anónima.
U.E.A.	:	Unidad Económica Administrativa.
NV.	:	Nivel de excavación
'	:	Pies.
''	:	Pulgadas.
H6	:	Tipo de cimbra.
V6	:	Versión de software
E-1	:	Estación geomecánica.
Hp	:	Altura de carga.
Ht	:	Altura de túnel.
W_1	:	Peso de carga de roca.
B_1	:	Ancho de la zona de roca donde existe movimiento.
B	:	Luz de túnel.
°C	:	Grados Centígrados.
σ_{ci}	:	Resistencia a la compresión uniaxial.
$\sigma_{3máx}$:	Tensión de confinamiento.
σ'_t	:	Resistencia a la tracción
σ_1	:	Esfuerzo principal mayor.
σ_3	:	Esfuerzo principal menor.
Kg.	:	Kilogramos.
N	:	Newtons.
MPa	:	Megapascales.
α°	:	Ángulo de orientación tensional.

LISTA DE ABREVIATURAS

GWh	:	Gigawatts/hora
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica.
RQD	:	Índice de calidad de roca.
RMR	:	Valoración de la masa rocosa.
Q o NGI	:	Índice de calidad de túneles.
Jn	:	Número de familias de diaclasas
Jr	:	Número de rugosidad de las diaclasas.
Ja	:	Número de alteración de las diaclasas.
Jw	:	Factor de reducción por agua de las diaclasas
SRF	:	Factor de reducción de tensiones.
ESR	:	Relación de soporte de excavación.
De	:	Diámetro equivalente.
Eh	:	Módulo de deformación en dirección horizontal.
z	:	Profundidad.
GPa	:	Gigapascuales.
<i>mi</i>	:	Constante roca intacta.
<i>mb</i>	:	Constante para macizo rocoso.
<i>s, a</i>	:	Constantes del macizo rocoso.
<i>c</i>	:	Cohesión.
φ	:	Ángulo de Fricción.
<i>Ei</i>	:	Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
<i>Em</i>	:	Módulo de deformación.
<i>D</i>	:	Factor de disturbancia.
λ	:	Número de discontinuidades
<i>m o k</i>	:	Coefficiente de reparto de tensiones.
Az.	:	Azimut.
Bz.	:	Buzamiento.
PI.	:	Punto inicial de bocamina.
Adm.	:	Admisible.
Km.	:	Kilómetros.
cm.	:	Centímetros.
cm ² .	:	Centímetros cuadrados.

LISTA DE ABREVIATURAS

h	:	Horas.
m.	:	Metros.
m ² .	:	Metros cuadrados.
mm.	.	Milímetros.
vs.	:	Versus.
%	:	Porcentaje.
Kh	.	Tensiones horizontales.
Ks	.	Tensiones verticales.
msnm.	:	Metros sobre el nivel del mar.
N	:	Norte.
S	:	Sur.
E	:	Este.
W	:	Oeste.
NPMC	:	North Perú Mining Corporation.
SENAMHI	:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
Osinermin	:	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Índice de calidad de roca (RQD) de Deere (1968). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	8
Tabla 2.2. Clasificación de Terzaghi. Fuente: Excavaciones subterráneas en roca (Hoek y Brown, 1985).	9
Tabla 2.3. Clasificación Geomecánica de Bieniawski RMR89. Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).	11
Tabla 2.4. Corrección por orientación de discontinuidades. Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).	11
Tabla 2.5. Características geotécnicas del macizo rocoso. Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).	12
Tabla 2.6. Orientación de las discontinuidades. Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).	12
Tabla 2.7. Calidad del macizo rocoso en relación al Índice RMR. Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).	12
Tabla 2.8. Valores de RQD según Barton y Grimstad (1994). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	15
Tabla 2.9. Valores de Índice de Diaclasado según Barton y Grimstad (1994). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	15
Tabla 2.10. Valores de Índice de Rugosidad de las Discontinuidades según Barton y Grimstad (1994). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	16

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.11. Valores de Índice de Alteración de las Diaclasas según Barton y Grimstad (1994). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	17
Tabla 2.12. Valores de Factor de Reducción por agua en las diaclasas según Barton y Grimstad (1994). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	18
Tabla 2.13. Valores de factores de reducción de tensiones según Barton y Grimstad (1994). Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	19
Tabla 2.14. Clasificación Q de Barton, según Barton, Lien y Lunde, (1974). Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).	20
Tabla 2.15. Valores ESR Fuente: Barton N, 2002	21
Tabla 3.1. Coordenadas de la bocamina - Nivel 3.	32
Tabla 3.2. Ruta 1 de acceso a la zona de investigación	33
Tabla 3.3. Ruta 2 de acceso a la zona de investigación	34
Tabla 3.4. Metodología de la investigación. Fuente: Hernández, (2010.)	36
Tabla 4.1. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 1.	50
Tabla 4.2. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 1.	51
Tabla 4.3. Reporte de Estación Geomecánica 1 – Pl. + 00 m. a Pl. + 20 m.	51
Tabla 4.4. Resultados del sostenimiento por cuadros de maderos, utilizando métodos flectores de maderos, Estación Geomecánica 1.	58

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.5. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 2.	60
Tabla 4.6. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 2.	61
Tabla 4.7. Reporte de Estación Geomecánica 2 – Pl. + 20 m. a Pl. + 57 m.	61
Tabla 4.8. Resultados del sostenimiento por cuadros de maderos, utilizando métodos flectores de maderos, estación geomecánica 2.	68
Tabla 4.9. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 3.	70
Tabla 4.10. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 3.	71
Tabla 4.11. Reporte de Estación Geomecánica 3 – Pl. + 70 m. a Pl. + 109 m.	71
Tabla 4.12. Resultados del sostenimiento por cuadros de maderos, utilizando métodos flectores de maderos, estación geomecánica 3.	78
Tabla 4.13. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 4.	80
Tabla 4.14. Corrección por Orientación de Discontinuidades, Estación Geomecánica 4.	81
Tabla 4.15. Reporte de Estación Geomecánica 4 – Pl. + 190 m. a Pl. + 200 m.	81
Tabla 4.16. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 5.	89
Tabla 4.17. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 5.	90
Tabla 4.18. Reporte de Estación Geomecánica 5 – Pl. + 225 m. a Pl. + 235 m.	90
Tabla 4.19. Desplazamientos totales máximos, relacionado con el medio plástico – Phase ² V8.0	99
Tabla 4.20. Información de la estación geomecánica 1. Anexo A.	108
Tabla 4.21. Información de la estación geomecánica 2. Anexo A.	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.22. Información de la estación geomecánica 3. Anexo A.	110
Tabla 4.23. Información de la estación geomecánica 4. Anexo A.	111
Tabla 4.24. Información de la estación geomecánica 5. Anexo A.	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Diagrama simplificado que representa el movimiento de roca suelta hacia el túnel y la transferencia de carga la roca circundante. Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	9
Figura 2.2. Valores para la resistencia a la compresión uniaxial. Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	13
Figura 2.3. Valores para el RQD. Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	13
Figura 2.4. Valores para el espaciado. Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).	14
Figura 2.5. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton. Fuente: Osinergmin, (2017).	22
Figura 2.6. Índice Geológico de Resistencia para macizos rocosos diaclasados. Fuente: GSI: Una confiable herramienta geológica para la estimación de la resistencia del macizo rocoso (Hoek y Marinos, 2000).	24
Figura 2.7. Relación entre la tensión horizontal media y la tensión vertical en función de la profundidad. Fuente: Teoría de tensiones in situ en rocas isotrópicas y transversalmente isotrópicas, Sheorey (1994).	25
Figura 2.8. Guía para estimar el Factor de Alteración (D). Fuente: El Criterio de Rotura de Hoek-Brown (2002).	27

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.9. Sostenimiento con pernos Fuente: Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea (Cruz, 2004).	29
Figura 3.1. Bocamina de ingreso al Nivel 3 de la Mina Paredones.	32
Figura 3.2. Recorrido de la ruta 1 de acceso a la zona de investigación.	33
Figura 3.3. Recorrido de la ruta 2 de acceso a la zona de investigación.	34
Figura 3.4. Diagrama meteorológico de la Estación Chilete. Fuente: Senamhi, 2018.	35
Figura 3.5. Diagrama meteorológico de la Estación Chilete. Fuente: Senamhi, 2019.	35
Figura 3.6. Equipos y materiales utilizados para la realización de la investigación A. Peine de Barton, B. Lintera, C. Libreta de campo, D. Ácido clorhídrico, E. Brújula, F. Flexómetro, G. GPS, H. Rayador, I. Cámara fotográfica y J. Martillo de Schmidt.	40
Figura 4.1. A. Brecha de falla en la clave del Nivel 3. B. Aglomerado volcánico ubicado en el hastial izquierdo de la excavación subterránea. C. Estructura stockwork ubicado en el hastial izquierdo.	44
Figura 4.2. A. Falla inversa. B. Falla normal. C. Falla normal dextral	46
Figura 4.3. Zonas afectadas por humedad, flujos y putrefacción de cuadros de maderos.	48
Figura 4.4. Proyección estereográfica de la estación 1, generándose caídas de roca por gravedad	52
Figura 4.5. Envoltente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh –Coulumb de la Estación Geomecánica 1.	53
Figura 4.6. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 1.	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4.6. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 1.	55
Figura 4.7. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 1 (esfuerzo de corte vs. distancia).	56
Figura 4.8. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 1.	57
Figura 4.9. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 2, mostrando el desplome de bloques por fricción en relación de las juntas D-1, D-2 y D-3.	62
Figura 4.10. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh –Coulumb de la Estación Geomecánica 2.	63
Figura 4.11. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 2.	64
Figura 4.11. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 2.	65
Figura 4.12. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 2 (esfuerzo de corte vs. distancia).	66
Figura 4.13. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 2.	67
Figura 4.14. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 3, relacionada por deslizamiento por la diaclasa D-1.	72
Figura 4.15. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh –Coulumb de la Estación Geomecánica 3.	73
Figura 4.16. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 3.	74
Figura 4.16. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 3.	75
Figura 4.17. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 3 (Esfuerzo de corte vs. distancia).	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4.18. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 3.	77
Figura 4.19. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 4, muestra el desplazamiento de la cuña entre las juntas D-1 y D-2.	82
Figura 4.20. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh –Coulumb de la Estación Geomecánica 4.	83
Figura 4.21. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 4.	84
Figura 4.21. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 4.	85
Figura 4.22. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 4 (esfuerzo de corte vs. distancia).	86
Figura 4.23. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 4.	87
Figura 4.24. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 5, ocasionando deslizamiento de rocas en relación de la junta D-1.	91
Figura 4.25. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh –Coulumb de la Estación Geomecánica 5.	92
Figura 4.26. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 5.	93
Figura 4.26. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 5.	94
Figura 4.27. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 5 (esfuerzo de corte vs. distancia).	95
Figura 4.28. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 5.	96

LISTA DE PLANOS

	Pág.
PLANO 01 IMAGEN SATELITAL SASPLANET – BING MAPS. Anexo B.	114
PLANO 02 MDT – MDE - UBICACIÓN. Anexo B.	115
PLANO 03 GEOLOGÍA REGIONAL. Anexo B.	116
PLANO 04 GEOLÓGICO - ESTRUCTURAL LOCAL. Anexo B.	117
PLANO 05 GEOTÉCNICO . Anexo B.	118
PLANO 06 TENSO-DEFORMACIONAL. Anexo B.	119
PLANO 07 ZONIFICACIÓN DE INESTABILIDADES CRÍTICAS. Anexo B.	120
PLANO 08 SOSTENIMIENTO SUBTERRÁNEO. Anexo B.	121

RESUMEN

La Mina Paredones está ubicada en el distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca, al SW de la ciudad de Cajamarca. Existen flujos de aguas subterráneas en las instalaciones del Nivel 3, ocasionando inestabilidad geomecánica en la galería principal, relacionado con el desprendimiento de rocas, deformaciones de los sostenimientos anteriores como cuadros de madera y pernos de anclaje. También existen desplazamientos de la roca caja y alteración de los estados tensionales los cuales cambian constantemente con las dimensiones de la galería. El objetivo de esta investigación fue determinar el comportamiento geomecánico del Nivel 3 de la Mina Paredones, para lo cual se ubicaron 5 estaciones para determinar el comportamiento y clasificación geomecánica. El comportamiento del macizo rocoso frente a deformaciones, desprendimiento de bloques y estados tensionales, está ligado a los cambios deformacionales vectoriales y tensionales de cada estación geomecánica, como: la estación 1 y 2 presenta deformaciones en la clave, la estación 3 deformaciones por tensiones en los hastiales y la estación 4 y 5, presenta deformaciones periféricas uniformes por la consistencia de la roca. Así mismo el sostenimiento a aplicar son cuadros de madera, puntales y anclajes sistemáticos por adherencia. Para obtener información de calidad en la investigación geomecánica se ubicaron 5 estaciones definiendo mediante los métodos empíricos como el RMR de calidad: mala (E-2), media (E-1, E-3 y E-5), buena (E-4) y Q de Batton de calidad: muy mala (E-2), mala (E-1), media (E-3, E-5) y buena (E-4). De acuerdo con estos valores se zonificó en tres zonas de inestabilidad: Altamente Peligrosa, Peligrosa y Moderadamente Peligrosa. Obtuvimos los valores de ángulo de orientación tensional ($\alpha = 49^\circ$) y coeficiente de reparto de tensiones ($m = 0.54$), relacionados con estados tensionales y deformaciones máximas que varían entre: 0.00010 m. a 0.0299 m.

Palabras clave: Sostenimiento, comportamiento geomecánico, deformaciones, estados tensionales, discontinuidades e inestabilidad.

ABSTRACT

The Paredones Mine is located in the district of San Bernardino, province of San Pablo and Cajamarca department, to the SW of the city of Cajamarca. Groundwater flows exist at The Level 3 facility, causing geomechanical instability in the main gallery, related to the detachment of rocks, deformations of previous supports such as wooden frames and wooden bolts Anchor. There are also displacements of the box rock and alteration of the tension states which constantly change with the dimensions of the gallery. The objective of this investigation was to determine the geomechanical behavior of Level 3 of the Paredones Mine, for which 5 stations were located to determine the behavior and geomechanical classification. The behavior of the rock massif against deformations, detachment of blocks and tension states, is linked to the vector and tensionder deformational changes of each geomechanical station, such as: station 1 and 2 presents deformations in the key, station 3 stress deformations in the gities and station 4 and 5, has uniform peripheral deformations for the consistency of the rock. Likewise, the support to be applied are wooden frames, struts and systematic anchors by adhesion. In order to obtain quality information in the geomechanical investigation, 5 stations were defined by means of empirical methods such as the RMR of quality: bad (E-2), medium (E-1, E-3 and E-5), good (E-4) and Baton Q of quality: very bad (E-2), bad (E-1), (E-3, E-5) and good (E-4). According to these values, it was zoned in three zones of instability: Highly Dangerous, Dangerous and Moderately Dangerous. We obtained the values of angle of tension orientation ($\alpha = 49^\circ$) and coefficient of stress distribution ($m = 0.54$), related to tension states and maximum deformations that vary between: 0.00010 m. at 0.0299 m.

Keywords: Support, geomechanical behavior, deformations, tension states, discontinuities and instability.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Mina Paredones está ubicada en el distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca, al SW de la ciudad de Cajamarca. La excavación subterránea del Nivel 3 se encuentra emplazado en rocas volcánicas del Grupo Calipuy del Paleógeno – Neógeno, específicamente en el Volcánico Chilete, el cuál está conformado de areniscas tobáceas, aglomerados lenticulares y materiales volcánicos retrabajados, mayormente andesíticos; además encontramos alteraciones en las cajas: techo y piso, diaclasas, fallas y estructuras mineralizadas que conforman la Veta Esperanza, la cual es cortada por las vetas: Murciélago, Pacasmayo, West Pacasmayo, Animas, Norte y Valenciana.

Existen flujos de aguas subterráneas en las instalaciones del Nivel 3, ocasionando inestabilidad geomecánica en la galería principal, relacionado con el desprendimiento de rocas, deformaciones de los sostenimientos anteriores como cuadros de madera y pernos de anclaje. También tenemos desplazamientos de la roca caja y alteración de los estados tensionales los cuales cambian constantemente con las dimensiones de la galería, siendo necesario realizar la caracterización geomecánica.

El problema se plantea en ¿Cuál es el comportamiento geomecánico del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo - Cajamarca?, teniendo como hipótesis: La inestabilidad del Nivel 3, está vinculada con las condiciones litológicas, geoestructurales, hidrogeológicas y de tensiones, que afectan el comportamiento geomecánico de las unidades litológicas del Nivel 3, originando desprendimientos de rocas, deformaciones de los sostenimientos, desplazamientos de la roca caja, debido a los estados tensionales.

La justificación de la tesis busca definir el comportamiento geomecánico del Nivel 3, apartir de resultados que generan inestabilidades relacionados con el

desprendimiento de rocas, deformaciones de los sostenimientos, desplazamientos de la roca caja y alteración de los estados tensionales, que continuamente sigue afectando las labores permitiendo dar a conocer el comportamiento geomecánico con las variables a analizar. Ocasionándose en la galería zonas de peligro, riesgo, vulnerabilidad e incertidumbre, por parte de los trabajadores, visitantes y estudiantes que visualizan esta excavación subterránea.

Los alcances de la investigación son: Descriptiva, correlacional y explicativa. Su objetivo general es determinar el comportamiento geomecánico del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo – Cajamarca. Teniendo como objetivos específicos:

- Cartografiar las unidades litológicas - geoestructurales del Nivel 3
- Determinar las variables geológicas y geomecánicas.
- Analizar los estados tensionales mediante el software Phase².
- Realizar la caracterización geomecánica y la zonificación
- Determinar el tipo de sostenimiento

El orden de los capítulos se describe de la siguiente manera: Capítulo II, conformada por: antecedentes teóricos, bases teóricas y definición de términos; relacionados con la investigación. Capítulo III, muestra la descripción del área de investigación y la metodología utilizada. Capítulo IV, presenta los resultados obtenidos y su discusión con los antecedentes teóricos. Capítulo V, muestra las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Castro y Perez (2013), mediante el análisis “Correlaciones entre las clasificaciones geomecánicas Q y RMR en el túnel exploratorio de “la línea”, cordillera central de Colombia”. Lograron presentar resultados de correlaciones propuestas para las clasificaciones de macizos rocosos RMR y Q, obtenidos a partir de levantamientos de secciones excavadas durante la construcción del Túnel Piloto de la Línea de 8.55 km. de extensión en la Cordillera Central de Colombia. Realizando estudios de criterios geológicos y geotécnicos esperando que sean de utilidad para la construcción del túnel. Las correlaciones lineales por sectores durante la excavación dispuestas por paquetes litológicos del túnel, así como también la transformación logarítmica resulta en distribución de los datos con mayor homogeneidad, hecho que facilita la interpretación y el establecimiento de tendencias entre las dos variables, estas correlaciones se realizaron en los sectores denominados; Complejo Quebradagrande, Complejo Cajamarca, Gabros de la Línea y Cuerpo Pórfido.

Padua et al. (2011), realizó el “Diseño geotécnico del túnel de desfogue del proyecto hidroeléctrico La Yesca, México”. La presa Yesca es conformado de enrocamiento con cara de concreto, construida para la generación de energía eléctrica de pico, con una generación media anual de 1210 GWh. Las obras subterráneas de generación están conformadas por: túneles de conducción, casa de máquinas, túneles de aspiración, galería de oscilación, túnel de desfogue y túneles de acceso, localizadas en la margen derecha de la presa. Utizando criterios empíricos determinaron que la carga de roca fluctura entre 5.90 a 14.40 m. relacionada con la zona plastificación de deformación, con la formación de cuñas

potenciales de presión de roca de 64 kN/m^2 . Aportando que utilizaron el método de elementos finitos (MEF), obteniendo que presenta una altura de sobre carga de 6 m. también definiendo que el método constructivo adoptado es el método austriaco.

Veyrat et al. (2014), realizó el “Análisis tenso-deformacional y diseño de fortificación para una explotación de cobre por tajeo por subniveles. Atacama Kozan (Chile)”, Los métodos analíticos y empíricos, aplicados en las tres unidades litológicas representan calidades de roca de regular a buena, utilizando el método de Mathews. Siendo necesario el empleo de shotcrete. Induciendo plastificaciones en el terreno circundante tanto en sus cajas y además define inestabilidad por cuñas.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

Lazaro (2018), en la tesis: Geomecánica Aplicada al Diseño del Sostenimiento para Mejorar la Estabilidad de las Labores Mineras en la Mina Caridad de la Compañía Minera Lincuna S.A. – 2017. Concluye que el RMR en las distintas estaciones, se clasifica como un macizo rocoso de tipo IIIA, IIIB y IVA. También determina mediante ensayos de laboratorio roca de resistencia regular. Mediante la caracterización geomecánica en cada estación, determina el tipo de sostenimiento a emplear, el sostenimiento más utilizado es pernos de fricción (Split Set). En cuanto a los tajeos el sistema de sostenimiento es el Shotcrete y mallas con pernos de fricción, que se utilizan de acuerdo al terreno y la cartilla geomecánica. Los Hydrabolts, demuestran tener mayor capacidad de anclaje, debido a la presión que ejerce permanentemente el agua atrapada en su interior contra las paredes del taladro.

Calderón (2018), en la tesis: Caracterización Geomecánica para la Determinación del Tipo de Sostenimiento en la Galería Gavilán de Oro de la UEA Ana María. Realizó el mapeo de seis estaciones geomecánica, en las cuales encontró valores de RMR comprendidos entre regular y buena y valores de Q de Barton entre regular, buena y muy buena. Con los valores obtenidos en el Q de Barton se determinó los tipos de sostenimiento, usando el gráfico de Grimstad y

Barton (1993), donde recomendó el colocado de pernos de manera sistemática con espaciados de 1.7, 2.4, 2.2, 3.6, 2.2, 2.6 metros para las estaciones geomecánicas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente. Se apreció la presencia de agua en las seis estaciones para lo cuál propuso el sostenimiento por perno hydrabolt galvanizado de 5 pies. Definiendo dos diseños de sostenimiento para las seis estaciones de la galería. El primer diseño tiene un espaciado de 1 m. entre pernos y consta de 3 pernos por fila en cada metro de avance, diseño que aplica para las estaciones geomecánicas 1, 2, 3 y 5. En el segundo diseño se tiene un espaciado de 1.50 m. entre pernos y consta de 2 pernos por fila en cada metro de avance, diseño que aplica para las estaciones 4 y 6. También define el costo de los tipos de sostenimiento propuestos.

Quispe (2018), en la tesis: Evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Lauricocha del NV. 720, Sociedad Minera Corona S.A. Realiza la evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en función del factor de seguridad y los costos unitarios de sostenimiento, para lo cual utiliza dos criterios de clasificación el RMR de Bieniawski y el GSI de Hoek y Brown para cada una de cuatro estaciones definidas. Determina que en la estación 1 se deberá sostener con perno helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2 metros, en un tramo de 200 metros. En la Estación 2 se debe sostener con malla electrosoldada + perno helicoidal de 7' con un espaciado de 1.2 x 1.2 metros, en un tramo de 150 metros. En la Estación 3 se debe sostener con shotcrete de 2" pulgadas + perno helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2 metros, en un tramo de 200 metros. En la Estación 4 se deberá sostener con cimbras metálicas tipo H6 en un tramo de 100 metros. También concluye que el factor de seguridad debe ser mayor a 1.50 para que las labores permanezcan estables. Finalmente realiza un cuadro de resumen de los costos de sostenimiento propuestos.

2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES

Montoya (2018), en la tesis titulada: Relación geotécnica y litomorfoestructural del túnel de la Mina Predones Nivel 5. Definió con el cartografiado geológico-estructural que el túnel tiene tendencia ENE-WSW, coincidiendo con la secuencia de domos intrusivos y la mineralización con la Veta

Murciélago. Además geotécnicamente el Nivel 5 presenta redistribución de esfuerzos tenso-deformacionales de manera continua y progresiva, logrando un valor promedio del coeficiente de reparto de tensiones $m = 0.55$ y ángulo de orientación tensional $\alpha = 55^\circ$. Sin embargo la investigación muestra labores mineras están siendo susceptibles a cambios tensionales bajos, ligados a fracturamientos moderados a altos, con desplazamientos máximos de geoestructuras del medio plástico: 0.003 m., 0.007 m., 0.013 m., 0.114 m. y 0.782 m., afectando la estabilidad de las labores mineras subterráneas, corroborando mediante métodos numéricos Phase² V8.0 que muestra valores de FS entre: 0.54, 2.35, 3.42, 3.47 y 0.54. Además define cuatro zonas como: zona de sostenimiento, zona estable, zona de transición con sostenimiento y zona de hundimiento.

Acejias (2019), en la tesis: Geomecánica Aplicada al Control de las Labores Mineras para la Minimización de la Caída de Rocas en la Mina Paredones Nivel 5. Concluye que el RMR en la lava andesítica es de calidad media con un promedio de 53, en el pórfido andesítico es de calidad regular a buena con un promedio de 69 y en la veta es de calidad buena con un promedio de 62.5. Utilizó el programa Phase² V8.0 mostrando que la mayoría de excavaciones incluyendo la Veta Murciélago tienen factores de seguridad aceptables, pero hay algunas áreas de la excavación subterránea que presentan inestabilidad potencial. También estimó el tipo de sostenimiento en base al Índice Q con calidades de rocas buena, media y mala.

Cruzado (2017), en la tesis: Evaluación Geomecánica del Túnel de la Central Hidroeléctrica Potrero - San Marcos – Cajamarca. Determina la inestabilidad geomecánica que presenta el túnel, para lo cual definió 18 estaciones geomecánicas para determinar su comportamiento geomecánico. Obtiene 7 sistemas de discontinuidades y tipos de roca de buena calidad y regular calidad,. Propone reforzar con pernos cementados de 2.10 m colocados puntualmente para roca tipo II y pernos cementados de 2.10 m con espaciado 1.80 m x 1.80 m para roca tipo III. Mediante el software Dips V6 comprobó la formación de cuñas y su comportamiento con respecto al eje del túnel. Concluye que el túnel de la Central Hidroeléctrica Potrero presenta Inestabilidad Geomecánica.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

Tomando en consideración lo expresado por González de Vallejo (2002), la finalidad de las clasificaciones geomecánicas es la obtención de parámetros geomecánicos para su empleo en el diseño y proyecto de obras de ingeniería. Estas clasificaciones aportan mediante la observación directa de las características de los macizos rocosos y la realización de ensayos, índices de calidad relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y sus características frente a los sostenimientos de túneles y taludes.

Las características de los macizos rocosos que vamos a considerar en las diferentes clasificaciones geomecánicas que utilizaremos son las siguientes:

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

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas son el RMR de Bieniawski y el Q de Barton, que se utiliza exclusivamente en túneles. Estas clasificaciones geomecánicas nos permiten determinar el tipo de sostenimiento a emplear en la excavación subterránea.

Se ha utilizado las clasificaciones geomecánicas RQD, RMR y Q de Barton para definir el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del túnel del Nivel 3 (Veta Esperanza).

- **ÍNDICE DE CALIDAD DE ROCA (RQD, 1964)**

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

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

λ = Número de discontinuidades / longitud (metros).

Tabla 2.1. Índice de calidad de roca (RQD) de Deere (1968).

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

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

- **TERZAGHI (1946)**

Método de clasificación de carga de roca. Terzaghi (1946), formuló el primer sistema de clasificación para calcular las cargas que deben soportar los marcos de acero en los túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

Terzagui propuso que en el emplazamiento de excavaciones subterráneas en basamentos rocosos, se rompe el equilibrio del macizo rocoso y se produce un relajamiento de la cohesión de las rocas circundantes a la excavación, transmitiendo el peso de la carga de roca W_1 al material de los lados del túnel, equivalente a una altura H_p . El ancho B_1 de la zona de roca donde existe el movimiento, dependerá de las características de la roca y de las dimensiones H_t y B del túnel.

Tabla 2.2. Clasificación de Terzaghi.

Estado de la roca	Carga de roca H_p (pies)	Observaciones
1. Dura y masiva	Cero	Solo se necesita refuerzo escaso si hay desprendimiento o chasquido.
2. Dura pero estratificada o esquistosa	0 a 0.50B	Refuerzo escaso mas que nada como proteccion contra desprendimientos.
3. Masiva, ligeramente fisurada	0 a 0.25B	La carga puede cambiar en forma erratica de un punto a otro.
4. Medianamente fracturada en bloques algo abiertos	0.25B a 0.35(B + H_t)	No hay presion lateral.
5. Muy fracturada en bloques y las fracturas abiertas	(0.35 a 1.10)(B + H_t)	Poca o ninguna presion lateral.
6. Totalmente triturada pero quimicamente inalterada	1.10(B + H_t)	Presiones laterales considerables. Los efectos de las infiltraciones hacia el piso del tunel requieren apoyo continuo para las partes bajas de los marcos, o bien marcos circulares.
7. Roca comprimida, profundidad moderada	(1.10 a 2.20)(B + H_t)	Considerable presion lateral. Se requiere plantilla apuntalada. Es preferible usar marcos circulares.
8. Roca comprimida, a gran profundidad	(2.20 a 4.50)(B + H_t)	
9. Roca expansiva	Hasta 250 pies, independientemente del valor (B + H_t)	Marcos circulares indispensables. En casos extremos, usese refuerzo elastico.

Fuente: Excavaciones subterráneas en roca (Hoek y Brown, 1985).

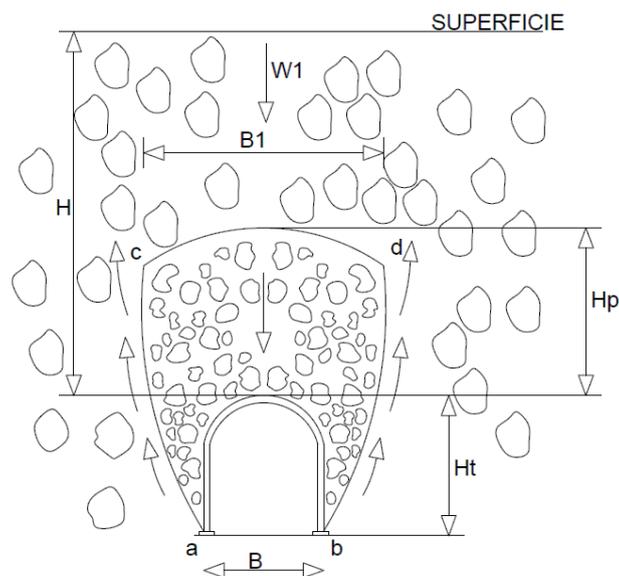


Figura 2.1. Diagrama simplificado que representa el movimiento de roca suelta hacia el túnel y la transferencia de carga la roca circundante.

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

● CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO (RMR, 1989)

Este método fue desarrollado por Bieniawski en 1973 con actualizaciones en 1979 y 1989. Esta clasificación nos permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo rocoso y sostenimiento en túneles.

El método se aplica asignando la valoración correspondiente a cada uno de sus seis parámetros. El factor de ajuste, depende de la orientación de las discontinuidades y adquiere valores negativos, toma valores distintos para túneles, cimentaciones y taludes, y adquiere más importancia en taludes. El resultado de la suma de los seis parámetros nos da el índice final RMR, que varía entre 0 y 100 y se divide en cinco clases de roca, donde el valor 0 nos indica que la roca es de muy mala calidad y el valor 100 nos indica que la roca es de muy buena calidad. Los parámetros para el cálculo del RMR son:

1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
2. Grado de fracturación en términos del RQD.
3. Espaciado de las discontinuidades.
4. Condiciones de las discontinuidades, que incluye:
 - Longitud de las discontinuidades.
 - Abertura.
 - Rugosidad.
 - Relleno.
 - Alteración.
5. Condiciones hidrogeológicas.
6. Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Tomando en consideración lo expresado por González de Vallejo (2004), para aplicar la clasificación RMR se divide el macizo rocoso en tramos que presenten características geológicas uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos de los seis parámetros antes mencionados para luego luego estimar el RMR para cada tramo.

Tabla 2.3. Clasificación Geomecánica de Bieniawski RMR89.

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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2.4. Corrección por orientación de discontinuidades.

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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2.5. Características geotécnicas del macizo rocoso.

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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2.6. Orientación de las discontinuidades.

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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2.7. Calidad del macizo rocoso en relación al Índice RMR.

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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

• **Curvas de correlación**

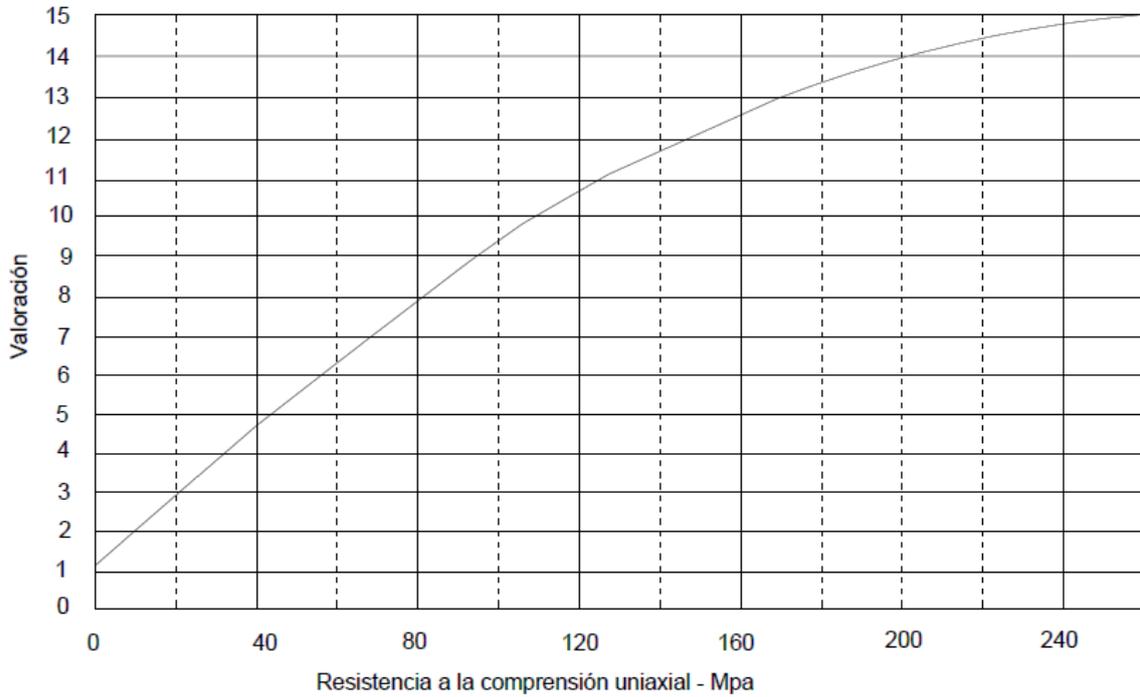


Figura 2.2. Valores para la resistencia a la compresión uniaxial.
Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

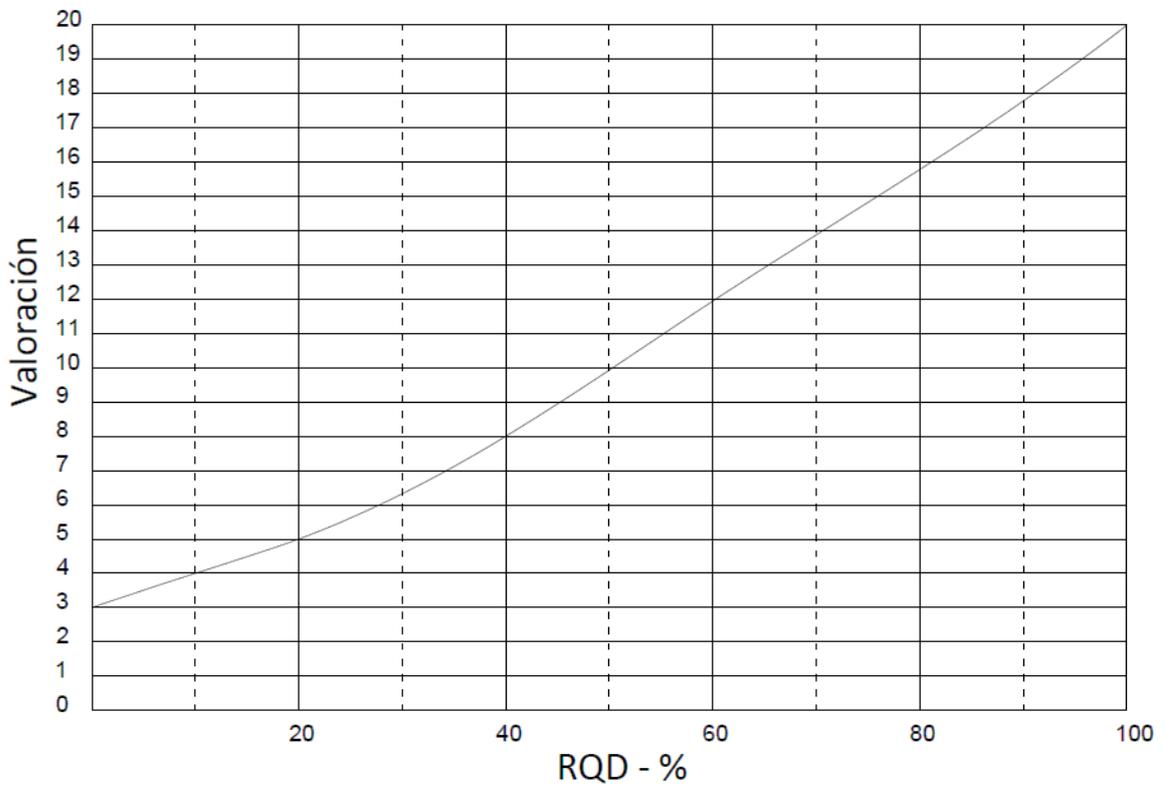


Figura 2.3. Valores para el RQD.
Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

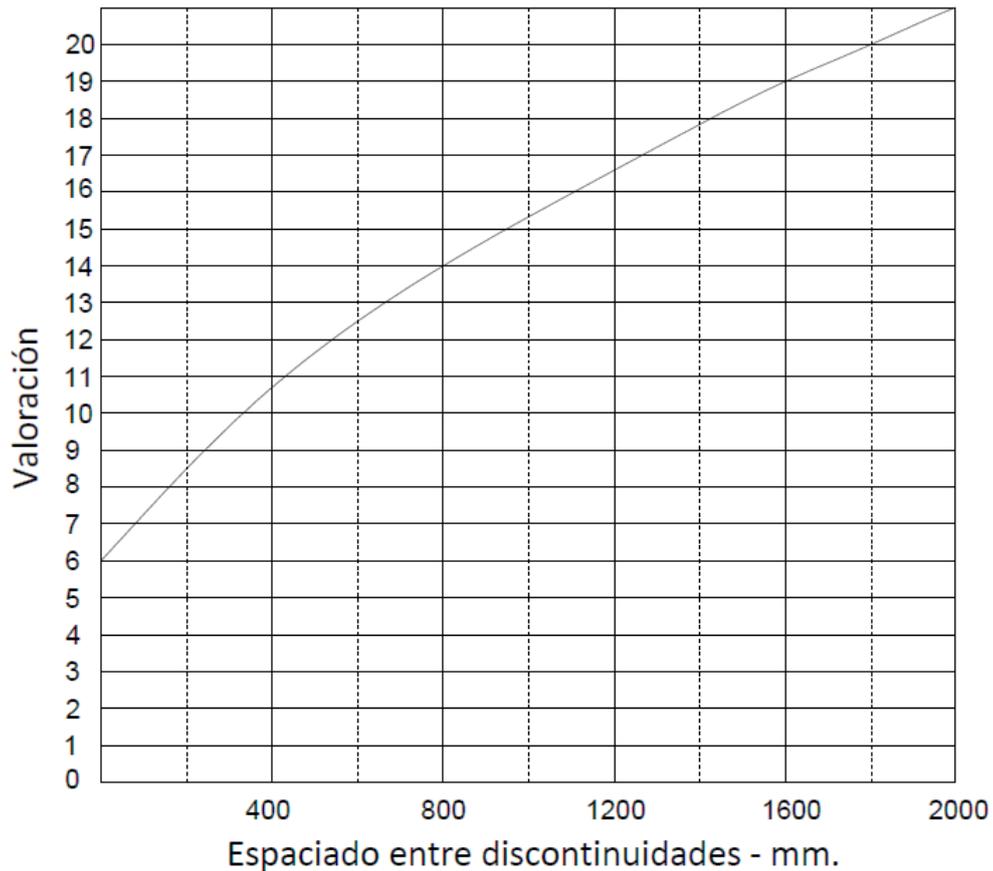


Figura 2.4. Valores para el espaciado.

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

- **ÍNDICE Q (BARTON, 1974)**

Se le conoce también como Índice de Calidad de Túneles (NGI), desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, es un sistema de clasificación del macizo rocoso que nos permite estimar el sostenimiento de túneles en función del índice Q de calidad geotécnica, definido como:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) * \left(\frac{J_r}{J_a} \right) * \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Los seis parámetros que definen estos cocientes son:

1. RQD: Índice de Calidad de Roca.

Tabla 2.8. Valores de RQD según Barton y Grimstad (1994).

1. Índice de Calidad de la Roca	RQD (%)
A. Muy Mala	0 – 25
B. Mala	25 – 50
C. Regular	50 – 75
D. Buena	75 – 90
E. Excelente	90 - 100

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

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

Tabla 2.9. Valores de Índice de Diaclasado según Barton y Grimstad (1994).

2. Número de familias de diaclasas	Jn
A. Masivo, sin o con pocas diaclasas.	0,5 – 1,0
B. Una familia de diaclasas.	2
C. Una familia de diaclasas + una aislada.	3
D. Dos familias de diaclasas.	4
E. Dos familias de diaclasas + una aislada.	6
F. Tres familias de diaclasas.	9
G. Tres familias de diaclasas + una aislada.	12
H. Cuatro o más familias de diaclasas.	15
I. Roca triturada, terregal.	20

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

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

Tabla 2.10. Valores de Índice de Rugosidad de las Discontinuidades según Barton y Grimstad (1994).

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

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

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

Tabla 2.11. Valores de Índice de Alteración de las Diaclasas según Barton y Grimstad (1994).

4. Número de alteración de las diaclasas.	Ja	Ángulo de fricción
a) Contacto en las paredes de la roca.		
A. Relleno soldado, duro, inablandable, relleno impermeable.	0,75	
B. Paredes inalteradas, solo con manchas de superficie.	1,0	25° – 35°
C. Paredes ligeramente alteradas, con recubrimiento de minerales inablandables, partículas arenosas, roca triturada sin arcilla.	2,0	25° – 30°
D. Recubrimientos limosos o areno arcillosos, pequeñas partículas de arcilla (inablandable).	3,0	20° – 25°
E. Recubrimientos ablandables o con arcilla de baja fricción o sea caolinita o mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas (recubrimientos sin continuidad de 1 – 2 mm de espesor o menos).	4,0	8° – 16°
b) Contacto en las paredes antes de un cizalleo de 10 cm.		
F. Partículas arenosas, roca desintegrada sin arcilla.	4,0	25° – 30°
G. Rellenos de minerales arcillosos muy consolidados e inablandables (continuos < 5 mm de espesor).	6,0	16° – 24°
H. Rellenos de minerales arcillosos de consolidación media o baja, ablandables (continuos < 5 mm de espesor).	8,0	8° – 16°
I. Rellenos de arcillas expansivas, montmorillonita (continuos < 5 mm de espesor). El valor Ja depende del porcentaje de partículas expansivas y del acceso de agua.	8,0 – 12,0	6° – 12°
c) Sin contacto de las paredes después del cizalleo.		
J. Zona de capa o arcilla desintegrada o triturada (véase G, H, I para condiciones de arcilla)	6,0	6° – 24°
K. Zona de capa o arcilla desintegrada o triturada (véase G, H, I para condiciones de arcilla)	8,0	
L. Zona de capa o arcilla desintegrada o triturada (véase G, H, I para condiciones de arcilla)	8,0 – 12,0	
M. Zonas de capa o arcilla limosa o arenosa, pequeñas fracciones de arcilla inablandable.	5,0	
N. Zonas o capas gruesas de arcilla (véase G, H, I para condiciones de arcilla).	10,0 – 13,0 13,0 – 20,0	6° – 24°
O. Zonas o capas gruesas de arcilla (véase G, H, I para condiciones de arcilla).		
P. Zonas o capas gruesas de arcilla (véase G, H, I para condiciones de arcilla).		

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

5. J_w : Coeficiente asociado a la condición de aguas en las diaclasas presentes en el macizo rocoso.

Tabla 2.12. Valores de Factor de Reducción por agua en las diaclasas según Barton y Grimstad (1994).

5. Factor de reducción por agua en las diaclasas.	J_w	Presión Kgf/cm ²
A. Excavación seca o poca infiltración, o sea < 5 lit/min localmente.	1,0	< 1,0
B. Infiltración o presión mediana con lavado ocasional de los rellenos.	0,66	1,0 – 2,5
C. Gran infiltración o presión alta en roca competente con diaclasas sin relleno..	0,50	2,5 – 10,0
D. Gran infiltración a presión alta, lavado importante de los rellenos.	0,33	2,5 – 10,0
E. Infiltración o presión excepcionalmente alta con las voladuras, disminuyendo con el tiempo.	0,2 – 0,1	> 10
F. Infiltración o presión excepcionalmente alta en todo momento.	0,1 – 0,05	> 10

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

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

Tabla 2.13. Valores de factores de reducción de tensiones según Barton y Grimstad (1994).

6. Factor de reducción de tensiones.		SRF		
a) Zonas de debilidad que interceptan la excavación y que pueden ser la causa de que el macizo se desestabilice cuando se construye el túnel				
A.	Múltiples zonas de debilidad que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada, roca circundante muy suelta (cualquier profundidad).	10,0		
B.	Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación < 50 m).	5,0		
C.	Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación > 50 m).	2,5		
D.		7,5		
E.	Zonas de fractura aisladas en roca competente sin arcilla, profundidad de excavación < 50 m.	5,0		
F.	Zonas de fractura aisladas en roca competente sin arcilla, profundidad de excavación > 50 m.	2,5		
G.	Diaclasas abiertas sueltas, diaclasado intenso cualquier profundidad.	5,0		
		σ_c / σ_1	σ_t / σ_1	SRF
b) Rocas competentes, problemas de tensiones.				
H.	Tensiones bajas, cerca de la superficie.	> 200	> 13	2,5
J.	Tensiones de nivel medio.	200 – 10	13 – 0,66	1,0
K.	Elevado nivel de tensiones, estructura muy cerrada generalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de las paredes.	10 – 5	0,66 – 0,33	0,5 - 2
L.	Planchoneo moderado después de una hora en roca masiva.	5 – 3	0,5 – 0,65	5 - 50
M.	Planchoneo y explosión de roca en pocos minutos en roca masiva.	3 – 2	0,65 - 1	50 - 200
N.	Intensa explosión de roca e inmediata deformación dinámica en roca masiva.	< 2	> 1	200 - 400
c) Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente, bajo la influencia de presiones altas de la roca.				
O.	Presiones compresivas moderadas.			5 - 10
P.	Presiones compresivas altas.			10 - 20
d) Roca expansiva, acción química expansiva dependiendo de la presencia de agua.				
Q.	Presiones expansivas moderadas.			5 - 10
R.	Presiones expansivas altas.			10 - 20

Fuente: Introducción a la Ingeniería de Túneles (Gavilanes y Andrade, 2004).

Los 3 factores de la expresión representan:

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

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

Tabla 2.14. Clasificación Q de Barton, según Barton, Lien y Lunde, (1974).

Valoración Q	Calidad
0.001 – 0.01	Roca Excepcionalmente Mala
0.01 – 0.1	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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

- **ESR (Relación de soporte de excavación):**

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

Tabla 2.15. Valores ESR

Tipo de excavación	ESR
A. Excavaciones mineras temporales.	3.00 – 5.00
B. Piques verticales i) sección circular ii) sección cuadrada y rectangular	2.50 - 2.00
C. Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con excepción de las cámaras de alta presión para compuertas), túneles piloto (exploración), excavaciones parciales para cámaras subterráneas grandes.	1.60
D. Cámaras de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarriles pequeños, cámaras de alta presión, túneles auxiliares.	1.30
E. Casas de máquina, túneles carreteros y ferrocarrileros mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel.	1.00
F. Estaciones nucleares eléctricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deportes y reuniones, fábricas	0.80
G. Cavernas y túneles muy importantes de una gran vida utilerías de gas.	0.50

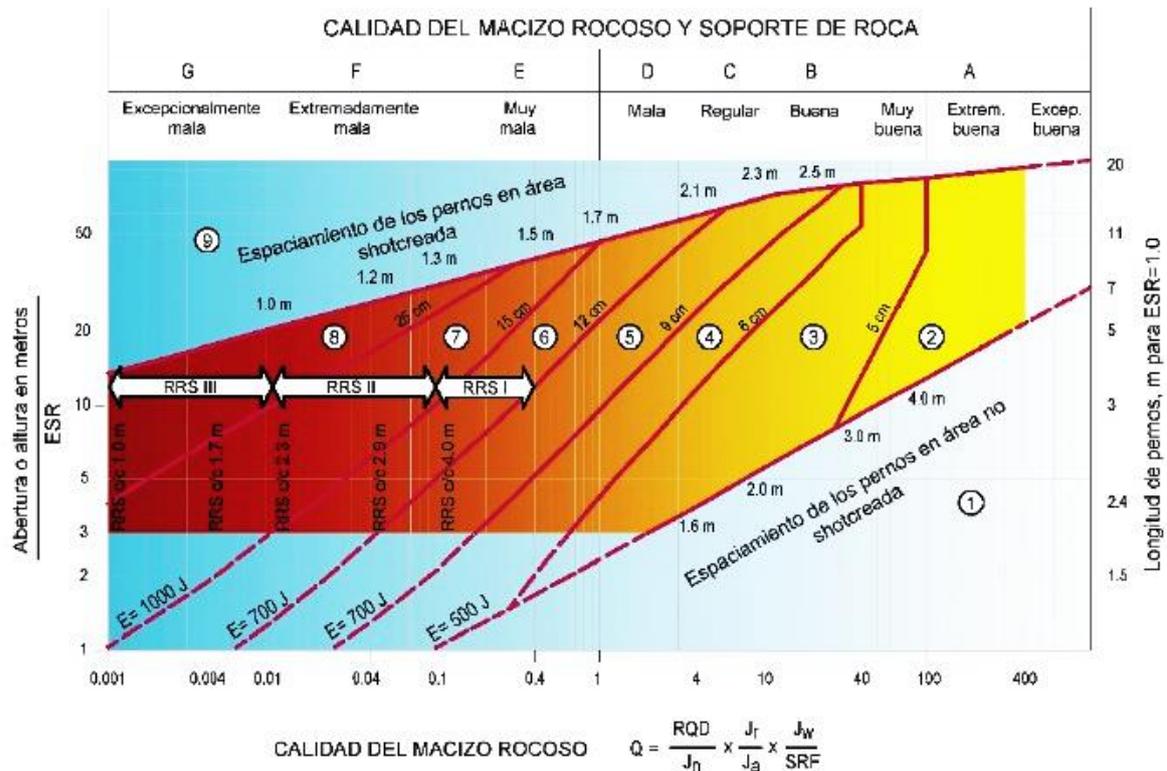
Fuente: Barton N, 2002

- **De (Diámetro equivalente):**

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

$$De = \frac{\text{Ancho, diámetro o altura (m) de la excavación}}{\text{Relación de sostenimiento de la excavación (ESR)}} \quad \text{Ecuación 3}$$

En el gráfico de Osinergmin (2017), mostramos la calidad del Macizo Rocosos y el tipo de soporte que debe utilizarse considerando el Q de Barton y el Diámetro equivalente (De).



CATEGORÍAS DE REFUERZO

1. Sin soporte o empernado puntual
2. Empernado puntual, SB
3. Empernado sistemático más shortcrete proyectado con espesores de 5-6 cm con fibra, B+Sfr
4. Empernado sistemático más shortcrete proyectado con espesores de 6-9 cm con fibra, Sfr (E500) + B
5. Empernado sistemático más shortcrete proyectado con espesores de 6-9 cm con fibra, Sfr (E700) + B
6. Cimbras, empernado sistemático más shortcrete proyectado con espesores de 12-15 cm con fibra, Sfr (E700) + RRSI+B
7. Cimbras, empernado sistemático más shortcrete proyectado con espesores > 1.5 cm con fibra, Sfr(E100) +RRSII+B
8. Revestimiento con concreto, CCA o Sfr (E1000) +RRSII+B
9. Evaluación especial
Espaciamiento de pernos principalmente basado con ϕ 20 m.
E= Absorción de energía en fibra reforzada con shortcrete proyectado.
ESR= Radio de soporte de la excavación.
Áreas con líneas de daño que no tiene data empírica.

RRS = Espaciamiento relacionado con el valor Q

- Si 30/6 ϕ 16- ϕ 20 (abertura de 10 m)
D40/6+2 ϕ 16-20 (abertura de 20 m)
- Si 35/6 ϕ 16-20 (abertura de 5 m)
D45/6 + 2 ϕ 20 (abertura de 20m)
- D40/6+4 ϕ 16-20 (abertura de 5 m)
D55/6+4 ϕ 20 (abertura de 10 m)
Evaluación especial(abertura de 20 m)

SIMBOLOGÍA:

- SI30/6 = Única capa de concreto proyectado más 6 pernos de anclaje
- D= doble capa de refuerzo
- ϕ 16= Pernos de diámetro de 16 mm
- c/c= Espaciamiento RSS, Centro - Centro

Figura 2.5. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton.
Fuente: Osinergmin, (2017).

- **ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI, 1997)**

El Índice de Resistencia Geológica desarrollado por Hoek y Brown en 1997, es un método de clasificación geomecánica que se basa en la identificación y clasificación de dos características fundamentales para su cálculo, las cuales son la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades. (Gavilanes y Andrade, 2004).

La valoración del GSI también puede determinarse por medio de los valores del RMR y Q de Barton.

Para $RMR_{89} > 23$, el índice de resistencia geológica es:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad \text{Ecuación 9}$$

Para $RMR_{89} < 23$, no se puede usar el valor del RMR para el cálculo del GSI, en su lugar se recurre a utilizar la valoración del Q de Barton, donde los valores de J_w y SRF asumirán una valoración de 1. El índice Q' se calcula como:

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) * \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Por lo tanto el valor del GSI se calcula como:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad \text{Ecuación 11}$$

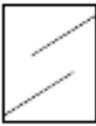
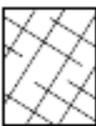
INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICO GSI JUNTAS DE LA MASA ROCOSA (Modificado por Hoek & Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, estime el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es mas realista de fijar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

Figura 2.6. Índice Geológico de Resistencia para macizos rocosos diaclasados.
Fuente: GSI: Una confiable herramienta geológica para la estimación de la resistencia del macizo rocoso (Hoek y Marinos, 2000).

2.2.2 TEORÍA DE SHEOREY (1994)

Es un modelo de esfuerzos termo-elastoestático que busca estimar las tensiones en la corteza terrestre, considerando la variación de la elasticidad, la densidad y el coeficiente de expansión térmica en la corteza y manto terrestre. Busca obtener el esfuerzo horizontal en formaciones blandas, fracturadas y generalmente débiles. Manifiestando que las principales causas de los estados de esfuerzos en la corteza terrestre son: (I) la gravedad, (II) la restricción de desplazamientos laterales o presión de confinamiento (se expresa en función de la relación de Poisson), (III) la tectónica de placas, (IV) las estructuras geológicas, (V) las propiedades de la roca y (VI) la topografía del terreno. (Sheorey, 1994).

$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{Z} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

E_h : Módulo de deformación en dirección horizontal en GPa.

Z: Profundidad en m.

K: Coeficiente de reparto de tensiones

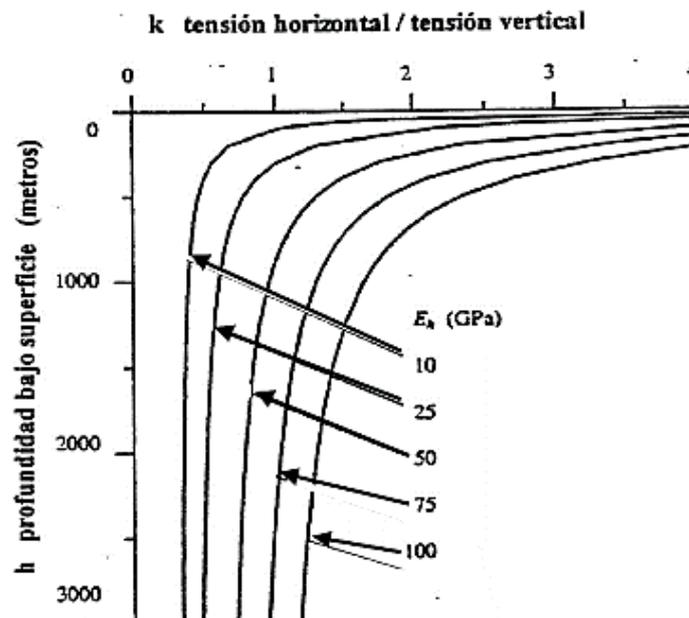


Figura 2.7. Relación entre la tensión horizontal media y la tensión vertical en función de la profundidad.

Fuente: Teoría de tensiones in situ en rocas isotrópicas y transversalmente isotrópicas, Sheorey (1994).

2.2.3 CRITERIO DE ROTURA HOEK – BROWN (1980)

Fue desarrollado por Hoek y Brown en 1980 y su última actualización en el 2002, el punto de partida conceptual para este criterio fue la teoría de Griffith. El criterio generalizado de Hoek-Brown (2002) sirve para evaluar la resistencia de los macizos rocosos y matriz rocosa, mediante los valores adecuados para los parámetros de la roca, según la gráfica de relación de esfuerzos principales. Hoek y Brown sustituyeron el índice RMR por el GSI, por considerar que la aplicación del RMR no se adecuaba al análisis de macizos rocosos de mala calidad. El criterio de rotura se establece como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos mayor (axial) y menor (confinante) respectivamente.
- M_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso.
- m_b es un valor reducido (para macizos rocosos) de la constante m_i (para la roca intacta).

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

- s y a son constantes del macizo rocoso.

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

- D depende del grado de perturbación al cuál ha estado sometido el macizo rocoso, causado por la voladura y las tensiones de relajación. Este factor varía de 0 a 1 donde la valoración 0 pertenece a macizos rocosos no perturbados y 1 para macizos rocosos altamente perturbados.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D Sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora TBM con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.</p>	<p>D=0</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladura) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.</p>	<p>D=1</p>
	<p>Voladura de muy alta calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.</p>	<p>D=0.8</p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de Ingeniería Civil dan lugar a pequeños daños del macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta alguna alteración.</p>	<p>D=0.7 Good blasting D=1.0 Poor blasting</p>
	<p>Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante ripado y empuje de tractores de orugas y el grado de afectación a los taludes será menor</p>	<p>D=1.0 Production blasting D=0.7 Mechanical excavation</p>

Figura 2.8. Guía para estimar el Factor de Alteración (D).
 Fuente: El Criterio de Rotura de Hoek-Brown (2002).

Para estimar la resistencia de un macizo rocoso diaclasado y sus características de deformación se requiere de los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
- Constante m_i para la roca intacta.
- GSI del macizo rocoso.

2.2.4 SOSTENIMIENTO

Según Osinergmin (2017), “el sostenimiento en excavaciones subterráneas tiene la finalidad de asegurar, controlar y mantener la estabilidad de éstas, a fin de proporcionar condiciones seguras de trabajo y brindar acceso a las labores subterráneas”. Los tipos de sostenimiento son: activos donde los elementos de sostenimiento pasan a formar parte integral de la roca y pasivos donde los elementos de sostenimiento son externos a la roca. Los tipos de sostenimiento pueden ser cuadros de madera, cimbras metálicas, puntales, gatas hidráulicas, pernos de anclaje, pernos con resina, barra helicoidal, swellex, Split set, cables, malla (electro-soldada y eslabonada) y shotcrete. Para determinar el tipo de sostenimiento a más adecuado se debe tener en cuenta la caracterización geomecánica del macizo rocoso, los requerimientos de servicio de la excavación, el equipo de construcción y los costos de instalación.

● SOSTENIMIENTO CON PERNOS

Es un tipo de sostenimiento activo y actúa como refuerzo de la roca. Los distintos tipos de pernos se diferencian por sus características de anclaje que puede ser por expansión, adherencia o fricción, o por su capacidad de deformarse. En roca masiva o levemente fracturada y en rocas fracturadas, el papel principal de los pernos de roca es el control de la estabilidad de los bloques y cuñas rocosas inestables. Ésto es lo que se llama también el efecto cuña (Cruz, 2004).

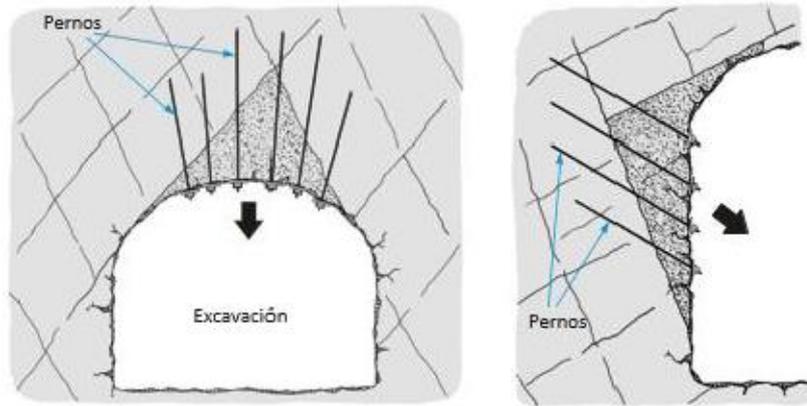


Figura 2.9. Sostenimiento con pernos

Fuente: Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea (Cruz, 2004).

● **SOSTENIMIENTO CON MADERA**

Se utilizan para el sostenimiento de túneles en rocas de muy mala calidad (muy fracturadas, alteradas, que requieren soporte inmediato). Constan de tres piezas: dos postes y un sombrero, además de dos tirantes que unen los cuadros de madera. Los cuadros están diseñados para soportar cargas verticales debido al peso muerto de la roca del techo del túnel (Osinergmin, 2017).

La instalación de la madera, como elemento de soporte, en las excavaciones subterráneas, continuará vigente en la pequeña y mediana minería por su reducido costo y de fácil manipulación, reducido peso, alta elasticidad y buena maniobrabilidad y en presencia de agua aumenta su durabilidad (Berrocal, 2015).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Bulones de expansión: En esencia el anclaje se consigue a través de una cuña que penetra entre varias piezas móviles, llamadas conchas, que constituyen la cabeza del anclaje (Gutiérrez 2015).

Discontinuidades: Referencia a cualquier plano de separación en el macizo rocoso, pudiendo tener origen sedimentario, como las superficies de estratificación o laminación, diagenético o tectónico, como las diaclasas o las fallas (González de Vallejo, 2002).

Matriz rocosa: Material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. (González de Vallejo, 2002).

Modelo matemático: Representa o simula el comportamiento mecánico de los macizos rocoso y los elementos estructurales presentes en el entorno de la excavación (Ramírez et al., 2008).

Falla: Están asociadas con los límites entre las placas tectónicas de la Tierra. En una falla activa, las piezas de la corteza de la tierra a lo largo de la falla, se mueven con el transcurrir del tiempo. El movimiento de estas rocas puede causar terremotos. Las fallas inactivas son aquellas que en algún momento tuvieron movimiento a lo largo de ellas pero que ya no se desplazan. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Patilla: Sirve para amortiguar la presión, aunque esta sujeta a compresión perpendicular a las fibras, permitiendo prolongar la vida útil de del puntal (Donaires, 1965).

Sostenimiento: Término usado para describir los materiales y procedimientos utilizados para mejorar la estabilidad y mantener la capacidad portante de la roca en los bordes de una excavación subterránea (Lopez, 2011).

Veta: Estructura paralelepípeda, generalmente mineralizada, presentando una potencia, largo y una profundidad; constituyen yacimientos de rendimiento económico (Davila, 2011).

Tensión: Esfuerzo por unidad de área que actúa sobre un cuerpo deformándolo. Son dos o más esfuerzos de direcciones opuestas (Davila, 2011).

Escudos: Consiste en dejar una capa de mineral de 0.50 a 1.00 m. de espesor en los hastiales del tajeo, siendo el mineral de mejor calidad que la roca encajonante, lo cual servirá como sostenimiento para las cajas, donde la roca es de mala calidad (Cruz, 2004).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

El Nivel 3 de la Mina Paredones se encuentra ubicada al sur oeste de la ciudad de Cajamarca en los andes orientales del Perú. Geográficamente en el distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca; ubicado en el Cuadrángulo de Cajamarca 15-f, con coordenadas UTM-WGS 84 – ZONA 17S.

Tabla 3.1. Coordenadas de la bocamina - Nivel 3.

Bocamina	Este (m.)	Norte (m.)	Cota (msnm.)
Nivel 3	741177.00	9204036.00	1090.00



Figura 3.1. Bocamina de ingreso al Nivel 3 en la Mina Paredones.

3.2 ACCESIBILIDAD

Para llegar a la zona de estudio partimos con movilidad contratada (Bus Coaster) con orientación NW, por la ruta de cajamarca a la provincia de San Pablo, luego seguimos en la orientación SW hasta llegar al distrito de San Bernardino, para posteriormente dirgirnos saliendo de la carretera asfaltada, con dirección del Río Llaminchan hasta llegar a Mina Paredones. Posteriormente con orientación SE hasta llegar al Nivel 3.

Tabla 3.2. Ruta 1 de acceso a la zona de investigación.

Tramo		Tipo de vía	Estado de vía	Transporte	Distancia (Km)	Tiempo (h)
De	A					
Cajamarca	San Pablo	Asfaltada	Regular	Camioneta	71.00	01:45
San Pablo	San Bernardino	Asfaltada	Regular	Camioneta	21.80	00:26
San Bernardino	Mina Paredones	Asfaltada	Regular	Camioneta	5.00	00:12
Mina Paredones	Nivel 3	Trocha Carrozable	Mala	Caminando	2.00	01:00

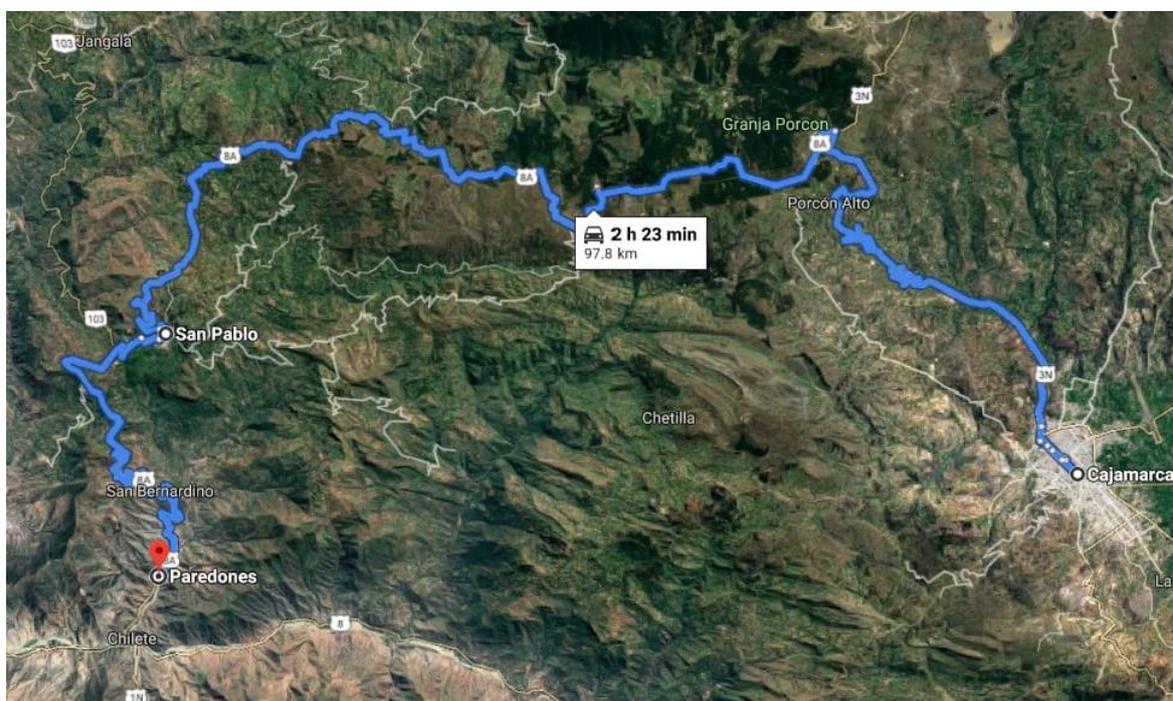


Figura 3.2. Recorrido de la ruta 1 de acceso a la zona de investigación.

Tabla 3.3. Ruta 2 de acceso a la zona de investigación.

Tramo		Tipo de vía	Estado de vía	Transporte	Distancia (Km)	Tiempo (h)
De	A					
Cajamarca	San Juan	Asfaltada	Regular	Camioneta	35.20	00:37
San Juan	Magdalena	Asfaltada	Regular	Camioneta	24.70	00:34
Magdalena	Chilete	Asfaltada	Regular	Camioneta	26.00	00:41
Chilete	Mina Paredones	Asfaltada	Regular	Camioneta	5.00	00:08
Mina Paredones	Nivel 3	Trocha Carrozable	Mala	Caminando	2.00	01:00

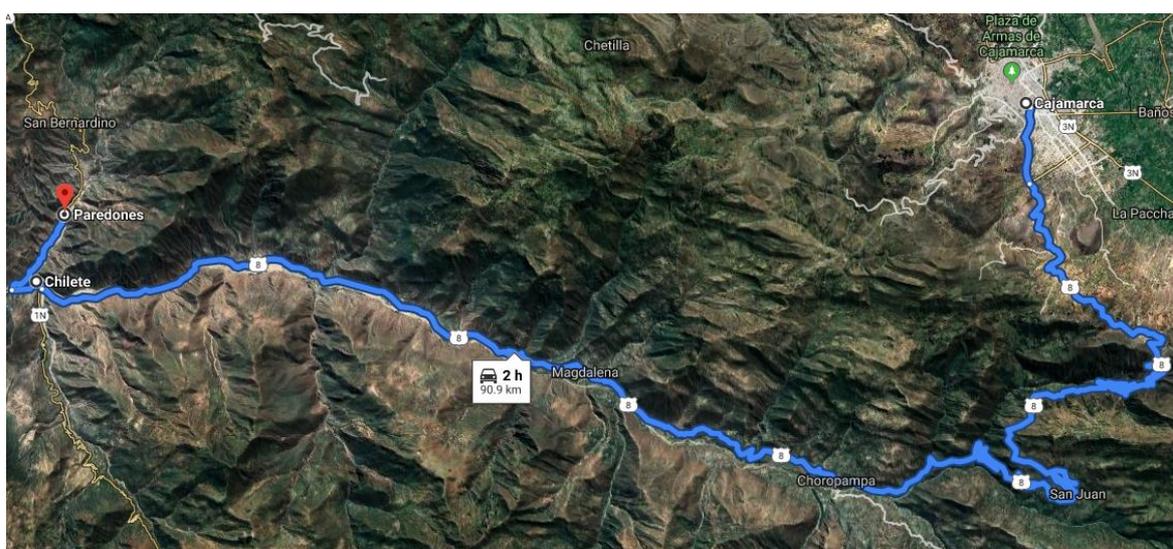


Figura 3.3. Recorrido de la ruta 2 de acceso a la zona de investigación.

3.3 CLIMA

El clima predominante es cálido en el día y templado durante la noche con una temperatura promedio de 18 - 20°C y 88% de humedad en invierno, buen sol y escasas lluvias durante el año. La estación meteorológica tipo: convencional – San Pablo – 000319, con Latitud: 7° 7' 04'', Longitud: 78° 49' 51'' y cota: 2190 msnm.; se encuentra en el distrito: San Pablo, provincia: San Pablo y departamento: Cajamarca.

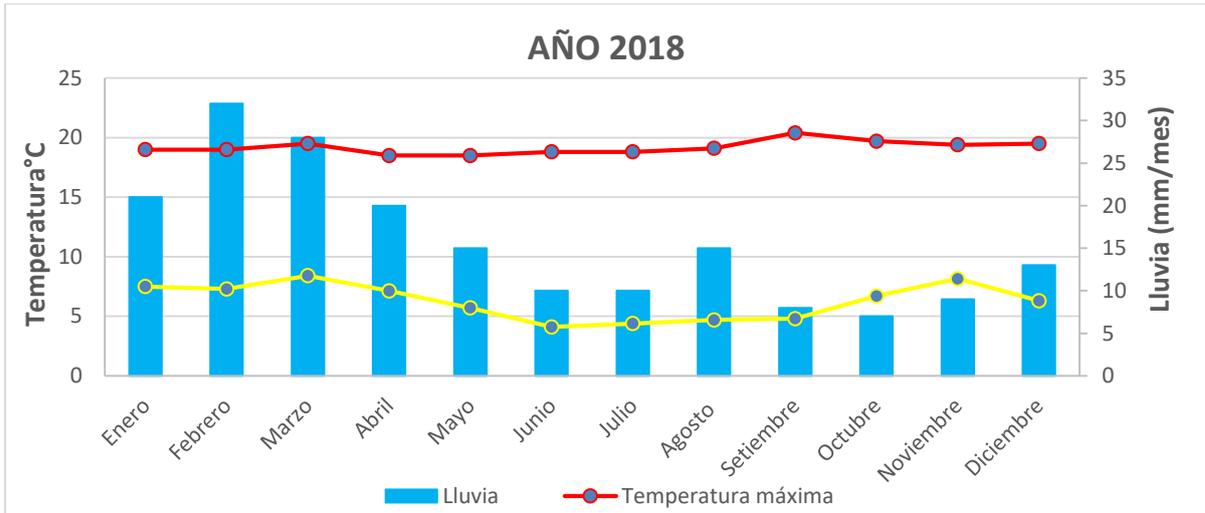


Figura 3.4. Diagrama meteorológico de la Estación Chilete
Fuente: Senamhi, 2018.

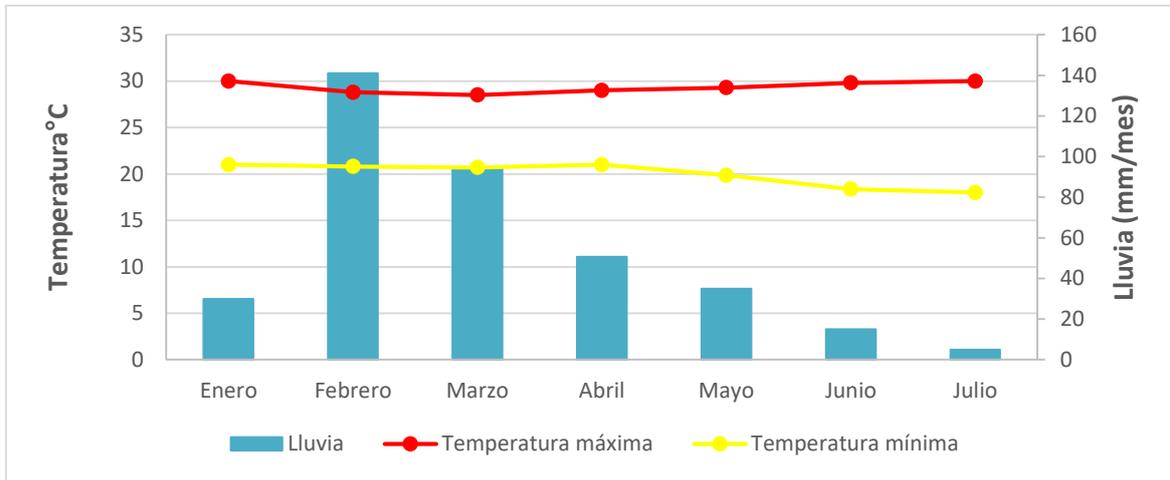


Figura 3.5. Diagrama meteorológico de la Estación Chilete.
Fuente: Senamhi, 2019.

3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación empleada es no experimental por la condiciones que se plantea en la delimitación del problema de investigación, utilizando el método deductivo - inductivo, partiendo de datos particulares a la generalización del área investigada, del enfoque de la caracterización geomecánica del macizo rocoso del Nivel 3 de la Mina Paredones.

Tabla 3.4. Metodología de la investigación.

Clasificación	Categoría
Tipo	Básica
Nivel	Analítica
Diseño	No experimental
Método de investigación	Deductivo - Inductivo

Fuente: Hernández, (2010).

3.4.1 TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología empleada consiste en una investigación: descriptiva correlacional y explicativa, tomando como base los datos geomecánicos obtenidos en campo, para su posterior interpretación en gabinete.

Exploración – observación – correlacional – explicativa.

3.4.2 POBLACIÓN

El túnel de la Mina Paredones Nivel 3, con longitud 265 m.

3.4.3 MUESTRA

Estaciones: E-1 (Pl. + 00 m. - Pl. + 20 m.), E-2 (Pl. + 20 m. - Pl. + 57 m.), E-3 (Pl. + 70 m. - Pl. + 109 m.), E-4 (Pl. + 190 m. - Pl. + 200 m.) y E-5 (Pl. + 225 m. - Pl. + 235 m.), de control geomecánicos en zonas de riesgo definidas para la investigación.

3.4.4 UNIDAD DE ANÁLISIS

Las unidades de análisis están relacionadas con las variables: litología, geoestructuras, geohidrología, tensiones e inestabilidad del macizo rocoso.

3.4.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se emplearon técnicas directas, consistiendo en la observación, descripción, correlación y explicación de las unidades de análisis dentro de la excavación subterránea como en la superficie del entorno del Nivel 3, para obtener información real y pertinente, para la presentación y discusión de resultados. Siendo de gran importancia los datos obtenidos de campo mediante el cartografiado: geológico y geomecánico.

3.4.5.1 TRABAJO DE GABINETE

Esta basado en la recopilación como: revisión de artículos científicos, delimitación del objeto de estudio, búsqueda de información cartográfica del Ingemmet, publicaciones, planos geológicos, topográficos y datos que tengan relación directa con la área de influencia del Nivel 3.

3.4.5.2 TRABAJO DE CAMPO

Esta basado en la calidad de información de campo como el reconocimiento de la zona de estudio, cartografiados progresivos como: geológicos, estructurales, geomecánicos, mineralógicos, inestabilidad y tipo de sostenimiento; fraccionados en brigadas y etapas de avance hasta obtener información consistente que muestre el estado real del área de investigación. Por consiguiente también se basó en la utilización de equipos topográficos, geomecánicos (Martillo Schmidt y Peine de Barton) y cartografiados de datos geológicos de superficie como de la excavación subterránea teniendo relación directa con la calibración de equipos siendo aspectos muy importante en todo trabajo, de esta manera se minimiza el error que se podrían obtener en la obtención de información.

3.4.5.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Se asentó en el procesamiento de la información de gabinete y campo manifestado en: gráficas, fichas y planos temáticos; acompañados de programas computacionales o softwares; Dips para análisis estructural, Phase² para análisis

de tunelería, RocData para análisis de macizos rocosos, ArcGis y Autocad para realizar la representación de la zona de estudio en planos. Con los tres primeros softwares conocemos el comportamiento geomecánico en la interacción roca – sostenimiento y las condiciones geomecánicas que presenta el macizo rocoso, además de la distribución de instalaciones mineras que presenta el Nivel 3. Como aspecto de culminación muestra las conclusiones y recomendaciones.

3.4.6 RECURSOS MATERIALES

Durante el desarrollo de la tesis fue necesario el empleo de algunos equipos y materiales para la recopilación de los datos geomecánicos que luego en gabinete se realizó la interpretación. Estos equipos y materiales utilizados en la investigación fueron:

- **Equipos:**
 - Brújula Brunton (Serie: 5661715091), se utilizó para obtener datos de la orientación de geoestructuras y también para la orientación la excavación subterránea.
 - GPS Garmin (Serie: 2DV138166 - Garmin), para obtener coordenadas de la bocamina del Nivel 3.
 - Cámara fotográfica (Serie: 8364513), para mostrar evidencias y la realidad de las condiciones que presenta la labor.
 - Peine de Barton, plasma la rugosidad de la superficie de cada discontinuidad analizada.
 - Martillo Schmidt (Marca: Controls, modelo: 45-D0561), determina la resistencia del macizo rocoso en relación del ángulo de descarga de fuerza.
 - Lupa, muestra de manera microscópica la textura y composición mineralógica de la roca.
 - Picota, utiliza para extraer muestras de campo, como también para obtener de manera empírica la resistencia del macizo rocoso.
 - Protactor, utilizado para plasmar en planos la orientación de geoestructuras y escalar información de campo.

- Rayador, muestra el grado de oposición a ser rayada la superficie de minerales.
- Wincha, empleada para medir distancias prolongadas de estaciones analizadas y levantamiento topográfico.
- Flexómetro, para medir las dimensiones de la labor como también para el cartografiado geológico-geotécnico.
- Linternas, utilizada para la iluminación en el interior del Nivel 3.
- Casco, equipo de vital importancia para la protección personal.

- **Materiales:**

- Registro geológico-geotécnico, utilizado para describir, dibujar y dimensionar; las condiciones que presenta la galería.
- Ácido clorhídrico, utiliza en el análisis de la composición mineralógica.
- Plano geológico, muestra las condiciones litológicas del área de estudio.
- Imagen satelital, usada en la ubicación mediante imágenes que muestran la realidad de zona de estudio.
- Libreta de campo, usada para anotaciones de los datos obtenidos en campo.



Figura 3.6. Equipos y materiales utilizados para la realización de la investigación. A. Peine de Barton, B. Lintera, C. Libreta de campo, D. Ácido clorhídrico, E. Brújula, F. Flexómetro, G. GPS, H. Rayador, I. Cámara fotográfica y J. Martillo Schmidt.

3.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

- **Variables independientes.**

Litología: Conjunto de formaciones geológicas.

Geoestructuras: Conformado por planos de debilidad que definen el comportamiento tridimensional de la roca.

Geohidrología: Proceso por el cual el agua penetra en la masa rocosa.

Tensiones: Esfuerzos naturales inducidos en el macizo rocoso.

- **Variable dependiente**

Inestabilidad del macizo rocoso: Se trata de fenómenos de fracturamiento y desprendimiento de roca de diversa magnitud, debido a la liberación de energía al interior de una labor subterránea.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Es la conformación geológica registrada, tomada del Boletín 31, Reyes (1985), dónde se describen las formaciones que encontramos en la Mina Paredones.

4.1.1 GRUPO CALIPUY

Es la denominación dada a una secuencia volcánica que en su localidad típica incluye a tobas riolíticas subhorizontales. Este grupo se divide en tres series cuyo orden cronológico es: Volcánico Tembladera, Volcánico Chilete y Volcánico San Pablo

El Grupo Calipuy es producto del vulcanismo post – tectónico en la región cordillerana y representa el magnetismo que siguió el emplazamiento definitivo del batolito costanero. Posiblemente corresponde a chimeneas volcánicas que alimentaron a los niveles superiores del grupo. El Grupo Calipuy descansa con discordancia angular sobre la secuencia Cretácea (Reyes, 1985).

● VOLCÁNICO CHILETE

Es una secuencia predominantemente piroclástica que aflora en el pueblo de Chilete, está conformado de areniscas tobáceas, aglomerados lenticulares y materiales volcánicos retrabajados, mayormente andesíticos, bien estratificados, con buzamientos entre 25° y 30°, con espesor del Volcánico Chilete es de 800 m. aproximadamente y la edad perteneciente a la parte tardía del terciario temprano. Se correlacionan con los volcánicos que yacen discordantemente sobre la Formación Casapalca en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental del Centro

del Perú. Posiblemente correspondiente a cuellos o chimeneas volcánicas que alimentaron a los niveles superiores del Grupo Calipuy (Reyes, 1985).

4.2 GEOLOGÍA LOCAL DEL NIVEL 3

4.2.1 LITOLOGÍA

El túnel del nivel 3 de la Mina Paredones se encuentra emplazado en rocas volcánicas del Grupo Calipuy del Paleógeno – Neógeno, denominado Volcánico Chilete. Según el Boletín N° 31 del Ingemmet (Reyes, 1985), <<está conformado por: Intercalaciones tobáceas, areniscas tobáceas, aglomerados lenticulares y materiales volcánicos retrabajados, mayormente andesíticos, bien estratificados; siendo producto del vulcanismo post-teórico de la región cordillerana y representa un magmatismo efusivo que siguió al emplazamiento del batolito de la costa>>.

La geología de la excavación subterránea del Nivel 3 está conformado por rocas andesíticas de color verduzco con orientación Az = 235° y Bz = 32°NW, conformado la caja techo y piso del Nivel 3 de la Mina Paredones, al mismo tiempo los cartografiados geológicos muestran alteraciones en tres tramos. El primer tramo se inicia en el PI + 58 m. del túnel, definido por rocas andesitas dispersas conformado por un 25% por no haber sido afectadas en su totalidad por la alteración y conformado con mayor proporción el 75% por alteraciones sin afectadas por aguas meteóricas y flujos hidrotermales, reordenando la composición mineralógica y textural de la roca. Las texturas deleznable que conforman esta tramo están relacionadas con alteraciones: argílica a filica, con tonalidades de colores anaranjados, amarillentos a marrones. Sin embargo esta alteración es cortada transversalmente por la Veta Murciélagos ubicada en el hastial izquierdo de la galería de acceso principal, cambiando de nombre al hastial derecho como Veta Valenciana con orientación Az = 123° e intersectando a la Veta Esperanza con orientación Az = 40°. Sin embargo la segunda zona de alteración se encuentra mostrando alteraciones por flujo hidrotermal de composición masiva de baja mineralización en ambos hastiales, desde el PI + 110 m. hasta el PI + 117 m., siendo aprovechada por la discontinuidad de orientación Az = 136° y Bz = 56°SW, que favoreció al emplazamiento hidrotermal de las sustancias mineralizantes. En el

tramo PI + 215 m. hasta el PI + 220 m., en el hastial izquierdo se evidencia una estructura stockwork, siendo característico de un yacimiento tipo pórfido, con emplazamiento y vetilleo de espesores de 3 mm. a 5 mm., rellenas estas estructuras con mineralización de pirita, calcopirita, esfalerita y galena.

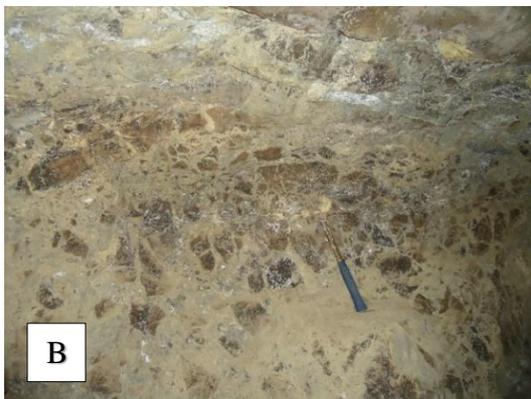


Figura 4.1. A. Brecha de falla en la clave del Nivel 3. B. Aglomerado volcánico ubicado en el hastial izquierdo de la excavación subterránea. C. Estructura stockwork ubicado en el hastial izquierdo del Nivel 3.

Los brechamientos ubicados en el nivel 3 se relacionan con tres tipos de estructuras: La primera se relaciona con estructuras brechosas siendo resultado de las altas tensiones corticales de bloques de roca, mostrando composiciones de clastos angulosos a muy angulosos de 3 cm. a 5 cm., con una matriz cementante de sílice y además tienen relación con las intrusiones mineralizantes por su composición mineralógica en su matriz como: pirita, calcopirita, galena, zinc;

ubicandose en el PI + 140 m. En la clave del Nivel 3, ubicado a 7.00 m. del primer cuerpo se evidenciándose otro tipo de brechamiento en el hastial izquierdo en una extensión de 5.00 m., con orientación NE, presentando clastos redondeados a lenticulares con diámetros de 7 cm. a 10 cm., con matriz andesítica, sin composición mineralizante en su estructura cementante, teniendo correlación con fallas geológicas distensivas y estructuras verticales de emplazamiento que trabajan como escudos de sostenimiento artificial. Por último en el PI + 240 m. hasta el final la conformación de este brechamiento es originado por una falla geológica, mostrando craquelamiento con presencia de gouge, por el intenso desplazamiento de los planos de falla de las geoestructuras.

4.2.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la zona de estudio encontramos cuatro sistemas de fallas que definen el emplazamiento mineralizante de la Mina Paredones, definidos por la falla dextral del Río San Pablo con orientación NE - SW y transversal a esta la falla normal de la Quebrada California con orientación NW – SE. También se visualizan dos fallas sinestrales paralelas relacionadas con la Veta Murciélago y la Veta Wester Pacasmayo con orientación NW – SE, conformando un fallamiento de movimiento cinemático conjugado. Y también cortando a las estructuras geológicas antes mencionadas con orientación ENE – WSW la falla dextral de la Veta H. Presentando zonas de mineralización por los movimientos cinemáticos de fallamiento.

Por consiguiente el Nivel 3 de la Mina Paredones tiene que ver con la Veta Esperanza ubicándose en el PI + 70 m, hasta su alineamiento final que está relacionado con fallamientos distensivos y de movimientos cinemáticos dextrales de direcciones $Az = 250^\circ$ y $Bz = 80^\circ$ NW y orientación ENE – WSW, observándose notoriamente el desplazamiento en el bypass entre las Vetas: West Pacasmayo y Animas. Estos cuerpos mineralizantes presentan zinc, plomo, galena, pirita, calcopirita y galena argentífera, siendo la parte mas enriquecida en las operaciones la Mina Paredones, por ser un cuerpo tabular de espesores que fluctúan entre los 1.50 m. a 2.20 m. en la excavación subterránea, extrayendo toda la parte mineralizante. Al mismo tiempo presentando alineamientos estructurales con las

Vetas: Murciélago, Valenciana, Pacasmayo, Pilancones, West Pacasmayo, Animas y Veta Norte, cortando transversalmente a la Veta Esperanza.

En la Figura 4.2. Podemos observar: A. Falla probablemente inversa con $Az = 242^\circ$ y $Bz = 32^\circ NW$, ubicada en la clave de la excavación subterránea. En la foto frontal no se nota muy claro el desplazamiento del techo, sin embargo en campo la evidencia es tenue. B. Probable Falla normal con $Az = 113^\circ$ y $Bz = 62^\circ SW$ ubicada en el PI +19.50 m. del hastial derecho del Nivel 3. C. Presencia de slickensides que evidencia una Falla normal dextral, con $Az = 44^\circ$ y $Bz = 84^\circ SE$ ubicada a PI + 48 m. en el hastial izquierdo.



Figura 4.2. A. Falla inversa. B. Falla normal. C. Falla normal dextral.

4.3 HIDROLOGÍA

Las aguas de escorrentía superficial cercanas al proyecto subterráneo del Nivel 3, son de la Quebrada California con orientación NE-SW, ubicada paralela a la Veta Esperanza (galería principal). Presentando como naciente dos Quebradas: una originándose a los 1720 msnm. y otra a los 1680 msnm., confluyendo éstas dos y formando la Quebrada California a 1230 msnm., continuamente formando con el Río Llamínchan o Río San Pablo aguas abajo ubicado en el distrito de San Bernardino (como naciente), con orientación SW, confluyendo con el Río Magdalena a 850 msnm., y a su vez formando más adelante el Río Chilete con orientación WSW desembocando dichas aguas en el Océano Pacífico.

4.4 GEOHIDROLOGÍA

En el interior del Nivel 3 encontramos presencia de humedad a lo largo de la galería y por ser el mes de Junio, mes de muy pocas lluvias, nos indica que existe agua en las rocas; mostrado pequeños flujos de aguas subterráneas en las secciones de análisis de la excavación, sobre todo en los hastiales y la clave. En muchos de los casos se encuentran minerales que se asocian a la humedad en las partes superiores del basamento rocoso (Quebrada California).

Los flujos de agua subterránea se ubican desde la bocamina, presentando acumulación de agua constantemente en la sección de la excavación siendo abastecidas sobre todo por los hastiales de esta sección. Desde el primer bypass hasta los 45 m., se evidencia humedad constante y progresiva en la clave y los hastiales sin afectar la solera, favoreciendo a la alteración de minerales como: la epsomita y calcantita, observándose como cobertura blanquecina que cubre toda la superficie de la sección subterránea. Sin embargo en los dos últimos bypass se observa humedad muy baja por la continuidad de afectación del agua subterránea, no presentando en los hastiales ni en la clave zonas de mineralización ni tampoco humedades persistentes en estas secciones de análisis geotécnico e hidrogeológico.

En la Figura 4.3. A. Zona de humedad y flujo de agua desde el PI + 0.0 m. hasta PI + 70 m. La Figura B. presenta humedad constante siendo aprovechada por minerales de eponita para su recristalización, ubicada en la clave y hastiales. La Figura C. muestra que el bypass está siendo afectado por la humedad sobre todo en la clave de la excavación subterránea. La Figura D. está ubicado el bypass de la Veta Norte con intersección de la Veta Esperanza, se encontró desprendimiento de bloques y putrefacción de maderos por la humedad.



Figura 4.3. Zonas afectadas por humedad y flujos de agua.

4.5 GEOMECAÁNICA

La condiciones geomecánicas que presenta el Nivel 3 (Veta Esperanza), de la Mina Paredones, están relacionadas con la inestabilidad y la deformación progresiva de las secciones de la excavación subterránea, considerando los parámetros geomecánicos como: resistencia a la compresión, cohesión y ángulo de fricción, para el procesamiento, análisis e interpretación, de resultados de las cinco estaciones geomecánicas. Para realizar el análisis del macizo rocoso de la galería principal, se utilizó los software: RocData, DIPS y Phase²; para determinar el comportamiento geomecánico mediante los métodos RMR y Q de Barton.

4.5.1 ESTACIÓN GEOMECAÁNICA 1

Está conformada litológicamente por andesitas con estimación de resistencia R5, categorizándolo en términos de roca muy resistente, por su valor de 165.20 MPa. Siendo definido por tres familias de discontinuidades, con espaciados de 0.06 m. – 0.20 m. Presentado en su estructura superficies ligeramente rugosas, con rellenos de roca triturada, ligeramente alterada, siendo afectada por la humedad constante que presenta la estación geomecánica 1.

● **Cálculo del RMR y Q de Barton de la Estación Geomecánica 1.**

Tabla 4.1. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 1.

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

$$\text{RMR}_{\text{Básico}} = 12 + 13 + 8 + 4 + 1 + 3 + 2 + 5 + 7 = 55$$

Corrección con las curvas de correlación:

- Resistencia de la matriz rocosa = 12.7
- RQD = 13.8
- Separación de las diaclasas = 8.5

$$\text{RMR}_{\text{Básico Corregido}} = 12.7 + 13.8 + 8.5 + 4 + 1 + 3 + 2 + 5 + 7 = 57$$

Tabla 4.2. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 1.

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

$$RMR_{\text{Corregido}} = 12.7 + 13.8 + 8.5 + 4 + 1 + 3 + 2 + 5 + 7 - 2 = 55$$

Tabla 4.3. Reporte de Estación Geomecánica 1 – PI. + 00 m. a PI. + 20 m.

Resistencia de roca (Esclerometro Mpa)					165.20			
Criterios Empíricos					Q		Tensiones	
					RQD (%)	71.74	σ_1 (MPa)	0.17
Puntaje	Cuantitativo	71.74	55	50	Jn	9		
					Jr	2		
					Ja	2		
					Jw	0.66	σ_3 (MPa)	0.11
					SRF	2.5		
Calitativo	Regular	Media	Regular	Q	2.1	m	0.65	
					Mala			

- **Análisis mediante el software DIPS de la Estación Geomecánica 1.**

El análisis cinemático de la Figura 4.4, muestra que la intersección de las tres familias de discontinuidades están formando prismoides de base triangular, con planos de intersección de diaclasas: D-2 y D-1: $49^\circ/349^\circ$ (D/DD), E y D-1: $60^\circ/102^\circ$ (D/DD), y D-2 y E: $73^\circ/197^\circ$ (D/DD), entre cada una de las familias de discontinuidades, mostrando cuñas de diferentes tamaños que relativamente no son cortadas por el ángulo de fricción de 69° , definiendo caídas bloques por gravedad. Formando planos de ruptura casi subverticales con la figura geométrica de la cuña interpretada.

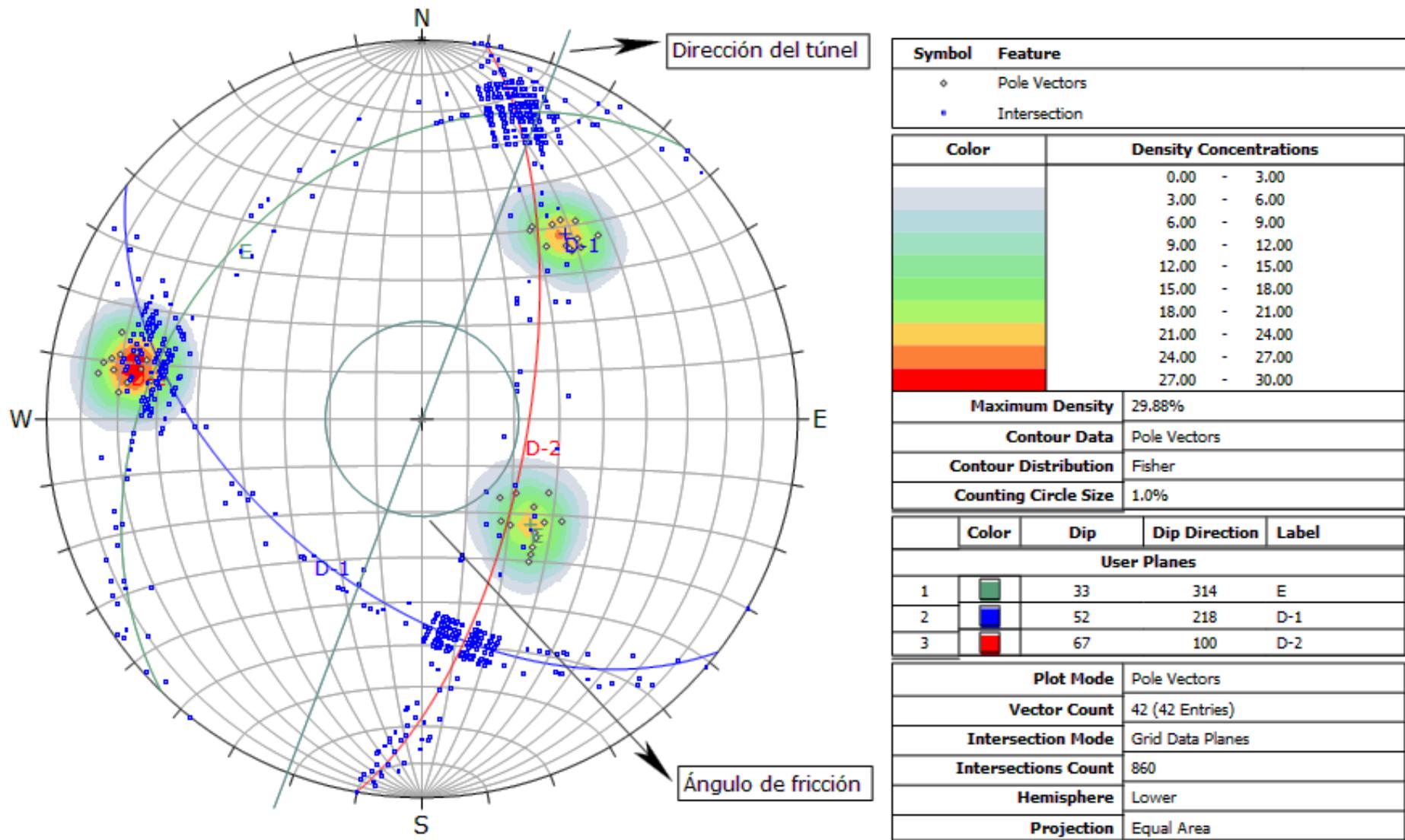


Figura 4.4. Proyección estereográfica de la estación 1, generándose caídas de roca por gravedad.

- **Análisis mediante el software RocData de la Estación Geomecánica 1.**

En la Figura 4.5., se muestra la envolvente curva de Hoek y Brown y la linealizada de Morh – Coulumb, utilizando el método de las áreas equivalentes, obteniéndose los parámetros geotécnicos para el análisis en la estación geomecánica 1, mediante el software RocData. Aplicando el método de equivalencia de áreas se obtiene la presión de confinamiento en el macizo rocoso de 0.11 MPa y el rango de tensiones.

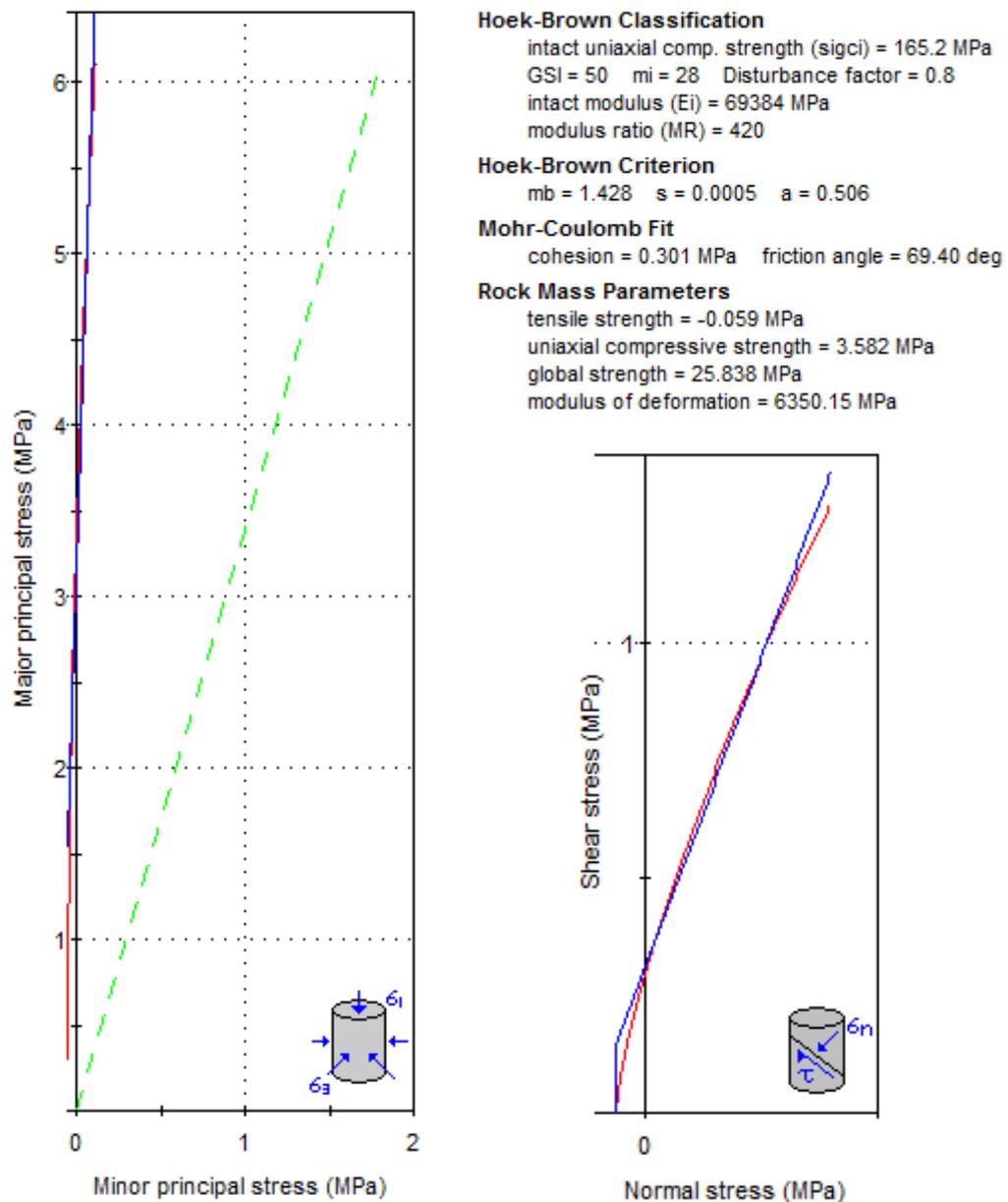


Figura 4.5. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh –Coulumb de la Estación Geomecánica 1.

- **Análisis mediante el software Phase² de la Estación Geomecánica 1.**

La Figura 4.6, mediante el software Phase², define el estado tenso-deformacional de la excavación subterránea, alrededor de la sección transversal, originando en la clave y hastiales vectores de alineamiento deformacional, llegando a afectar hasta 50 cm. hasta la proyección de la aureola vectorial.

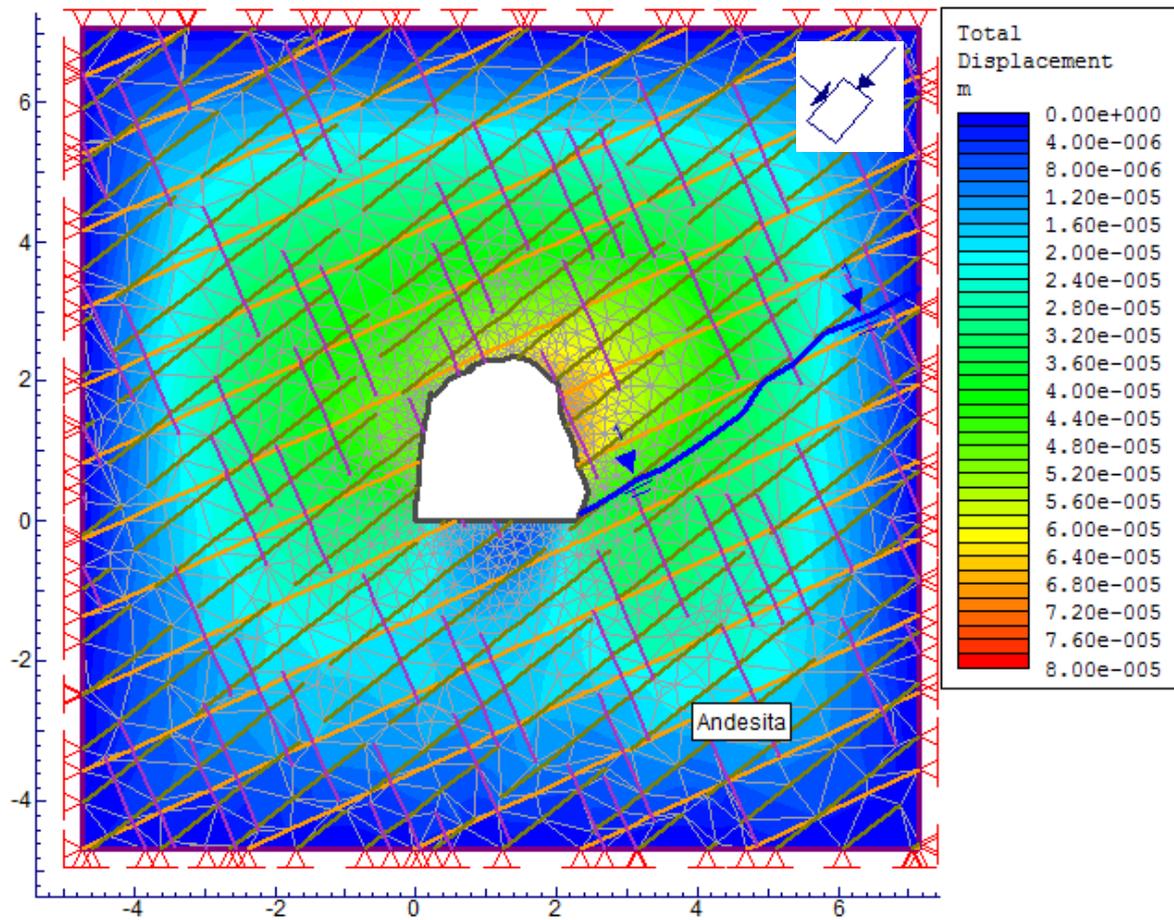


Figura 4.6. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 1.

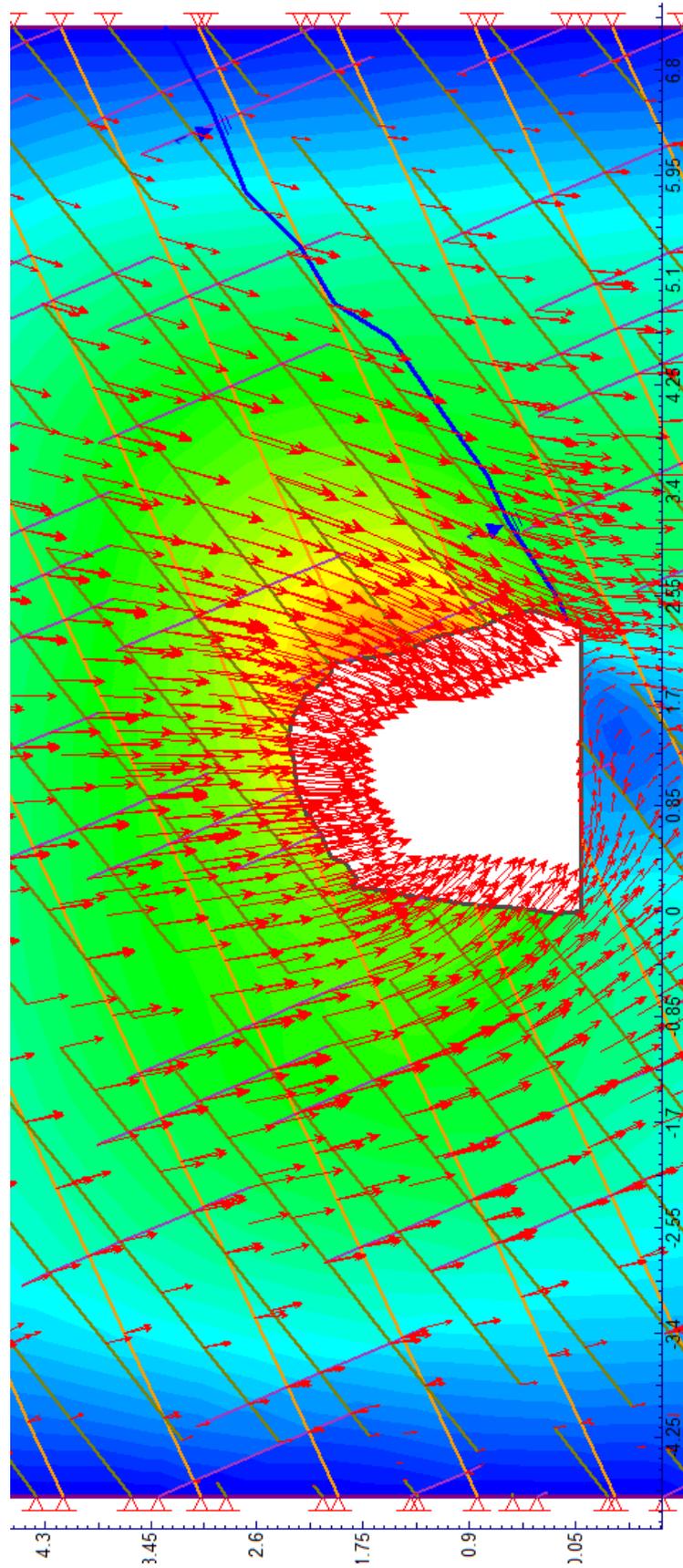


Figura 4.6. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 1.

En la Figura 4.7, la curva de tendencia estadística de la estación 1, muestra las variaciones de resultados del esfuerzo de corte vs. la distancia que varían desde 0 a 0.14 MPa., llegando este valor a una distancia 35.97 m., en función de la presión de confinamiento del macizo rocoso.

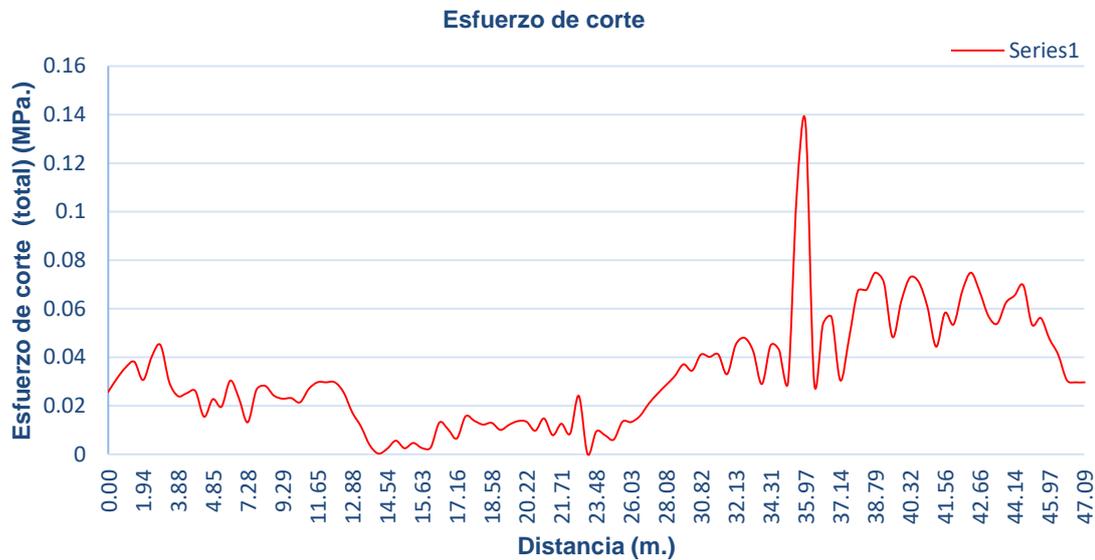


Figura 4.7. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 1 (esfuerzo de corte vs. distancia).

- **Sostenimiento de la Estación Geomecánica 1.**

De acuerdo al cálculo del diámetro equivalente se obtiene un valor de 1.38, por presentar luz o altura = 2.20 y ESR = 1.60 e interpolando con el Q = 2.10, se ubica en una zona 1: espaciado con pernos y con una longitud de anclajes de 0.96 m. Definiendo la malla de distribución de pernos puntuales de 1.20 m x 1.20 m.

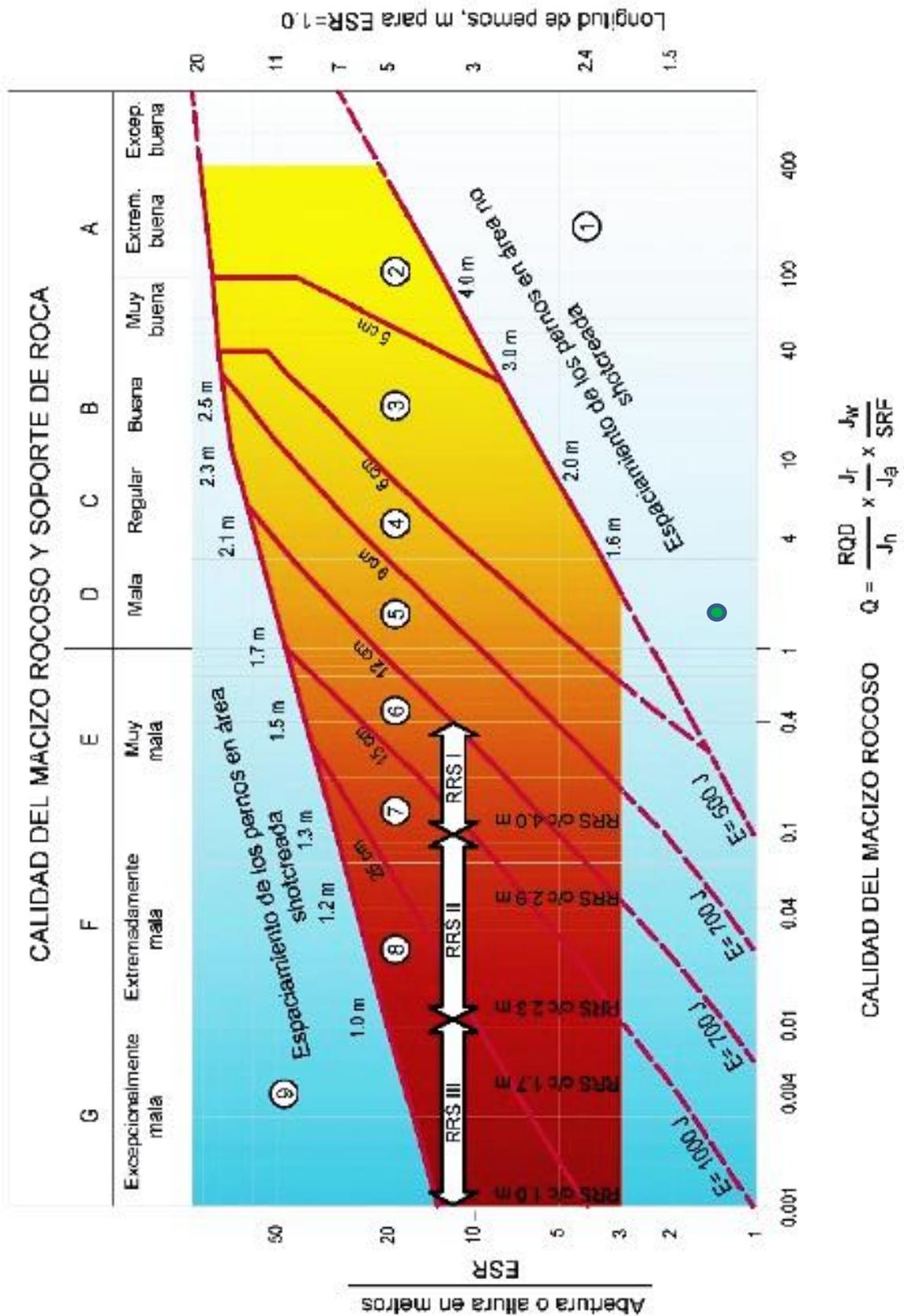


Figura 4.8. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 1.

La geomecánica muestra que está conformado por roca andesita de buena calidad presentando una geometría de sección subterránea 2.00 m. : 2.20 m. (H : V), muy irregular como se observa en el software Phase² V8.0 por la geometría de este tramo, sugiriéndose desatado de rocas en toda la sección transversal y del tramo longitudinal de 20 m., sugiriendo además estabilización por cuadros de madera rectos. El análisis propone una sección de forma rectangular por presentar condiciones favorables por la orientación de las discontinuidades, buena calidad de roca, espaciado y abertura. El sostenimiento a implementar será cuadros de madera rectos cada 2 m. de sección transversal, conformado por 10 cuadros de madera, soportando cada cuadro de madera 17 KN/m². Utilizando para este cálculo el método de áreas atribuidas, para mejor distribución de carga. Además, para su mejor funcionamiento se definió maderos de sección de 25 cm. x 30 cm., altura de poste 2.15 m., ancho de sombrero 2.25 m., longitud de tirante 2.00 m. entre sección y sección, además también emcribado para evitar caída de bloques y mejores empalmes entre el sombrero, poste y tirante.

Tabla 4.4. Resultados del sostenimiento por cuadros de maderos, utilizando métodos flectores de maderos, Estación Geomecánica 1.

Carga de Roca (Clave) KN/m		38.25		Seccion		Eficiencia (%)	Condición
				b (cm.)	h (cm.)		
Momentos flectores	Momento flector (KN . m)	24.21					
	Esfuerzo cortante (KN)	43.03					
	Flecha (mm.)	2.06		25	30		Si cumple
Interacción de límite último por flexión simple	Momento resistente - W (cm ³ .)	Necesario	1476.22	15.79	23.69	25	No cumple
		Tenemos	2083.33	20	25	70	Si cumple
					Sección comercial		
					Sección no comercial		
Interacción de límite último por esfuerzo cortante	Tensión de cortadura (KN/cm ² .)	0.115				5	Si cumple
Interacción de límite último por deformación	Flecha relativa (mm.)	7.50					Si cumple
	Flecha final (mm.)	3.71					Si cumple

4.5.2 ESTACIÓN GEOMECÁNICA 2

Esta estación lo conforman rocas alteradas constituidas de rocas andesitas, generadas por los flujos hidrotermales de mineralización que cambiaron la composición mineralógica y textural de la roca caja, definiendo laminaciones consecutivas, cortando transversalmente a la sección de la excavación subterránea, ocasionando desprendimientos de bloques de roca y desprendimiento de laminaciones de roca por la alteración, no proporcionando seguridad a las cajas de la roca competente para las instalaciones subterráneas, por su baja resistencia de 36.51 MPa., y por las condiciones que presenta esta sección geomecánica categorizándose como una roca tipo R3. Mostrando cuatro familias de discontinuidades, con espaciados de 0.06 a 0.10 m., con aberturas de 3 a 5 mm. con superficies suaves entre cada familia de discontinuidades y con afectación de humedad constante.

● **Cálculo del RMR y Q de Barton de la Estación Geomecánica 2.**

Tabla 4.5. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 2.

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

$$\text{RMR}_{\text{Básico}} = 4 + 6 + 8 + 4 + 1 + 0 + 2 + 3 + 7 = 35$$

Corrección con las curvas de correlación:

- Resistencia de la matriz rocosa = 4.2
- RQD = 9.8
- Separación de las diaclasas = 7

$$\text{RMR}_{\text{Básico Corregido}} = 4.2 + 9.8 + 7 + 4 + 1 + 0 + 2 + 3 + 7 = 38$$

Tabla 4.6. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 2.

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

$$RMR_{\text{Corregido}} = 4.2 + 9.8 + 7 + 4 + 1 + 0 + 2 + 3 + 7 - 5 = 33$$

Tabla 4.7. Reporte de Estación Geomecánica 2 – PI. + 20 m. a PI. + 57 m.

Resistencia de roca (Esclerometro Mpa.)					36.51			
Criterios Empíricos		RQD (%)	RMR	GSI	Q		Tensiones	
					RQD (%)	48.88	σ_1 (MPa)	0.28
					Jn	15		
					Jr	1		
					Jw	0.66	σ_3 (MPa)	0.14
					SRF	1		
Puntaje	Cuantitativo	48.88	33	28	Q	0.36	m	0.5
	Calitativo	Mala	Mala	Mala		Muy Mala		

● **Análisis mediante el software DIPS de la Estación Geomecánica 2.**

La cinemática de la Figura 4.9, muestra que la intersección de las cuatro familias de discontinuidades están formando tres tipos de cuñas: la primera cuñas definida como prismáticas truncados con intersección de planos (D/DD): E y D-1: 71°/069°, D-2 y D-1: 63°/194°, y D-2 y E: 78°/170°, definiendo caídas bloques por deslizamiento a favor de la diaclasa D-1, ubicado en le hastial izquierdo del túnel del Nivel 3; la segunda lo definen cuñas tetrahedrales con intersección de planos (D/DD): D-2 y D-1: 63°/194°, D-3 y D-1: 76°/213°, y D-2 y D-3: 53°/219°, definiendo caídas bloques por gravedad, ubicado en la clave del túnel; y la tercera forman cuñas pentahedricas con planos de intersección de las diaclasas (D/DD): D-2 y D-1: 63°/194°, D-2 y D-3: 53°/219°, E y D-1: 71°/069°, y D-3 y E: 84°/028°, definiendo caídas bloques por deslizamiento relacionados por juntas D-1, D-2 y D-3, ubicándose en la clave del túnel. Presentando todo este análisis por el ángulo de fricción 37°.

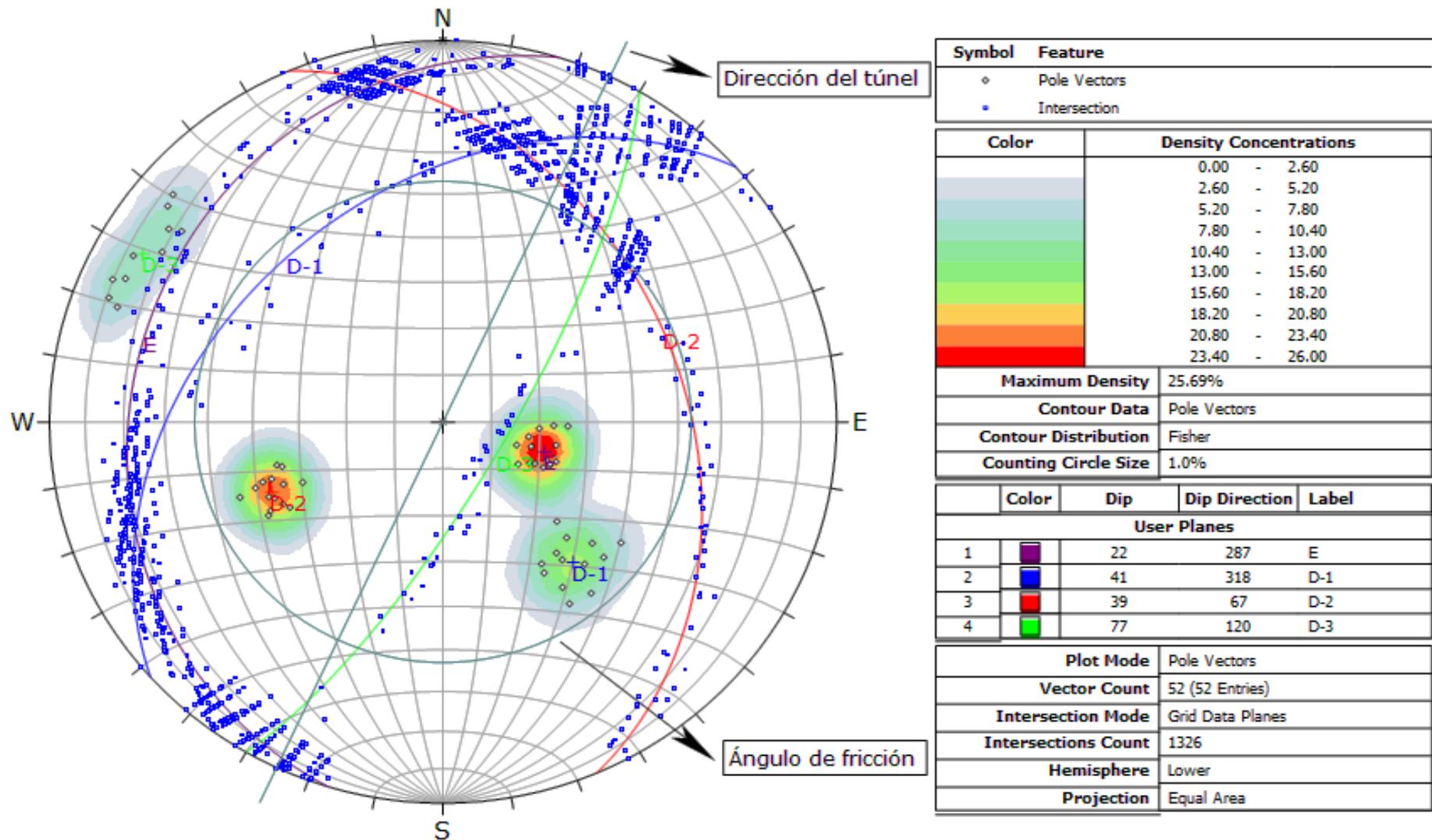


Figura 4.9. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 2, mostrando el desplome de bloques por fricción en relación de las juntas D-1, D-2 y D-3.

- **Análisis de la Estación Geomecánica 2 utilizando el software RocData.**

En la figura 4.10, se muestra la envolvente curva de Hoek y Brown y la linealizada de Morh – Coulumb, utilizando el método de las áreas equivalentes, obteniéndose los parámetros geotécnicos para el análisis en la estación geomecánica 2, mediante el software RocData. Aplicando el método de equivalencia de áreas se obtiene la presión de confinamiento en el macizo rocoso de 0.14 MPa y el rango de tensiones.

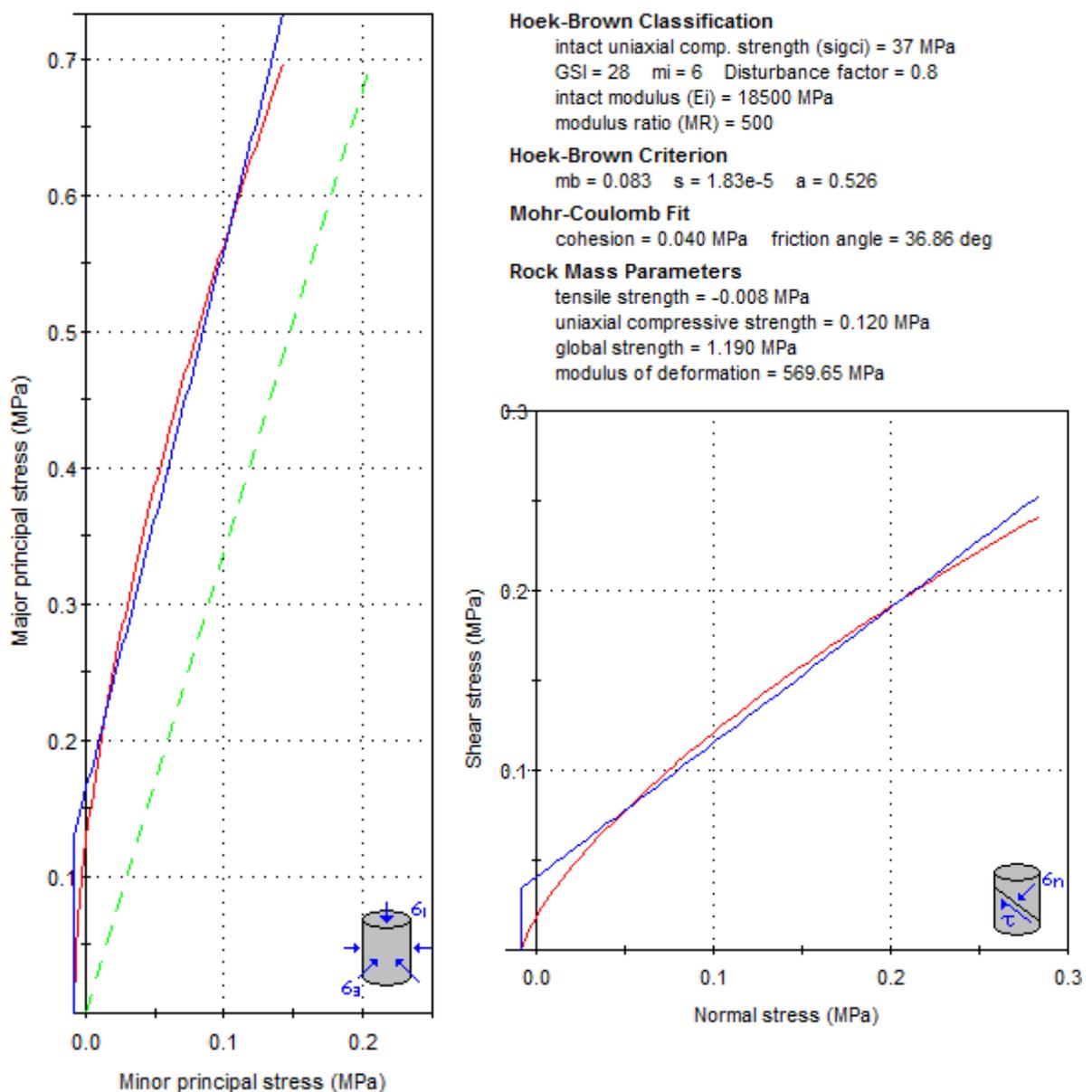


Figura 4.10. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh – Coulumb de la Estación Geomecánica 2.

- **Análisis mediante el software Phase² de la Estación Geomecánica 2.**

La Figura 4.11., muestra el estado tenso-deformacional de la excavación subterránea, causando deformaciones muy incipientes en la clave y hastiales, ocasionando sobre acumulación tensional por el tipo de alteración que lo conforma, llegando a afectar hasta 75 cm. hasta la proyección de la aureola vectorial.

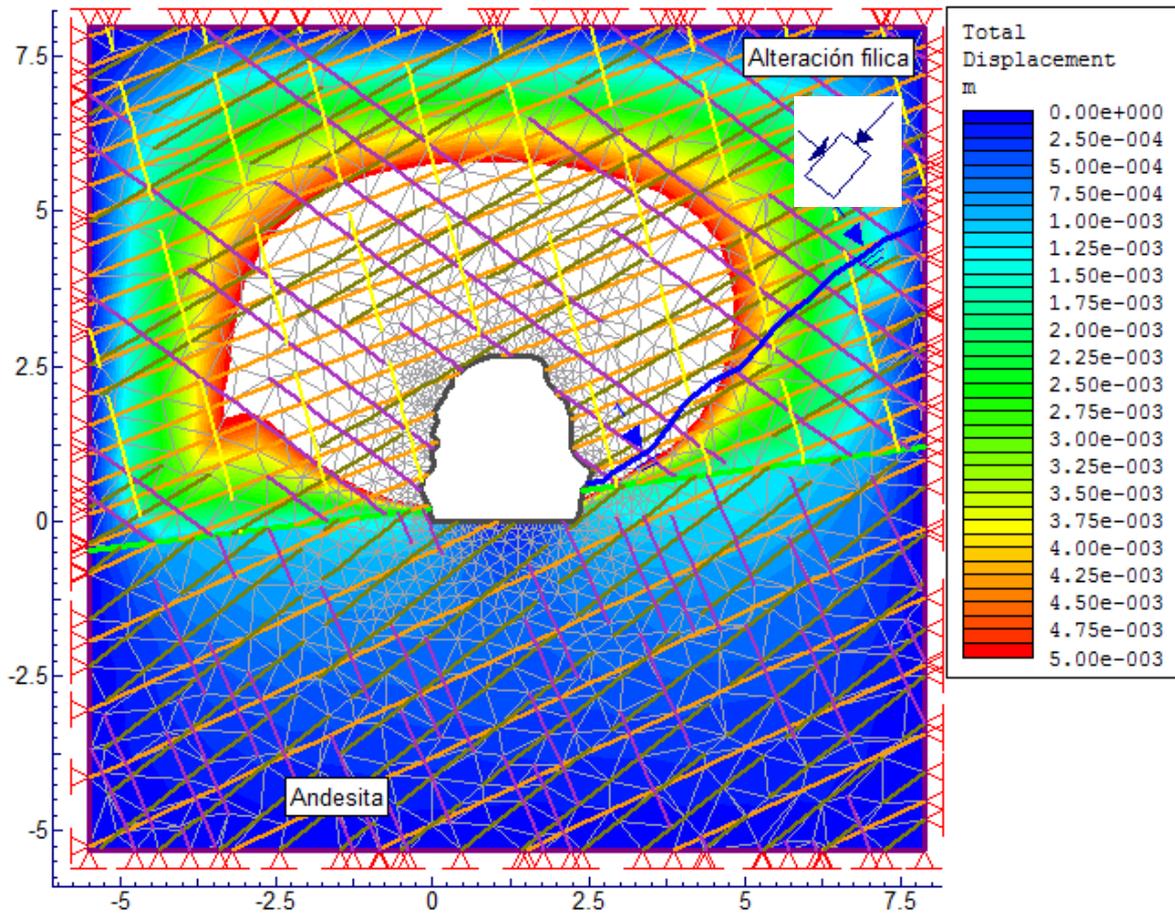


Figura 4.11. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 2.

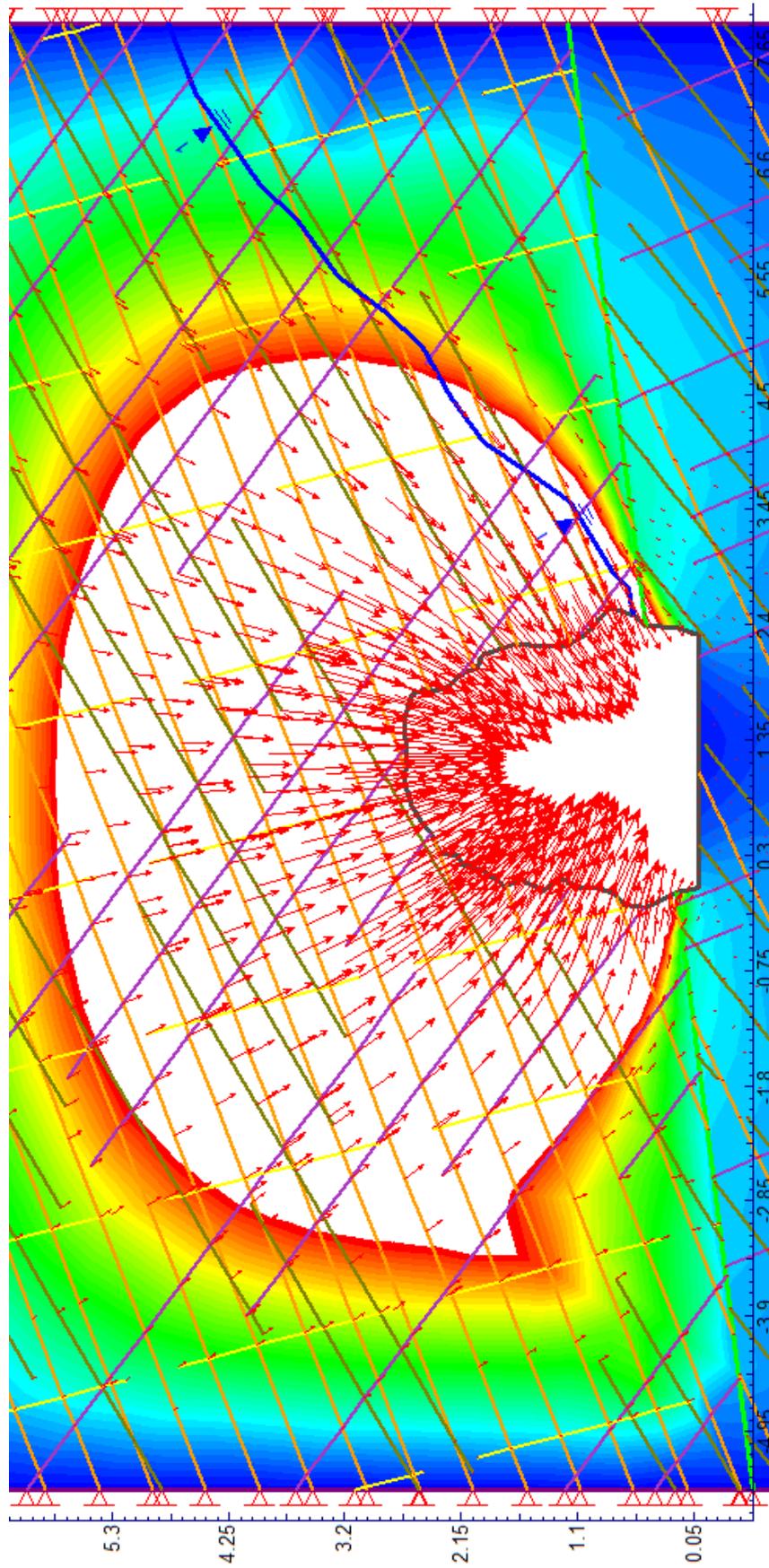


Figura 4.11. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 2.

En la Figura 4.12, la curva de tendencia estadística de la estación 2, muestra las variaciones de resultados del esfuerzo de corte vs. la distancia que varían desde 0 hasta 0.58 MPa., llegando este valor a una distancia de 17.71 m., en relación de la distancia de confinamiento del macizo rocoso y el medio plástico de deformación.

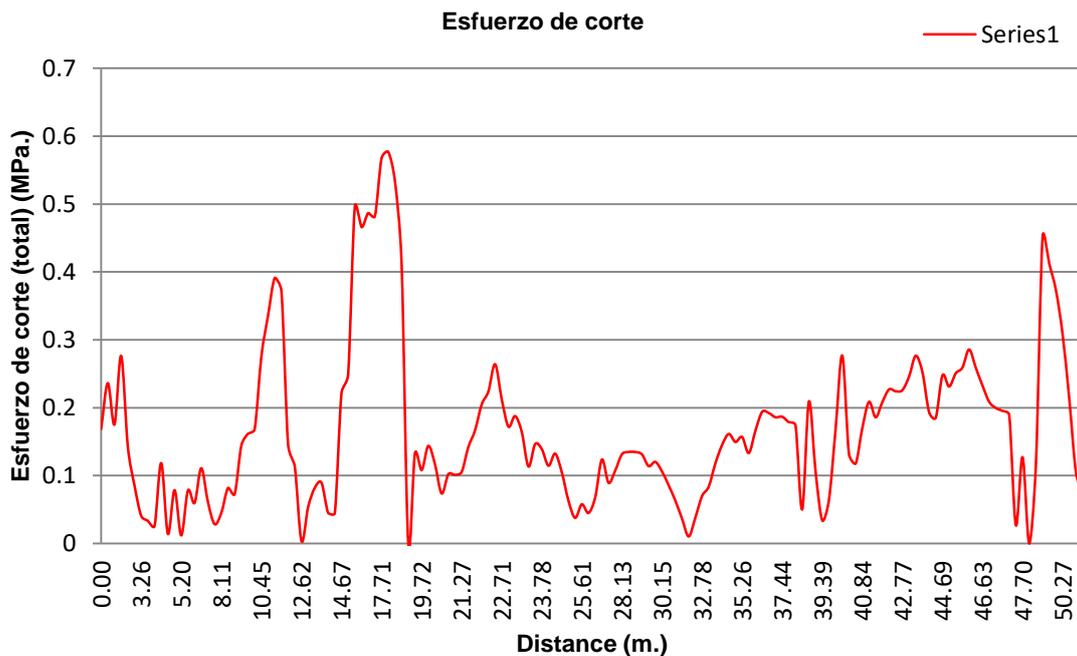


Figura 4.12. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 2 (esfuerzo de corte vs. distancia).

- **Sostenimiento de la Estación Geomecánica 2.**

De acuerdo al cálculo del diámetro equivalente se obtiene un valor de 1.34, por presentar luz o altura = 2.15 y ESR = 1.60 e interpolando con el Q = 0.36, se ubica en una zona 1: espaciado con pernos y con una longitud de anclajes de 0.80 m. Definiendo la malla de distribución de pernos puntuales de 0.30 m x 0.30 m.

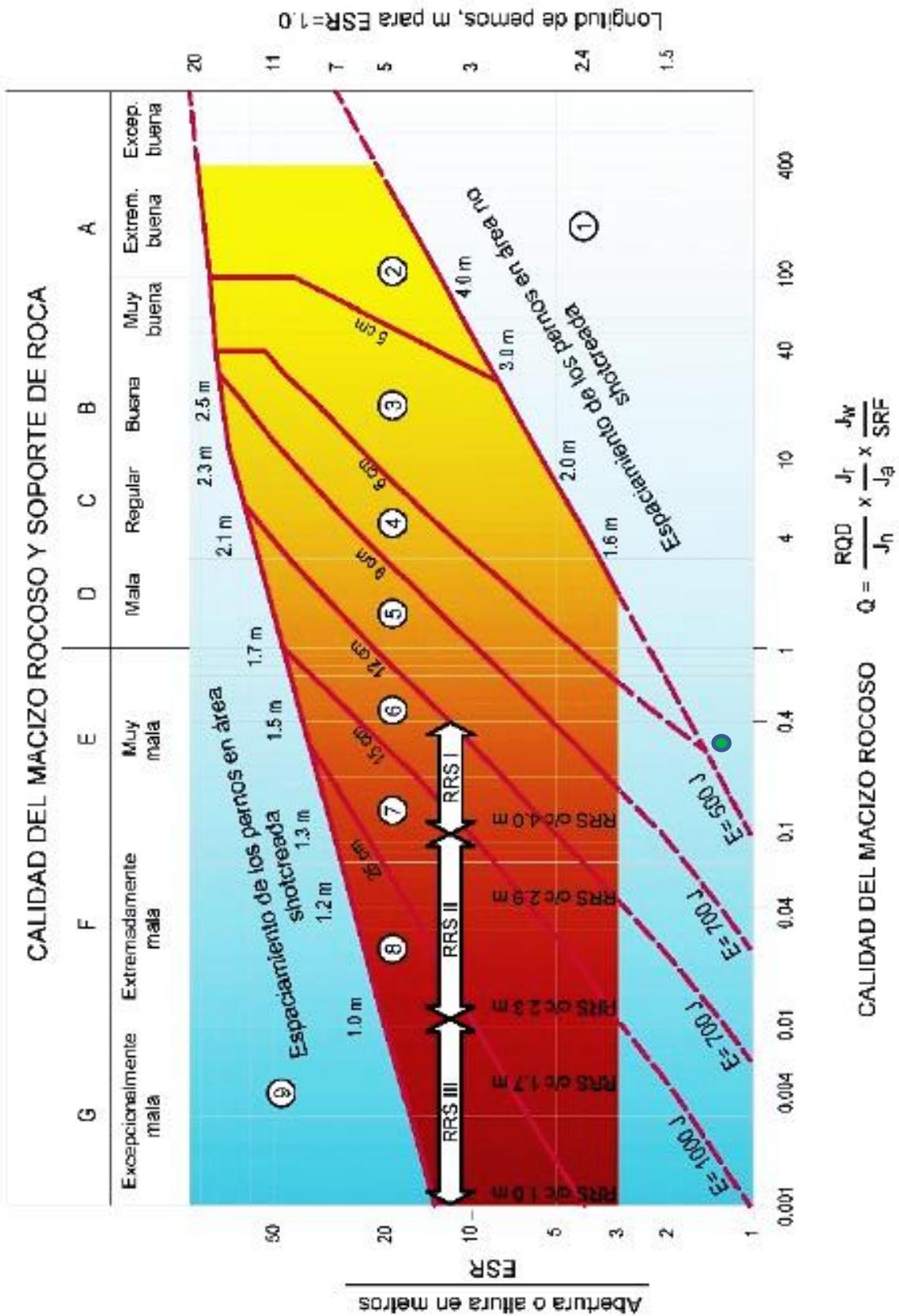


Figura 4.13. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 2.

El sostenimiento geomecánico de la estación 2 presenta una sección subterránea 2.00 m. : 2.15 m. (H : V), completamente de geometría irregular por la calidad de roca que presenta, sugiriéndose desquinchado completo de toda la sección transversal y del tramo longitudinal de 37 m., además se sugiere estabilización por sostenimiento pasivo por cuadros de madera cónicos o trapezoidales, por presentar esfuerzos de tenso-deformación ubicados en los hastiales. El sostenimiento a emplear es por cuadros de madera cónicos cada 2 m. de sección transversal, conformado por 18 cuadros de madera, soportando cada cuadro de madera 15.56 KN/m², utilizando el método de áreas atribuidas, para esta distribución de carga. Para su mejor funcionamiento se definió maderos de sección de 15 cm. x 25 cm., altura de poste 2.15 m., ancho de sombrero 2.10 m., longitud de tirante 2.00 m. entre sección y sección, además también encribado para evitar caída de bloques y mejores empalmes entre el sombrero, poste y tirante, y también enrejado en los hastiales.

Tabla 4.8. Resultados del sostenimiento por cuadros de maderos, utilizando métodos flectores de maderos, estación geomecánica 2.

Carga de Roca (Clave) KN/m		32.68		Sección		Eficiencia (%)	Condición	
				b (cm.)	h (cm.)			
Momentos flectores	Momento flector (KN . m)	18.01						
	Esfuerzo cortante (KN)	34.31						
	Flecha (mm.)	3.85		15	25		Si cumple	
Interacción de límite último por flexión simple	Momento resistente - W (cm ³ .)	Necesario	1098.17	14.31	21.47	20	No cumple	
		Tenemos	1562.5	Sección comercial				70
		Tensión de cortadura (KN/cm ² .)	0.14				6	
Interacción de límite último por deformación	Flecha relativa (mm.)	7.00					Si cumple	
	Flecha final (mm.)	6.93					Si cumple	

4.5.3 ESTACION GEOMECÁNICA 3

La forma verticalmente alargada que presenta esta sección subterránea tiene que ver con la aparición de la Veta Esperanza llegando tener hasta 4.35 m. de altura con buzamientos de hastiales entre 85° a 88°, constituido por rocas andesíticas muy competentes. Aflorando en la sección como un recubrimiento de color blanquecino de epsomita por la humedad constante que presenta esta sección subterránea en una longitud de 39 m. de mineralización en su superficie de la roca. Sin embargo la Veta Esperanza presenta un espesor de 0.75 m. a 0.85 m. en la clave, presentando consistencia mineralizante de zinc, plomo, pirita y calcopirita. Las características geomecánicas reportan una resistencia de 86.30 MPa., roca tipo R4 categorizandolo como resistente. Presenta discontinuidades de 0.06 a 0.2 m. de espaciamiento, con superficies de planas ligeramente rugosas, ligeramente alteradas en su superficie y con presencia de humedad.

● **Cálculo del RMR y Q de Barton de la Estación Geomecánica 3.**

Tabla 4.9. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 3.

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

$$\text{RMR}_{\text{Básico}} = 7 + 13 + 8 + 6 + 3 + 3 + 2 + 3 + 10 = 55$$

Corrección con las curvas de correlación:

- Resistencia de la matriz rocosa = 8.5
- RQD = 12.9
- Separación de las diaclasas = 8.6

$$\text{RMR}_{\text{Básico Corregido}} = 8.5 + 12.9 + 8.6 + 6 + 3 + 3 + 2 + 3 + 10 = 57$$

Tabla 4.10. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 3.

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

$$\text{RMR}_{\text{Corregido}} = 8.5 + 12.9 + 8.6 + 6 + 3 + 3 + 2 + 3 + 10 - 10 = 47$$

Tabla 4.11. Reporte de Estación Geomecánica 3 – PI. + 70 m. a PI. + 109 m.

Resistencia de roca (Esclerometro Mpa.)					86.30			
Criterios Empíricos					Q		Tensiones	
					RQD (%)	66.26	σ_1 (MPa)	0.83
					Jn	9		
					Jr	1.5		
					Jw	1	σ_3 (MPa)	0.47
					SRF	1		
Puntaje	Cuantitativo	66.26	47	42	Q	5.52	m	0.57
	Calitativo	Regular	Media	Regular		Media		

- **Análisis mediante el software DIPS de la Estación Geomecánica 3.**

La proyección estereográfica del movimiento cinemático de la Figura 4.14, muestra que la intersección de las tres familias de discontinuidades están formando cuñas biplanares base triangular, por los planos de intersección de diaclasas (D/DD): D-2 y E: 65°/156°, D-2 y D-1: 78°/290°, y D-1 y E: 63°/091°; entre cada familia de discontinuidades, cortando transversalmente la orientación del túnel, mostrando cuñas de gran tamaño que relativamente son cortadas por el ángulo de fricción de 60°, definiendo caídas bloques por deslizamiento en función de la discontinuidad D-1, con orientación SSW.

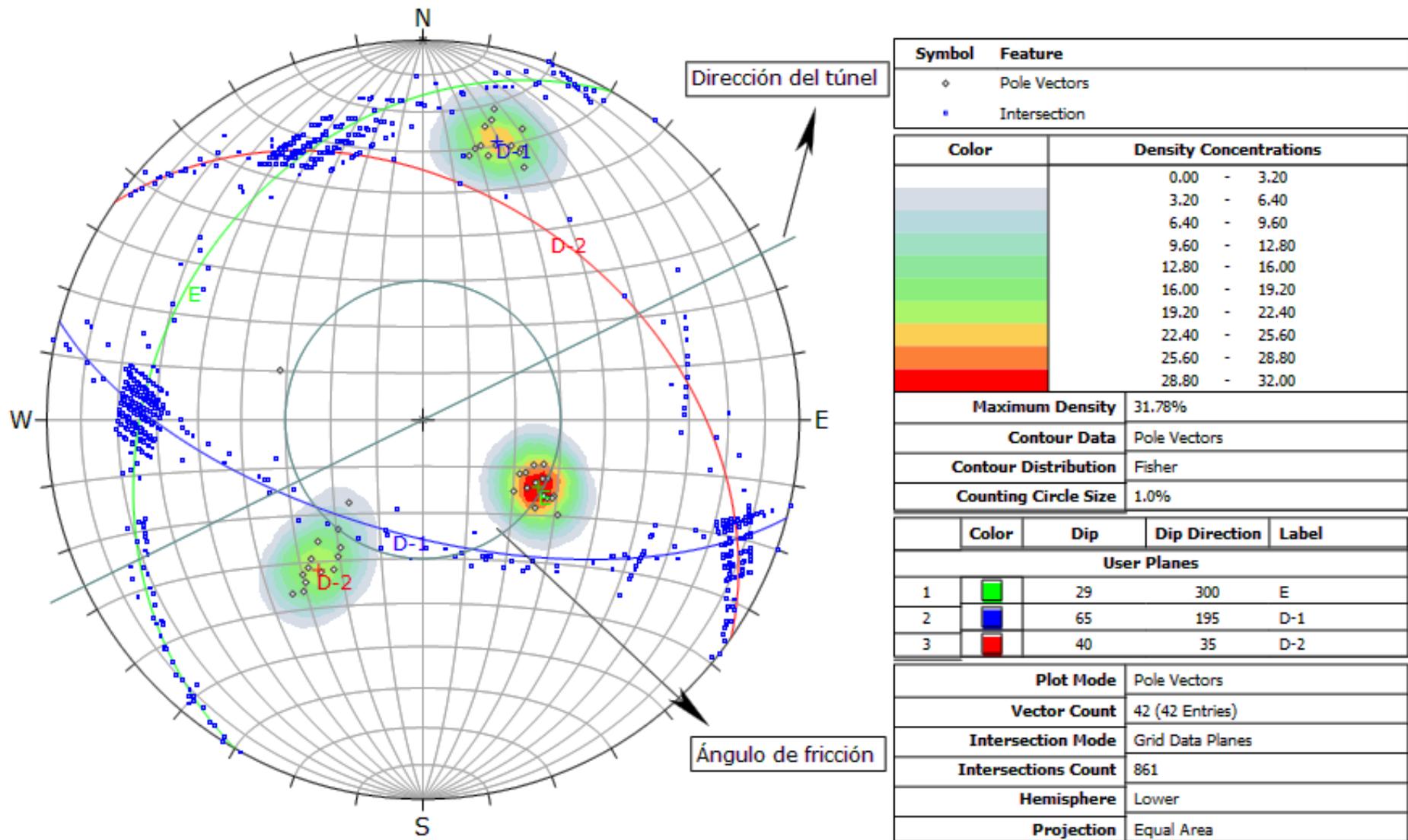


Figura 4.14. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 3, relacionada por deslizamiento por la diaclasa D-1.

- **Análisis mediante el software RocData de la Estación Geomecánica 3.**

En la Figura 4.15, se muestra la envolvente curva de Hoek y Brown y la linealizada de Morh – Coulumb, utilizando el método de las áreas equivalentes, obteniéndose los parámetros geotécnicos para el análisis en la estación geomecánica 3, mediante el software RocData. Aplicando el método de equivalencia de áreas se obtiene la presión de confinamiento en el macizo rocoso de 0.47 MPa y el rango de tensiones.

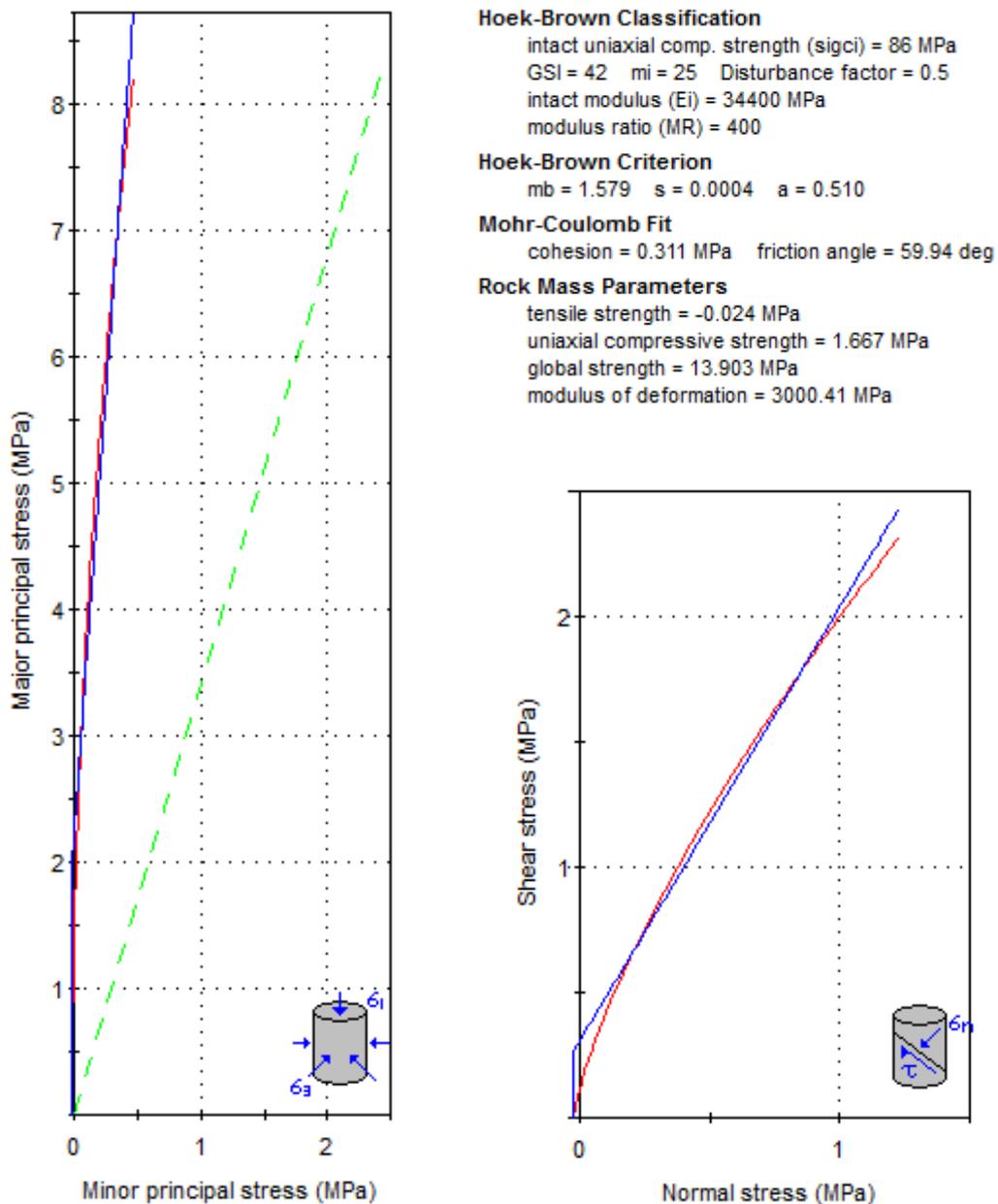


Figura 4.15. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh – Coulumb de la Estación Geomecánica 3.

- **Análisis mediante el software Phase² de la Estación Geomecánica 3.**

La Figura 4.16, muestra el estado tenso-deformacional alrededor de la excavación subterránea, originando sobre todo en los hastiales deformaciones por empujes laterales, siendo afectada por agua subterránea, adquiriendo desplazamientos en los hastiales de 45 cm. y en la clave de 20 cm. hasta la proyección de la aureola vectorial.

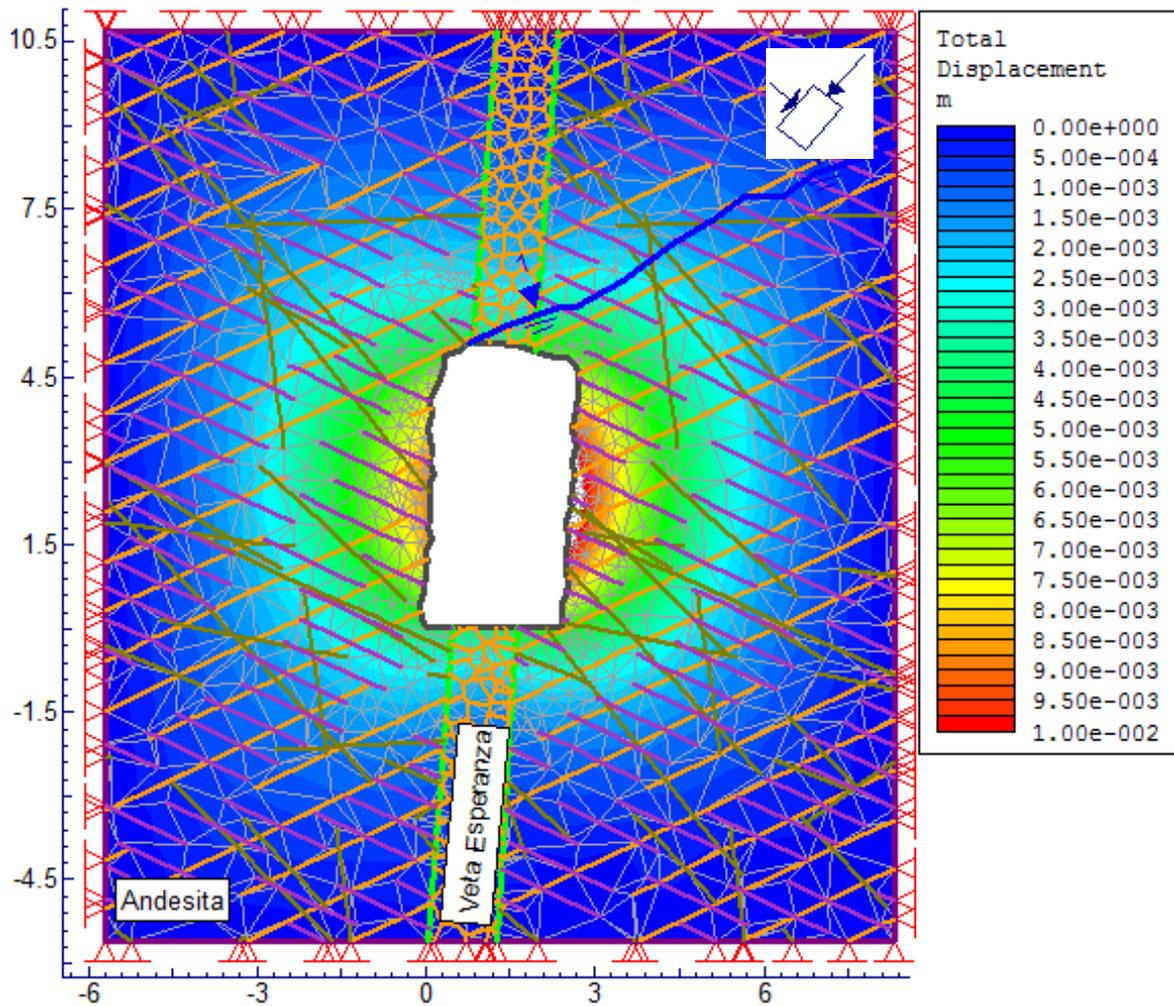


Figura 4.16. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 3.

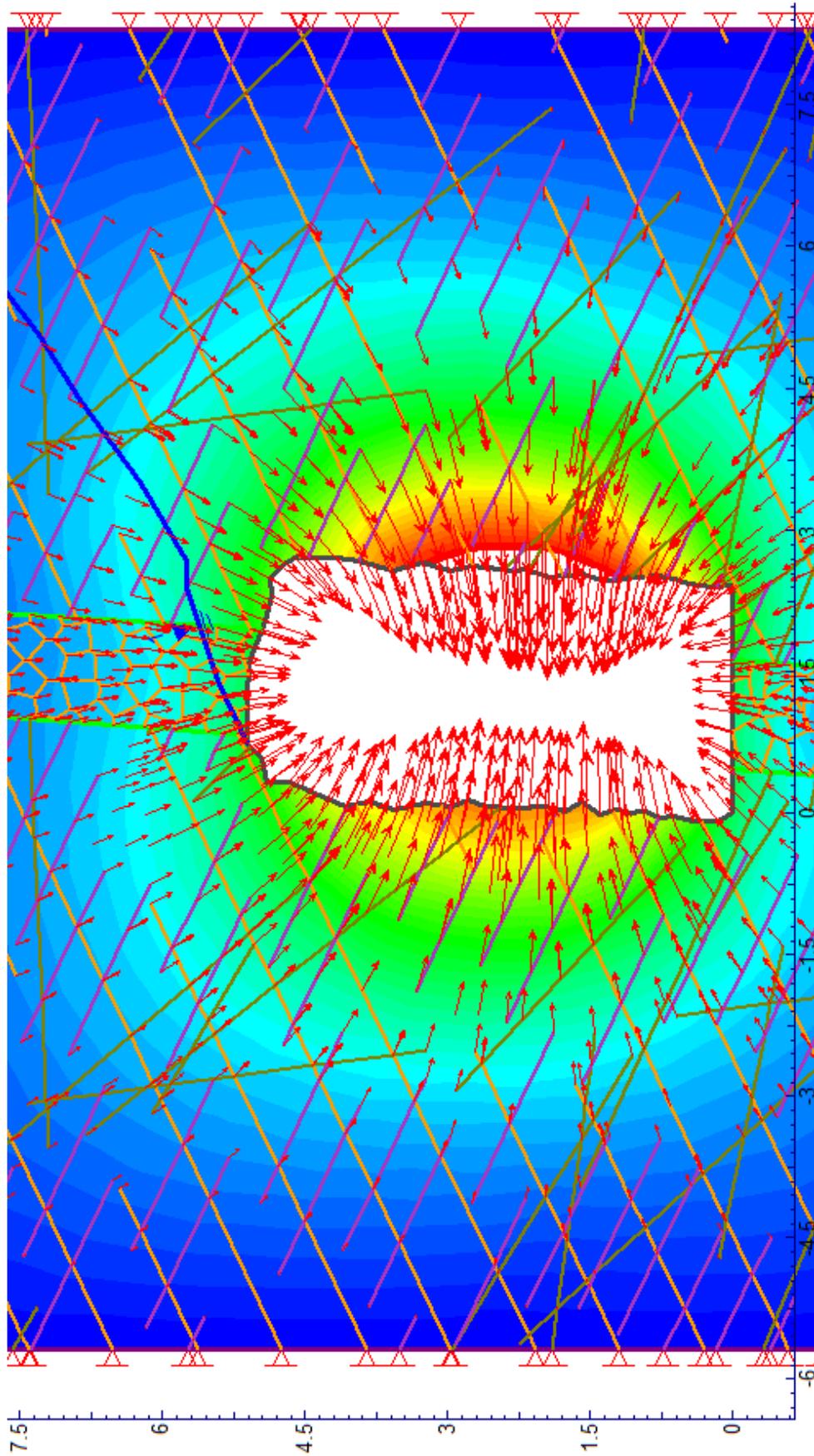


Figura 4.16. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 3.

En la Figura 4.17, la curva de tendencia estadística de la estación 3, muestra las variaciones de resultados del esfuerzo de corte vs. la distancia que varían desde 0 hasta 1.25 MPa, llegando este valor a una distancia de 21.81 m.,siendo afectada en mayor intensidad que el resto de estaciones geomecánicas ocasionando constantes cizallamiento de la roca.

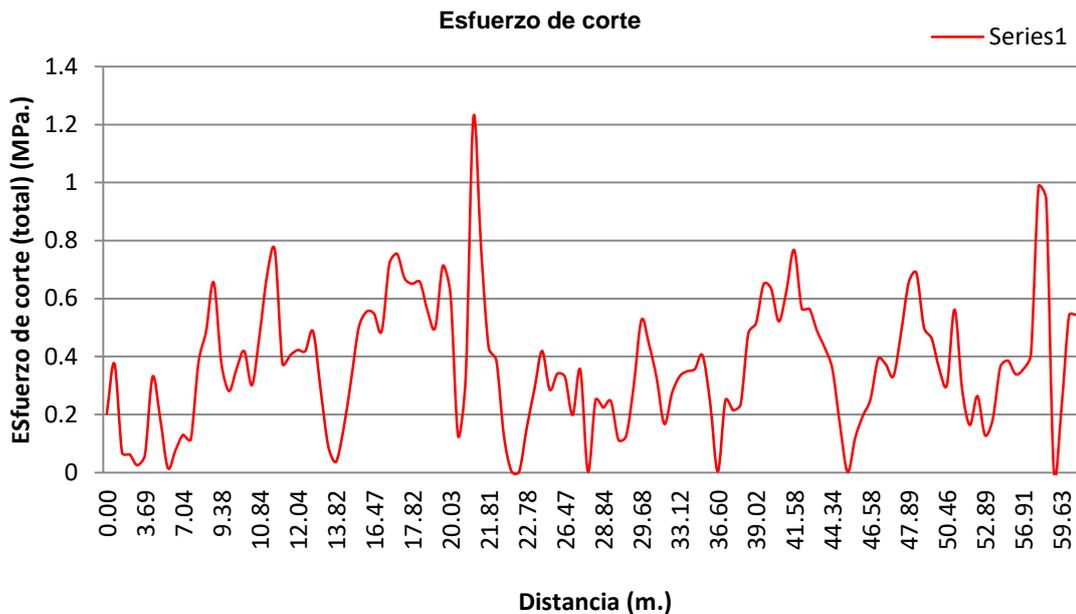


Figura 4.17. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 3 (Esfuerzo de corte vs. distancia).

- **Sostenimiento de la Estación Geomecánica 3.**

De acuerdo al cálculo del diámetro equivalente se obtiene un valor de 2.63, por presentar luz o altura = 4.20 y ESR = 1.60 e interpolando con el Q = 5.52, se ubica en una zona 1: espaciado con pernos y con una longitud de anclajes de 2.88 m. Definiendo la malla de distribución de pernos puntuales de 1.80 m x 1.80 m.

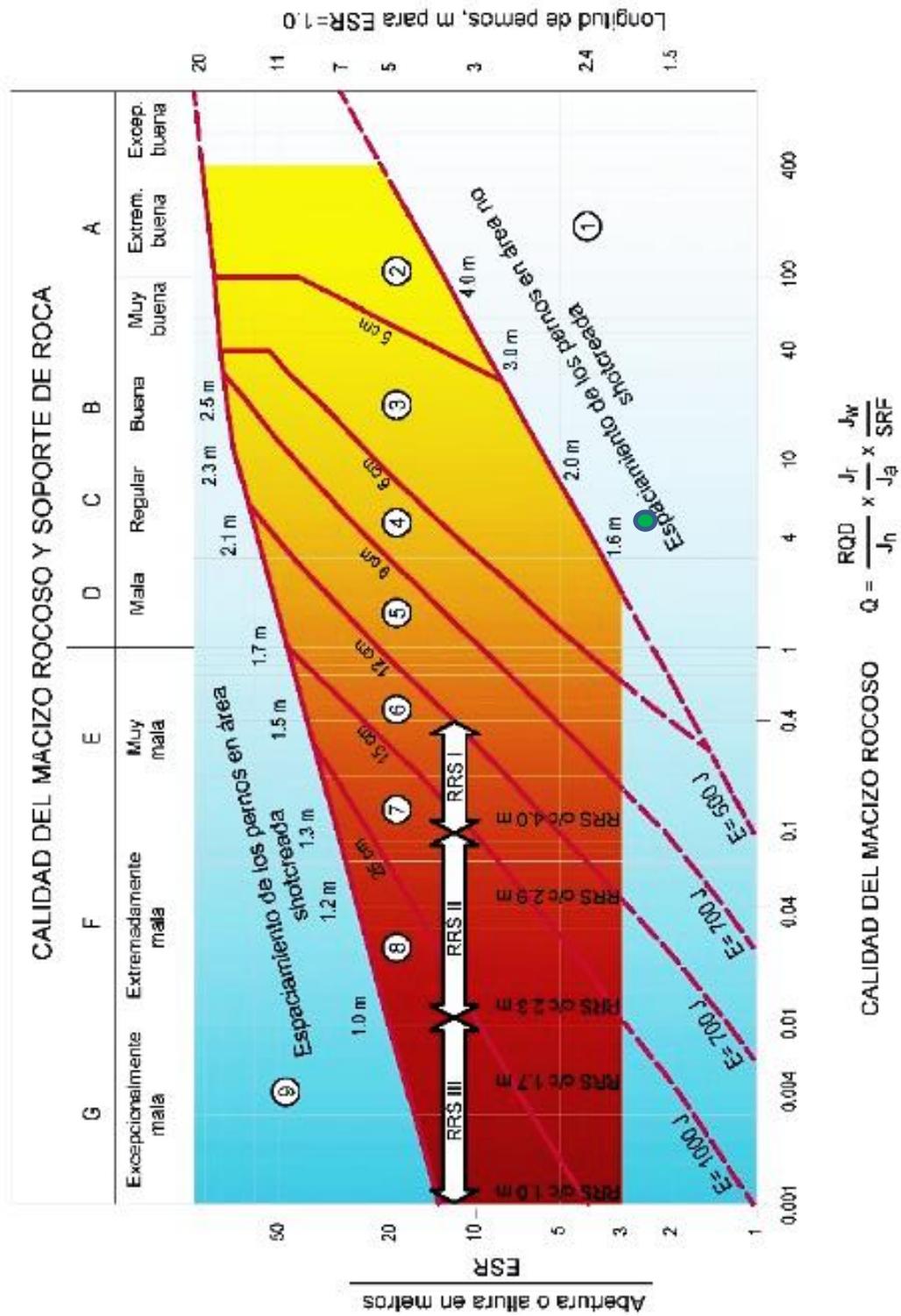


Figura 4.18. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 3.

La geomecánica define que esta estación 3 presenta una sección subterránea 2.20 m. : 4.20 m. (H : V) con superficie geométrica regular y de resistencia de roca fuerte en una longitud de 39 m. que requieren estabilización por sostenimiento pasivo por puntales, por estar ubicados los esfuerzos tenso-deformacionales en los hastiales de la excavación subterránea (Phase² V8.0). El sostenimiento por puntales es por haber formado una estructura en forma de chimenea sub-vertical en el mismo sentido de la Veta Esperanza, que está ocasionando constantes desprendimientos bloques. Proponiéndose sostenimiento con puntales de 1.10 m. x 2.50 m. de sección transversal, conformado por 32 puntales de madera distribuidos de manera homogénea en su superficie rocosa, soportando cada puntal de madero 9.36 KN. Además, para su mejor funcionamiento se definió puntales de sección de 13 cm. x 13 cm., altura de puntal 2.10 m. (con inclinación que fluctuó entre 5° a 10°), con plantilla en la caja techo (mejor distribución de cargas), con un espesor de 2 pulg. y 12 pulg. x 12 pulg. de longitud y una patilla en la caja piso de 2 pulg. de profundidad para un mejor anclamiento del poste.

Tabla 4.12. Resultados del sostenimiento por cuadros de maderos, utilizando métodos flectores de maderos, estación geomecánica 3.

Carga de roca por cada puntal (Clave) KN/m ² .	25.94		
Carga de roca por área atribuida por puntal (Clave) KN	9.36		
Altura de puntal (m.)	2.10		
Resistencia compresión paralela de las fibras (KN/cm ² .)	2.60		
Resistencia compresión paralela de cálculo (KN/cm ² .)	1.60		
Área de sección teórica de puntal (cm ² .)	8.78		
Lado de puntal adoptado (cm.)	13	Sección	
		b (cm.)	h (cm.)
		13.00	13.00
Radio de giro de sección (cm.)	2.17		
Esbeltez mecánica (adm.)	96.77		
Coeficiente de pandeo (adm.)	0.31		
Tensión solicitada compresión paralela al cálculo (KN/cm ² .)	0.10		
Eficiencia de la madera	28%		

4.5.4 ESTACIÓN GEOMECÁNICA 4

Se encuentra ubicado en el bypass, que brinda acceso a tres Vetas: West Pacasmayo, Animas y Esperanza. Constituido por un pilar subterráneo de 4 .00 m. x 4.00 m. diámetro. Generándose en esta zona agrietamientos, aberturas distensivas en la solera de 5 a 7 cm., ocasionando abultamientos en la solera, por la sobre acumulación de esfuerzos tensionales, por la sobre explotación de los tajeos. Las características litológicas de la roca andesítica muestra una resistencia de 56.38 MPa., conformado por tres familias de discontinuidades, con espaciados de 0.20 a 0.60 m. en su matriz rocosa, aberturas de 1 a 5 mm., con rellenos de minerales de galena, yeso y epsomita y con superficies ligeramente rugosas. Esta sección está afectada por humedad constante.

● **Cálculo del RMR y Q de Barton de la Estación Geomecánica 4.**

Tabla 4.13. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 4.

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

$$\text{RMR} = 7 + 17 + 10 + 6 + 5 + 5 + 4 + 5 + 10 = \mathbf{69}$$

Corrección con las curvas de correlación:

- Resistencia de la matriz rocosa = 6
- RQD = 15.5
- Separación de las diaclasas = 9.5

$$\text{RMR}_{\text{Básico Corregido}} = 6 + 15.5 + 9.5 + 6 + 5 + 5 + 4 + 5 + 10 = \mathbf{66}$$

Tabla 4.14. Corrección por Orientación de Discontinuidades, Estación Geomecánica 4.

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

$$RMR_{\text{Corregido}} = 6 + 15.5 + 9.5 + 6 + 5 + 5 + 4 + 5 + 10 - 2 = 64$$

Tabla 4.15. Reporte de Estación Geomecánica 4 – Pl. + 190 m. a Pl. + 200 m.

Resistencia de roca (Esclerometro Mpa.)					56.38					
Criterios Empíricos					Q		Tensiones			
					RQD (%)	78.47	σ_1 (MPa)	1.64		
					Jn	9				
					Jr	3				
					RMR	GSI	Ja	1	σ_3 (MPa)	0.91
							Jw	1		
SRF		1								
Puntaje	Cuantitativo	78.47	64	59	Q	26.16	m	0.55		
	Calitativo	Buena	Buena	Regular		Buena				

- **Análisis mediante el software DIPS de la Estación Geomecánica 4.**

La Figura 4.19, muestra la cuña ubicada en el hastial izquierdo y la clave del túnel Nivel 3, formando cuñas tetrahedrales que están definidas por los planos de intersección y la orientación de deslizamiento por las diaclasas D-1 y D-2. Los planos de intersección de diaclasas (D/DD): D-2 y E: 63°/203°, E y D-1: 79°/264°, y D-1 y D-2: 21°/322°, forman esta cuña ocasionado desprendimiento de bloques de rocas que afectan la estabilidad de la excavación subterránea de esta estación geomecánica 4, presentando un ángulo fricción de 59°.

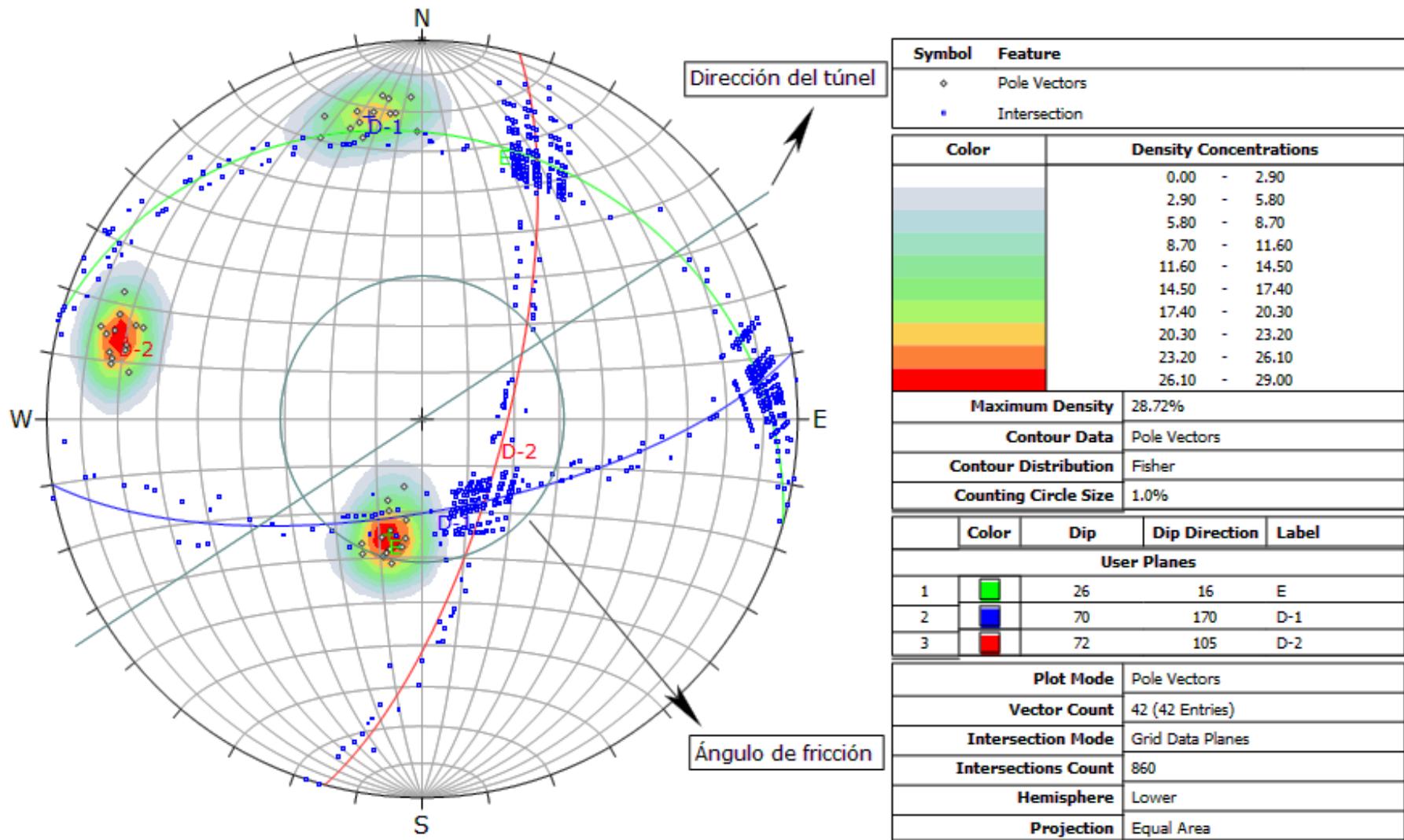


Figura 4.19. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 4, muestra el desplazamiento de la cuña entre las juntas D-1 y D-2.

- **Análisis mediante el software RocData de la Estación Geomecánica 4.**

En la Figura 4.20, se muestra la envolvente curva de Hoek y Brown y la linealizada de Morh – Coulomb, utilizando el método de las áreas equivalentes, obteniéndose los parámetros geotécnicos para el análisis en la estación geomecánica 4, mediante el software RocData. Aplicando el método de equivalencia de áreas se obtiene la presión de confinamiento en el macizo rocoso de 0.91 MPa y el rango de tensiones.

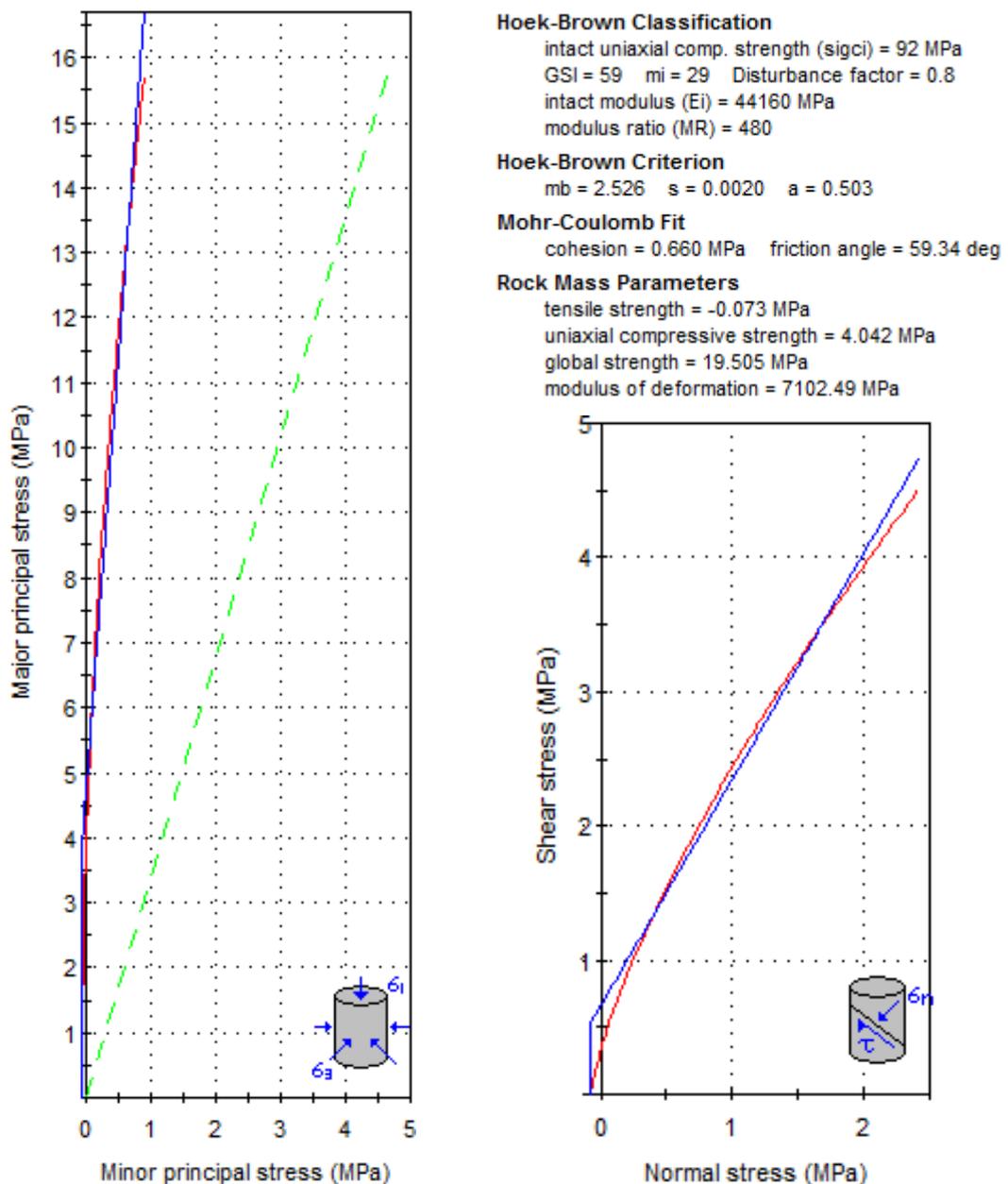


Figura 4.20. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh – Coulomb de la Estación Geomecánica 4.

- **Análisis mediante el software Phase² de la Estación Geomecánica 4.**

La Figura 4.21, define el estado tenso-deformacional de la excavación subterránea, observando deformaciones radiales uniformes en toda la perifererie de la sección, proyectándose hasta una longitud de 35 cm. de afectación tensional.

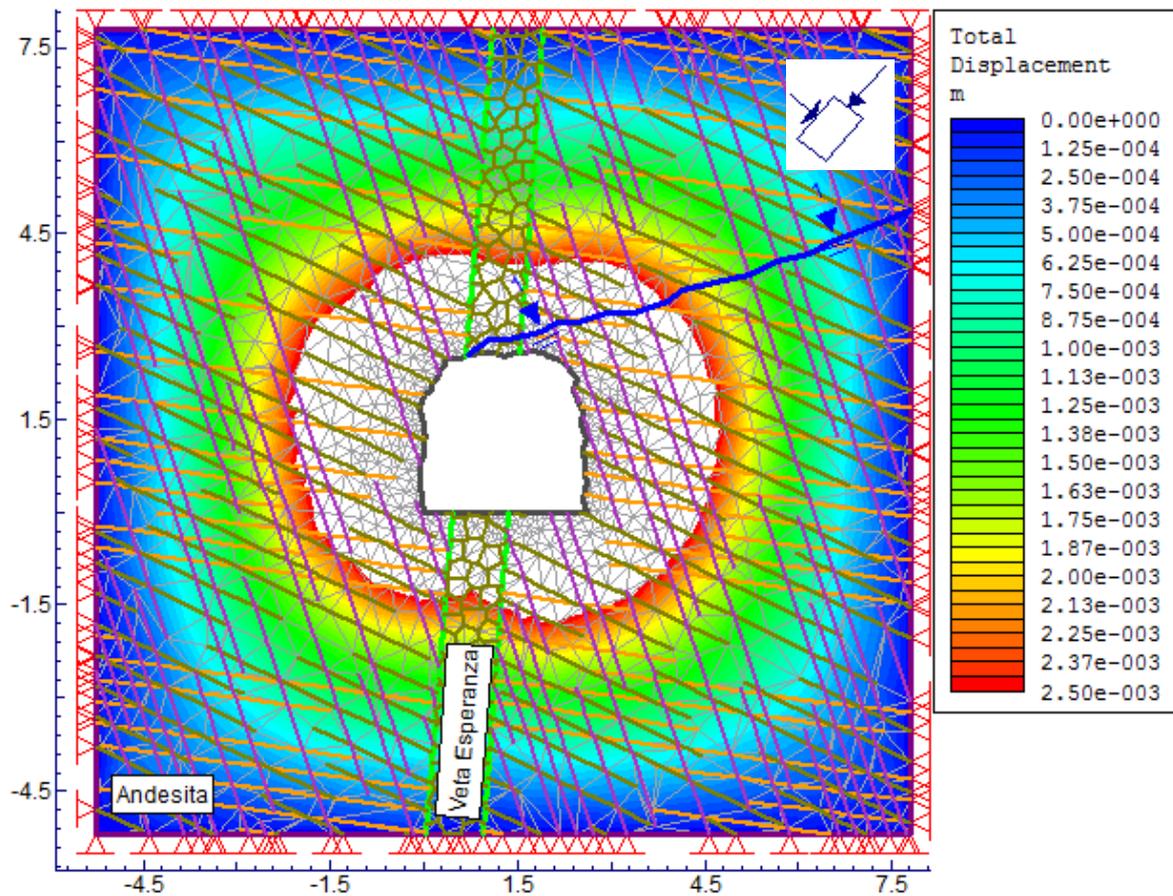


Figura 4.21. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 4.

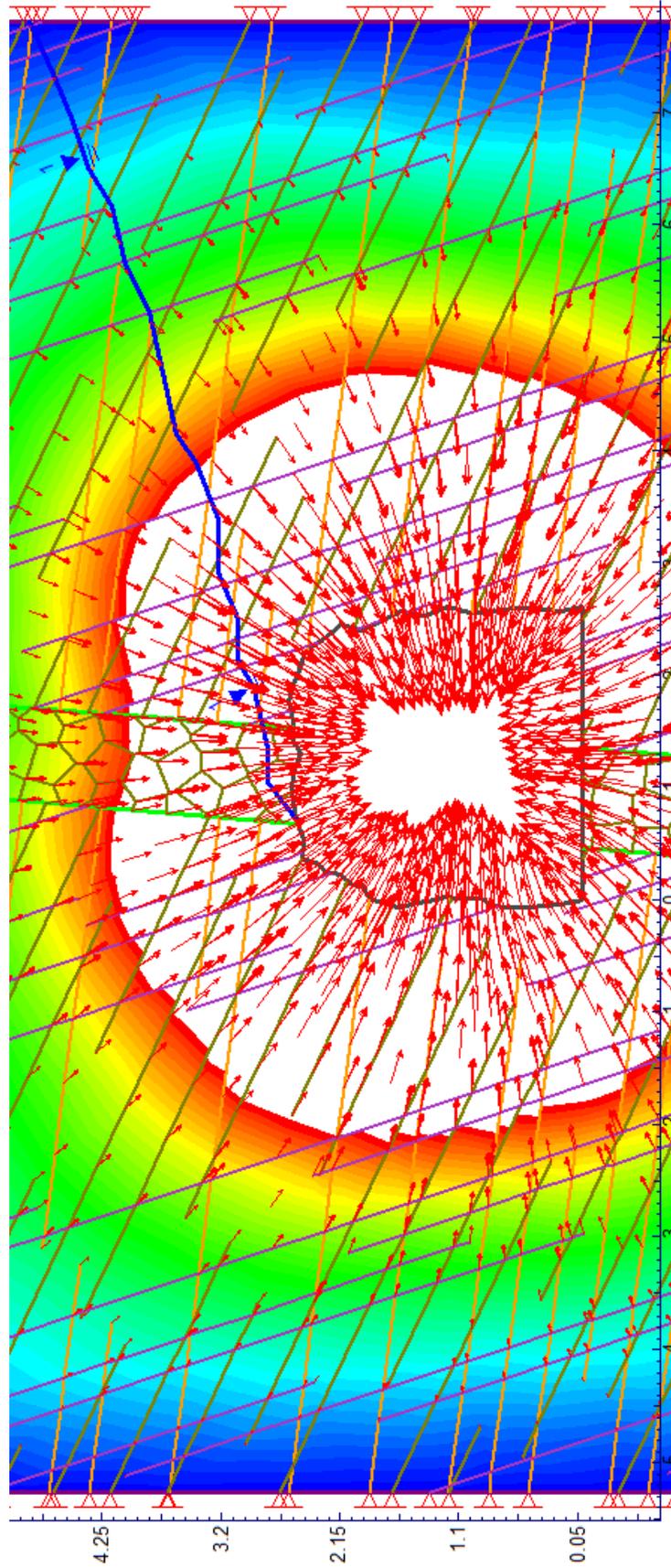


Figura 4.21. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 4.

En la Figura 4.22, la curva de tendencia estadística de la estación 4, muestra la relación esfuerzo de corte vs distancia, variando el esfuerzo de corte desde 0 a 2.3 MPa., obteniendo este valor a una distancia de 51.21 m., en función de la calidad de roca.

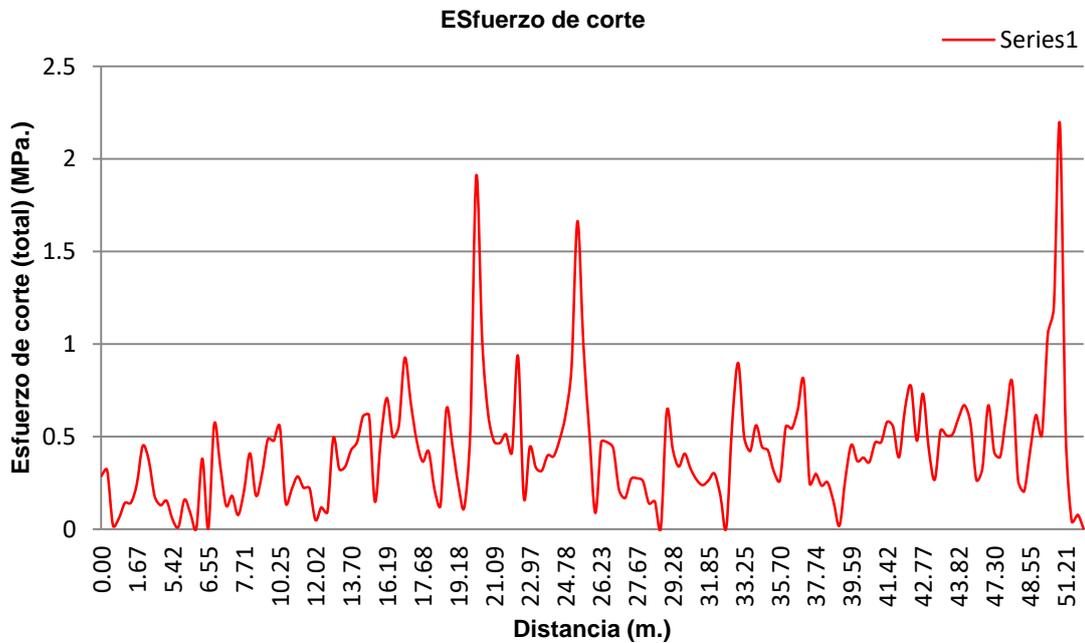


Figura 4.22. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 4 (esfuerzo de corte vs. distancia).

- **Sostenimiento de la Estación Geomecánica 4.**

De acuerdo al cálculo del diámetro equivalente se obtiene un valor de 3.50, por presentar luz o altura = 5.60 y ESR = 1.60 e interpolando con el Q = 26.16, se ubica en una zona 1: espaciado con pernos y con una longitud de anclajes de 3.52 m. Definiendo la malla de distribución de pernos puntuales de 2.60 m. x 2.60 m.

.
.

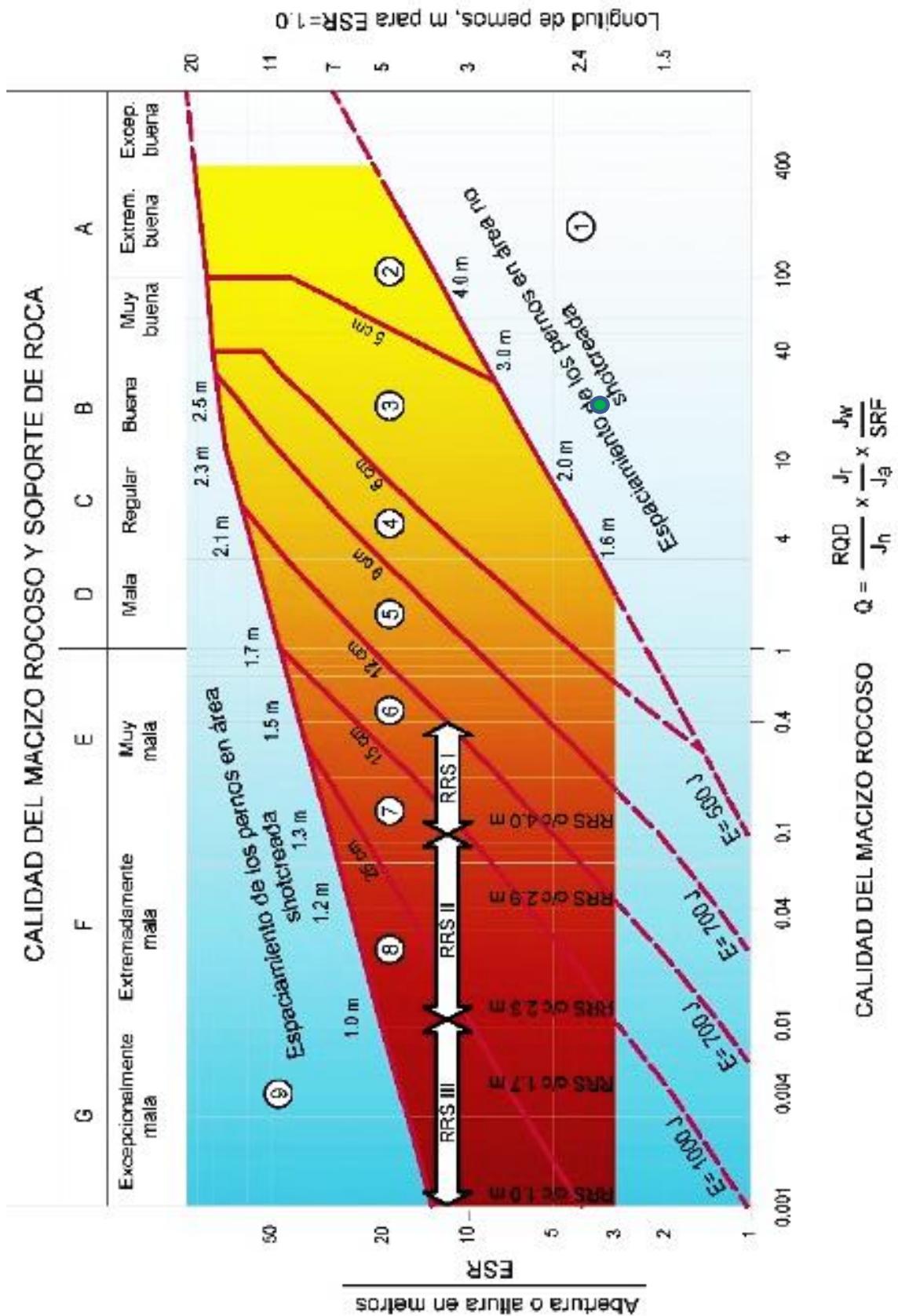


Figura 4.23. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 4.

El tipo estabilización será por sostenimiento activo conformado por pernos de anclajes por adherencia, distribuidos de manera sistemática en un área de 6.00 m. x 6.00 m. en toda la clave de la sección subterránea, proyectándose una carga vertical de roca de 1.35 m. En consecuencia, se propone instalar barras de acero helicoidales corrugadas que presentan una capacidad de soporte de 19.90 Tn., con diámetro de acero 3/4'', con longitud de 1.80 m., con placa de reparto de acero de sección cuadrada 15 cm. x 15 cm. y una arandela para mejor acoplamiento en la superficie de la tuerca y la placa de reparto. Obteniendo un F.S. de 2.76 del anclaje de adherencia.

4.5.5 ESTACIÓN GEOMECÁNICA 5

Está conformada por rocas andesitas de color verdusco ligeramente alteradas con composiciones de minerales hidratados, presentando pátinas de óxidos por la constante humedad que presenta, ocasionando colapsos en la clave y afectando el sostenimiento por madera. La roca presenta resistencia de 117.22 MPa.

● **Cálculo del RMR y Q de Barton de la Estación Geomecánica 5.**

Tabla 4.16. Clasificación RMR89, Estación Geomecánica 5.

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

$$\text{RMR} = 12 + 13 + 8 + 4 + 3 + 3 + 2 + 3 + 10 = \mathbf{58}$$

Corrección con las curvas de correlación:

- Resistencia de la matriz rocosa = 10.5
- RQD = 12.8
- Separación de las diaclasas = 7.7

$$\text{RMR}_{\text{Básico Corregido}} = 10.5 + 12.8 + 7.7 + 4 + 3 + 3 + 2 + 3 + 10 = \mathbf{56}$$

Tabla 4.17. Corrección por orientación de discontinuidades, Estación Geomecánica 5.

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

$$RMR_{\text{Corregido}} = 10.5 + 12.8 + 7.7 + 4 + 3 + 3 + 2 + 3 + 10 - 2 = 54$$

Tabla 4.18. Reporte de Estación Geomecánica 5 – Pl. + 225 m. - Pl. + 235 m.

Resistencia de roca (Esclerometro Mpa.)					117.22			
Criterios Empíricos		RQD (%)	RMR	GSI	Q		Tensiones	
					RQD (%)	63.87	σ_1 (MPa)	2.00
					Jn	15		
					Jr	1.5		
					Ja	1	σ_3 (MPa)	1.07
					Jw	1		
SRF	1							
Puntaje	Cuantitativo	63.87	54	49	Q	6.39	m	0.54
	Calitativo	Regular	Media	Regular		Media		

● **Análisis mediante el software DIPS de la Estación Geomecánica 5.**

La Figura 4.24, presenta por tres tipos de cuñas definidas por la proyección estereográfica y el movimiento cinemático: la primera lo definen cuñas prismáticas truncadas, ubicadas en el hastial izquierdo y la clave del túnel, formada por planos de intersección (D/DD): E y D-2: 58°/123°, D-2 y D-1: 57°/037°, y E y D-1: 76°/051°; ocasionando cuñas por caída bloques gravitatorios; la segunda esta definida por la base cuadrangular llamada prismoide cuadrangular, formada por planos de intersección (D/DD): E y D-2: 58°/123°, D-2 y D-1: 57°/037°, D-1 y D-3: 40°/018°, y E y D-3: 77°/188°, definiendo la cuña de mayores dimensiones con la caída de bloques por deslizamiento en función de la discontinuidad D-1; y la tercera por la intersección de planos conforman cuñas tetrahedricas, ubicadas en el hastial derecho formada por planos de intersección (D/DD): D-1 y D-3: 41°/017°, D-2 y D-1: 56°/037°, y D-2 y D-3: 71°/012°, definiendo cuñas por caída bloques gravitatorios.

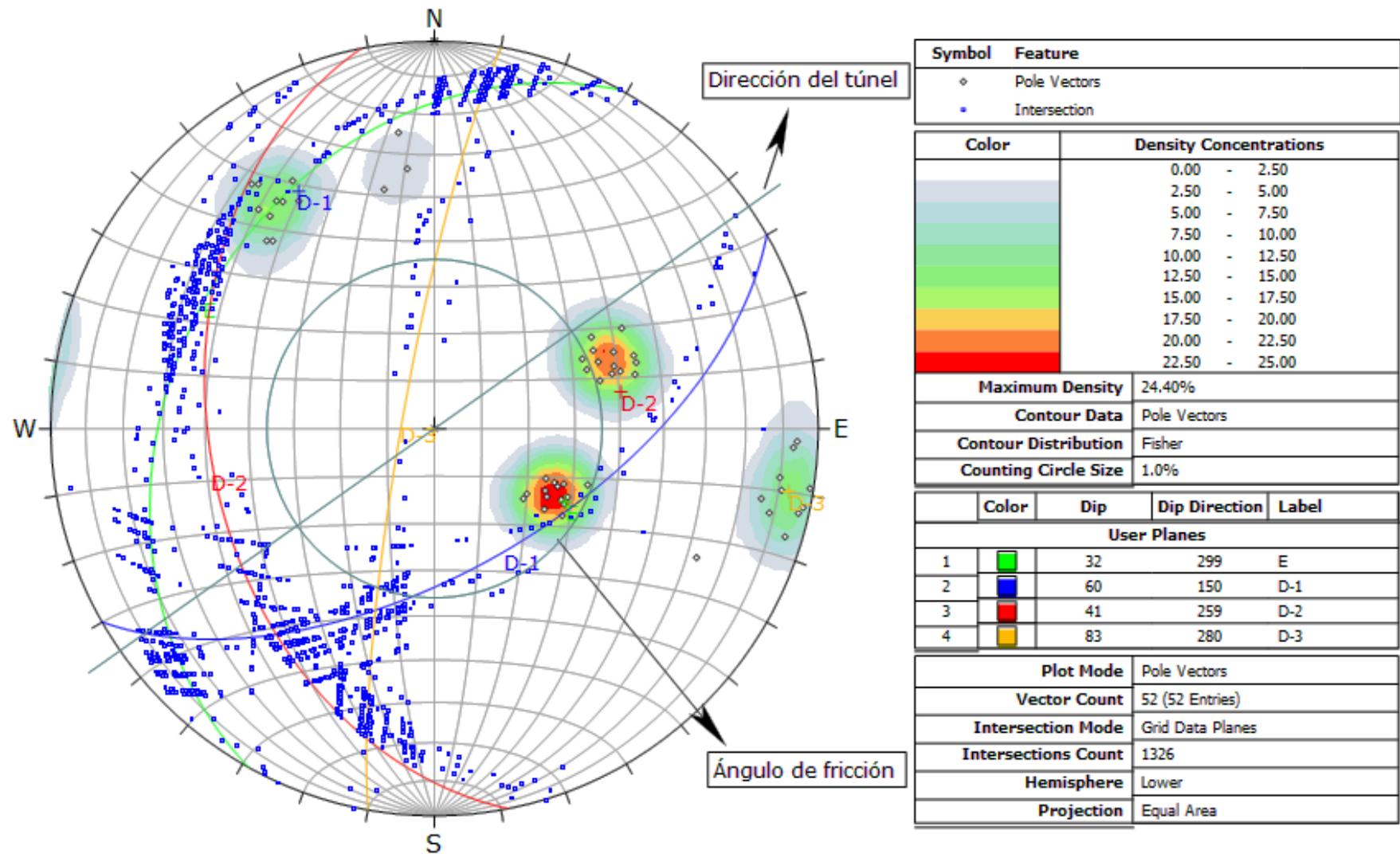


Figura 4.24. Proyección estereográfica de la Estación Geomecánica 5, ocasionando deslizamiento de rocas en relación de la junta D-1

- **Análisis mediante el software RocData de la Estación Geomecánica 5.**

En la Figura 4.25, se muestra la envolvente curva de Hoek y Brown y la linealizada de Morh – Coulomb, utilizando el método de las áreas equivalentes, obteniéndose los parámetros geotécnicos para el análisis en la estación geomecánica 5, mediante el software RocData. Aplicando el método de equivalencia de áreas se obtiene la presión de confinamiento en el macizo rocoso de 1.07 MPa y el rango de tensiones.

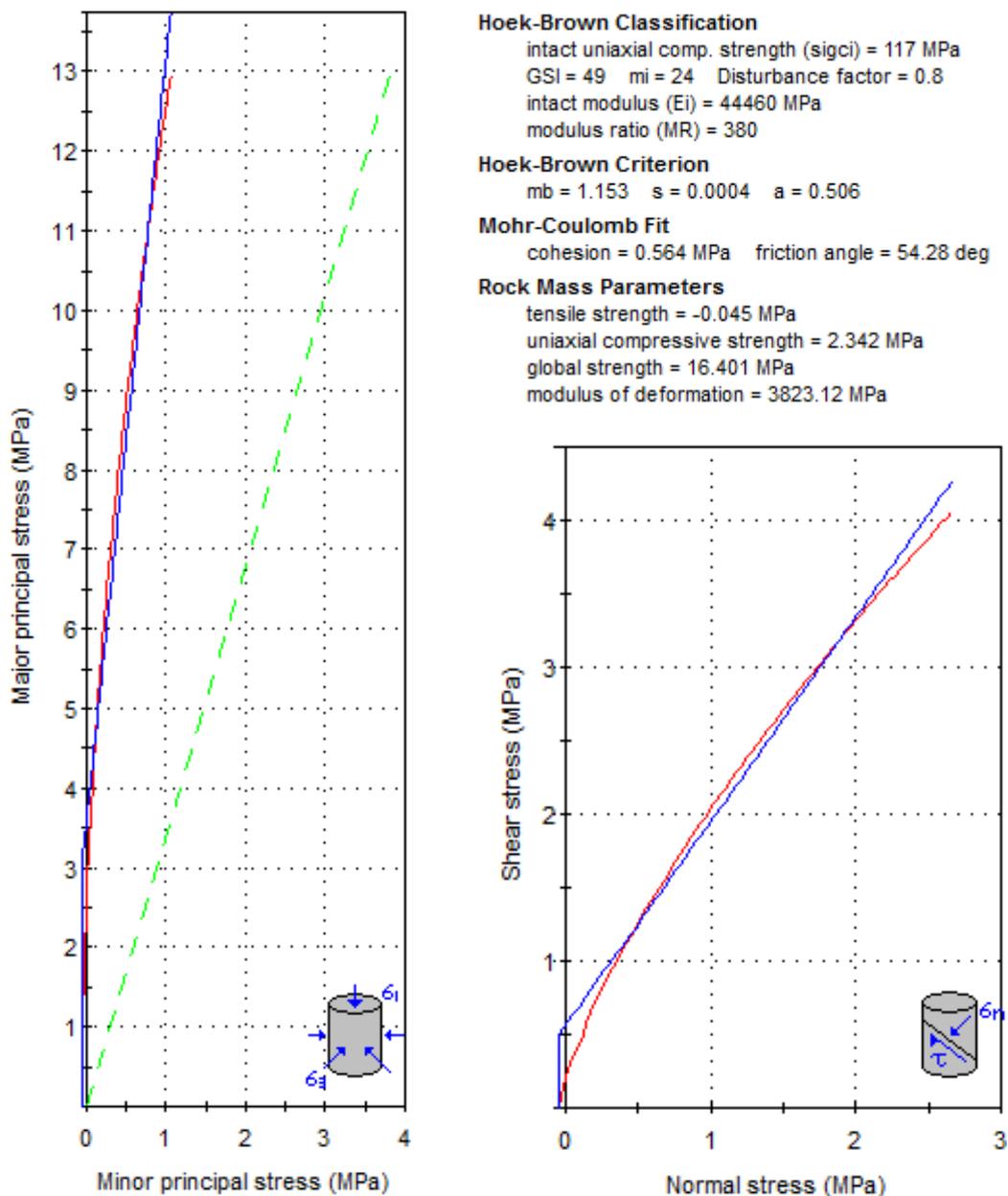


Figura 4.25. Envolvente curva de Hoek y Brown, y la linealizada de Morh – Coulomb de la Estación Geomecánica 5.

- **Análisis mediante el software Phase² de la Estación Geomecánica 5.**

La Figura 4.26, muestra el estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la estación 5, presentando deformación uniforme en toda la sección, por las condiciones geomecánicas de calidad la roca y el tipo de sección en forma de baúl, proyectándose hasta una longitud de 22 cm. de afectación tensional.

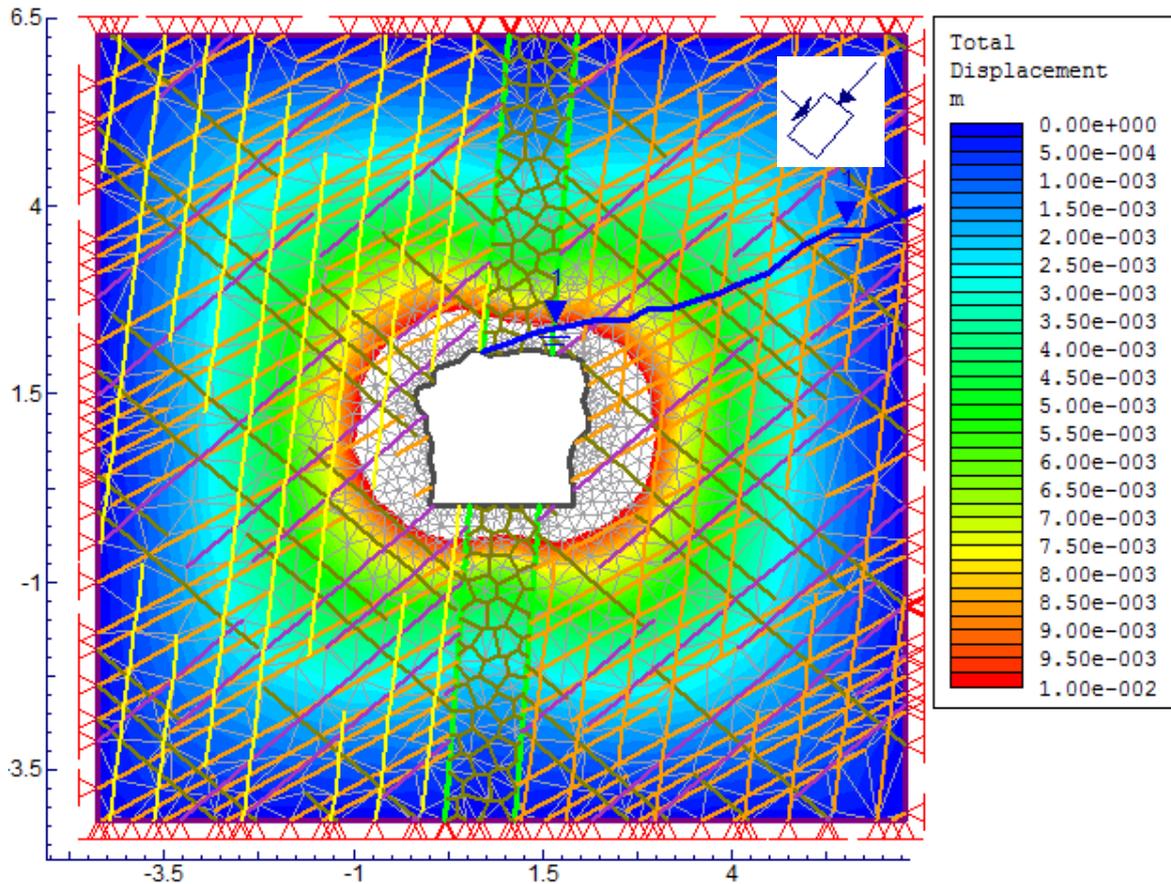


Figura 4.26. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 5.

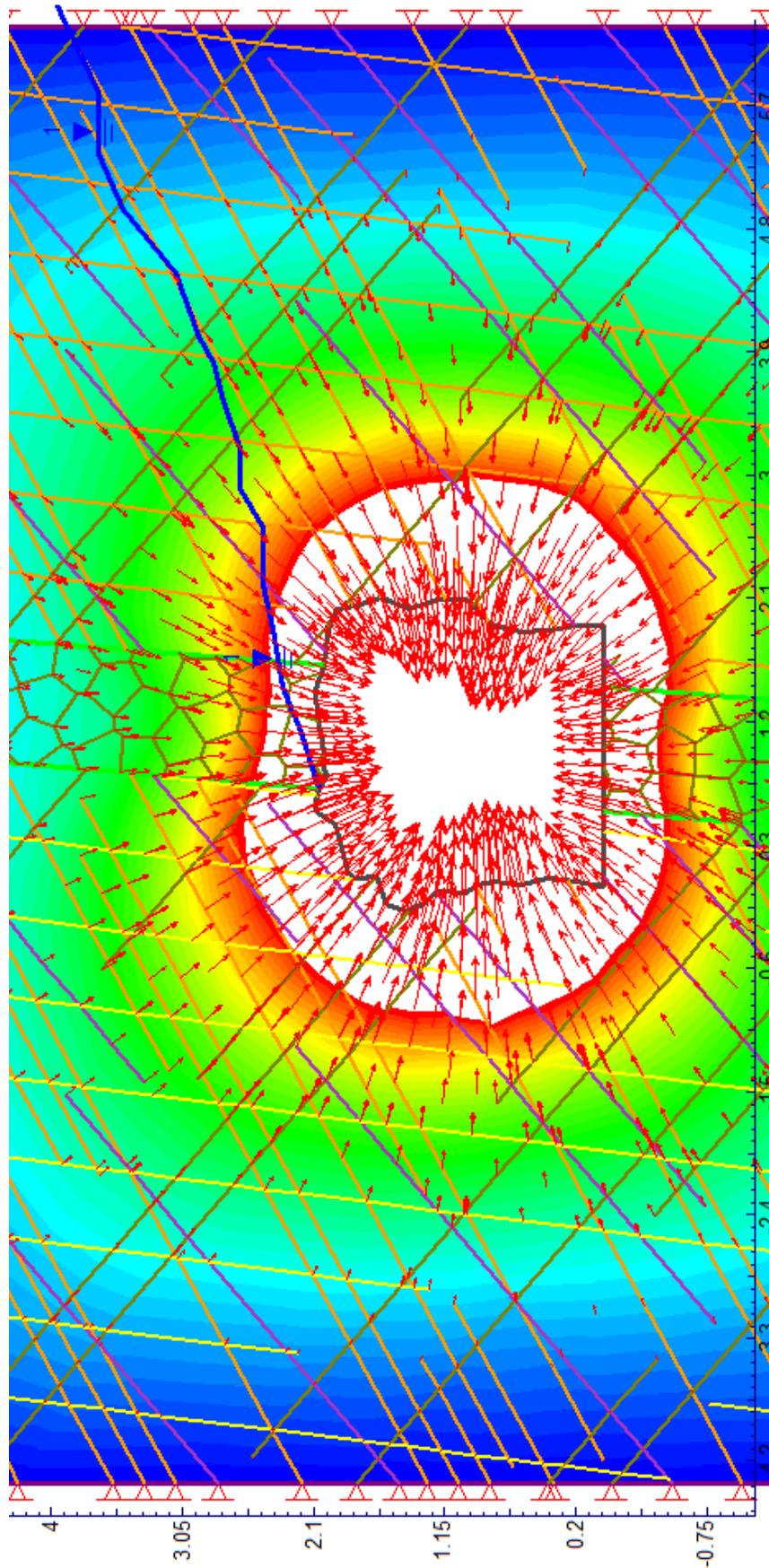


Figura 4.26. Estado tenso-deformacional de la excavación subterránea de la Estación Geomecánica 5.

En la Figura 4.27, la curva de tendencia estadística de la estación 5, muestra variaciones de resultados del esfuerzo de corte entre 0 a 1.78 MPa, obteniendo el valor máximo a una distancia de 20.66 m., de proyección de afectación alrededor de la excavación.

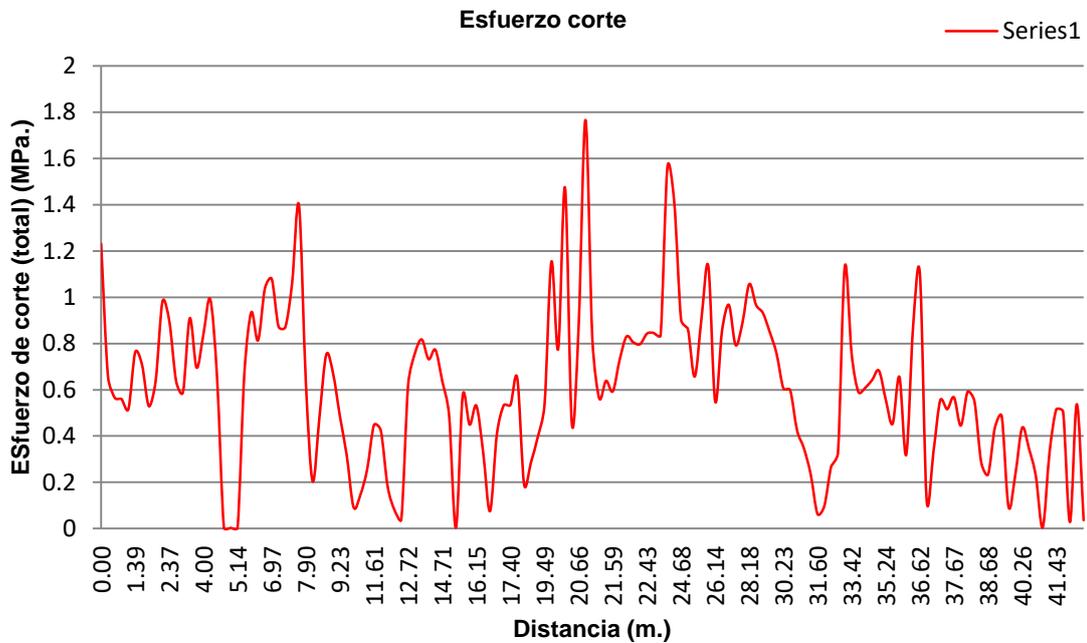


Figura 4.27. Curva de tendencia estadística de la Estación Geomecánica 5 (esfuerzo de corte vs. distancia).

- **Sostenimiento de la Estación Geomecánica 5.**

De acuerdo al cálculo del diámetro equivalente se obtiene un valor de 1.38, por presentar luz o altura = 2.20 y ESR = 1.60 e interpolando con el Q = 6.39, se ubica en una zona 1: espaciado con pernos y con una longitud de anclajes de 0.96 m. Definiendo la malla de distribución de pernos puntuales de 1.90 m x 1.90 m.

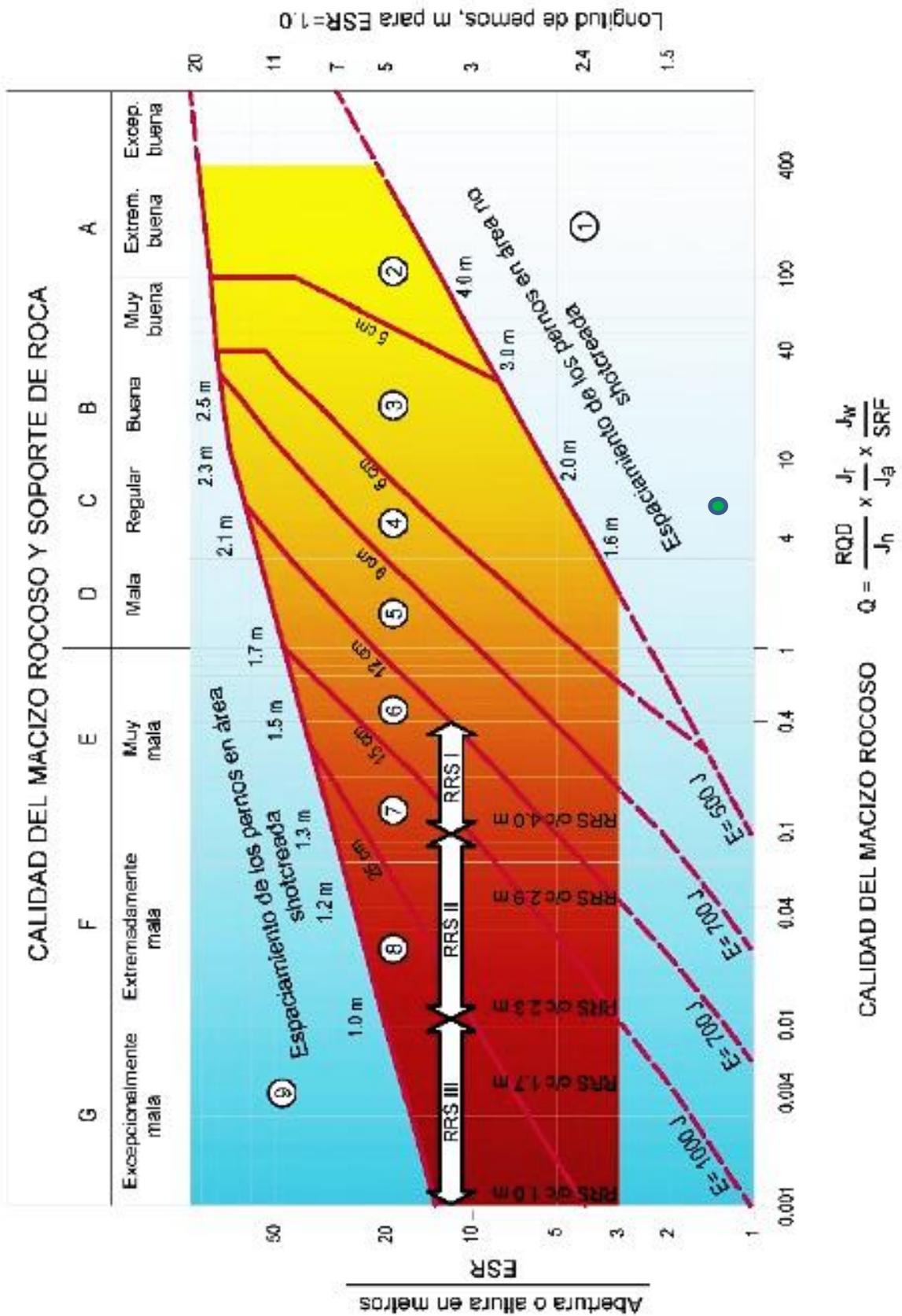


Figura 4.28. Método gráfico de sostenimiento del sistema Q de Barton de la Estación Geomecánica 5.

La geomecánica muestra que está conformado por roca andesita de calidad regular presentando una geometría de sección subterránea 1.70 m. : 2.20 m. (H : V), sugiriéndose desatado de rocas en toda la sección transversal y del tramo longitudinal de 10 m., sugiriendo estabilización por anclajes adherentes. El análisis propone una sección de forma baúl por presentar condiciones favorables por la orientación de las discontinuidades. La distribución será de manera sistemática en un área de 10.00 m. x 5.00 m. en toda la clave de la sección subterránea, proyectándose una carga vertical de roca inestable de 1.55 m. En consecuencia, se propone instalar barras de acero helicoidales corrugadas que presentan una capacidad de soporte de 19.90 Tn., con diámetro de acero 3/4'', con longitud de 1.80 m., con placa de reparto de acero de sección cuadrada 15 cm. x 15 cm. y una arandela para mejor acoplamiento en la superficie de la tuerca y la placa de reparto. Obteniendo un F.S. de 2.57 del anclaje de adherencia.

4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las estaciones geomecánicas del Nivel 3 de la Mina Paredones (Veta Esperanza), muestran valores de calidad de roca entre muy mala a buena, siendo definida por las condiciones de afectación como: la litología, geoestructuras, alteración, agua subterránea y estado tensional en las secciones del análisis geomecánico, fluctuando en muchos de los casos estados deformacionales de diferente orientación vectorial y la carga litostática.

Las clasificaciones geomecánicas utilizadas muestran resultados de la calidad de roca por cada estación, evidenciándose variaciones del RMR de calidades: mala (E-2), media (E-1, E-3 y E-5), buena (E-4) y Q de Barton de calidades: muy mala (E-2), mala (E-1), media (E-3, E-5) y buena (E-4). Aplicando para los resultados del RMR básico curvas de correlación en los valores de resistencia a la compresión uniaxial, RQD y espaciado de discontinuidades. Para el valor RMR corregido se utilizó el ajuste por orientación de discontinuidades. Obteniendo valores que se ajustan a la realidad del comportamiento del macizo rocoso y la orientación de geoestructuras. Sin embargo Aceijas (2019), analizando el Nivel 5 de la Mina Paredones mostró resultados de la calidad de roca y alteración que presenta este Nivel 5, con valor RMR promedio de 53 y Q de Barton de calidad:

mala(4), media(7.19, 8.45) y buena(10.48, 11.76, 12.15, 12.56, 13.48, 13.94). De acuerdo con estos resultados y comparaciones, presentan similitudes con los valores obtenidos por: litología, orientación de pseudoestratificación, grado de alteración y calidad de roca obtenida según los cálculos..

La estación 1 y 2 está definida por una cortada para llegar al empalme con la Veta Esperanza a una distancia de 57 m. desde la Bocamina, mostrando valores y vectores de desplazamiento que tienen como origen en la clave para la estación 1 y en los hastiales para la estación 2, definiendo sostenimiento por cuadros de madera rectos para la estación 1 y cónicos para la estación 2, presentado dimensiones de la sección de los maderos: 25 cm. x 30 cm. (Estación 1) y 15 cm. x 25 cm. (Estación 2), en relación de la capacidad de carga litostática y la orientación tensional periférica en la excavación subterránea en el medio plástico de deformación. En cambio, la estación 3 por las condiciones que presenta el tajeo dejado en relación de la orientación de la Veta Esperanza tiene una inclinación de 85° a 88° con la roca caja, mostrando claramente que el estado tenso-deformacional (Phase² V8.0) se origina en los hastiales de roca, de manera compresiva, originado inestabilidades progresivas en esta sección. Para la estabilización se propone puntales de madera con sección de cuadrada: 13 cm. x 13 cm., con distribuciones de carga atribuida de 1.10 m x 2.50 m. en los 39 m. de estabilización. Teniendo en consideración que el análisis estructural de la madera fue calculado por los momentos flectores, para mejores dimensionamientos del madero. En consecuencia Montoya (2018), define y demuestra que los esfuerzos tenso-deformacionales tienen que ver con el tipo de litología, profundidad de excavación, orientación de esfuerzos y con el medio continuo o discontinuo de análisis numérico. Demostrando que el Nivel 5 de la Mina Paredones presenta de manera continua y progresiva inestabilidad y es susceptible a cambios graduales del medio plástico presentado valores de : 0.003 m., 0.007 m. 0.013 m. 0.114 m. y 0.782 m., definiendo correlaciones con los resultados de la tesis presentada por el tipo de litología, alteraciones de roca, profundidad de excavación y orientación de esfuerzos. Al mismo tiempo el sostenimiento que aplica en cada estación de análisis también presenta una base fundamentada por los estados tensionales y cambio litológico en cada una de ellas.

Tabla 4.19. Desplazamientos totales máximos, relacionado con el medio plástico – Phase² V8.0

Estación	Desplazamientos totales (m.)
E-1	0.0001
E-2	0.0299
E-3	0.01105
E-4	0.00893
E-5	0.02299

Sin embargo, en las estaciones 4 y 5, se genera inestabilidad tiene que ver con las familias de discontinuidades, por los desprendimientos de bloques y las deformaciones periféricas homogéneas en la excavación subterránea ocasionando estados muy cambiantes tensionalmente, sugiriendo por esta condición el sostenimiento por anclajes sistemáticos por adherencia, con diámetro de anclaje de 3/4'', con longitud de 1.80 m. y la malla de distribución de anclajes de 1.90 m x 1.90 m. En cambio Cruzado (2017), definió que de las 18 estaciones geomecánicas analizadas, 7 se originan por sistemas de discontinuidades, proponiendo sostenimientos sistemático por anclajes cementados con espaciados de 1.80 m x 1.80 m. Presentado correlaciones geoestructurales de desprendimiento de bloques y los parámetros de calidad de roca con esta investigación.

El comportamiento estructural de la Veta Esperanza del Nivel 3, tiene orientación ENE-WSW, originado por eventos distensivos de movimiento cinemático dextral, desplazando a las Vetas de mineralización: Murciélago, Valencia, Pacasmayo, West Pacasmayo, Animas y Norte. Correlacionando con la investigación de Montoya (2018), definiendo que existen dos fallas transformantes dextrales de orientación E-W, localizadas en la Quebrada California y el Ingenio, también al mismo tiempo la de mayor alineamiento estructural dextral tiene que ver con la falla que pasa por el Río San Pablo de orientación ENE-WSW, cortando y desplazando a las geoestructuras de mineralización. Por ende, presenta similitudes correlacionales con la falla del Río San Pablo y la Veta Esperanza, en relación a su orientación y movimiento cinemático del origen mineralizaste de la zona.

4.7 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La inestabilidad del túnel del Nivel 3 de la Mina Paredones, dónde se encuentra la Veta Esperanza, si está vinculada a las variables: litología, geoestructuras, geohidrología y tensiones, afectando de manera gradual la inestabilidad por la constante humedad que presenta, ocasionando desprendiendo y caída de bloques, deformaciones y cambios de los estados tenso-deformacionales, esto debido a la carga litostática que generan por la columna de roca que va a soportar. Geomecánicamente los métodos empíricos y numéricos, mostraron la realidad del comportamiento deformacional, vectorial y tensional de cada estación analizada, demostrando que si existe inestabilidad de tipo Altamente Peligrosa, Peligrosa y Moderadamente Peligrosa. Al mismo tiempo el comportamiento de las geoestructuras presenta alineamiento estructurales bien marcados como las fallas del Rio San Pablo y la Veta Esperanza, que presentan el mismo movimiento cinemático y la orientación de bloques rocosos que definieron el emplazamiento del yacimiento minero del Nivel 3 de la Mina Paredones.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El cartografiado geológico subterráneo del Nivel 3 de la Mina Paredones, está emplazado en rocas andesitas gris verdusca y también aglomerados volcánicos del Volcánico Chilete. Geoestructuralmente la Veta Esperanza del Nivel 3, tiene comportamiento de orientación ENE-WSW y movimiento cinemático dextral paralelo a la falla del Rio San Pablo.

Las variables geológicas están relacionadas con la resistencia de roca (E-1 = 165.20 MPa, E-2 = 36.51 MPa, E-3 = 86.30 MPa, E-4 = 56.38 MPa y E-5 = 117.22 MPa), anisotropía (Cambios litológicos, alteración y cambios geoestructurales que presenta el macizo rocoso) y las variables geomecánicas están definidas por las propiedades de discontinuidades, delimitando el medio discontinuo del macizo rocoso.

Los estados tensionales están ligados a los cambios: deformacionales vectoriales y tensionales, de cada estación geomecánica. Mostrando que la estación 1 presenta deformaciones acumulativas en la clave, la estación 2 presenta deformaciones en la clave y hastiales, la estación 3 muestra deformaciones por tensiones en los hastiales y la estación 4 y 5, deformaciones periféricas homogéneas por la consistencia de la roca.

La caracterización geomecánica muestra variaciones del RMR de calidad: mala (E-2), media (E-1, E-3 y E-5), buena (E-4) y Q de Baton de calidad: muy mala (E-2), mala (E-1), media (E-3, E-5) y buena (E-4). De acuerdo con estos valores la zonificación se ha dividido en tres zonas de inestabilidad: Altamente Peligrosa (Pl. + 11.65 m. - Pl. + 59 m. y Pl. + 207 m. - Pl. + 236 m.), Peligrosa (Pl. + 65 m. -

Pl. + 120 m. y Pl. + 185 m. - Pl. + 199 m.) y Moderadamente Peligrosa. (Pl. + 0.00 m. - Pl. + 11.65 m.)

El sostenimiento geomecánico está definido por cuadros de madera rectos en la estación 1 y cónicos en la estación 2, puntales de madera en la estación 3 y pernos de anclajes sistemáticos adherentes en la estación 4 y 5.

5.2 RECOMENDACIONES

El concesionario Alfonso Terán Arenaza debe realizar ensayos piezométricos para definir que implicaciones tiene la permeabilidad de roca con la estabilidad geotécnica del Nivel 3.

El concesionario Alfonso Terán Arenaza debe instalar extensiómetros para obtener datos reales de desplazamiento que trasmite las secciones de la excavación subterránea en función: tipo de roca, tamaño y dimensiones de abertura de excavación subterránea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceijas Perez, JP. 2019. Geomecánica aplicada al control de las labores mineras para la minimización de la caída de rocas en la Mina Paredones Nivel 5. Tesis Ing. Cajamarca, Perú, UNC.
- Barton, N. 2002. Some new Q-Value correlations to assist in site characterization and tunnel desing. Madrid, España.
- Berrocal Mallqui, MA. 2015. Estabilidad de excavaciones subterráneas. Lima, Perú, Ventura Graf.
- Calderón Mena, MA. 2018. Caracterización geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento en la galería gavilán de oro de la UEA Ana Maria. Tesis Ing. Puno, Perú, UNA.
- Castro Caicedo, A; Pérez Pérez, DM. 2013. Correlaciones entre las clasificaciones geomecánicas Q y RMR en el túnel exploratorio de “la línea”, cordillera central de Colombia: Boletín Ciencias de la tierra, N° 34, pp 42-50. Medellín, diciembre de 2013. ISSN 0120-3630. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n34/n34a05.pdf>.
- Cruz, Y. 2004. Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea. Lima, Perú, Sociedad nacional de minería, petróleo y energía.
- Cruzado Peralta, PB. 2017. Evaluación Geomecánica del Túnel de la Central Hidroeléctrica Potrero – San Marcos – Cajamarca. Tesis Ing. Cajamarca, Perú, UNC.
- Dávila Burga, J. 2011. Diccionario geológico. INGEMMET. Lima, Perú, Arth Grounting S.A.C.
- Donaires. Matamoros, FV. 1977. Sostenimiento de Minas Subterráneas. Tesis Ing. Lima, Perú, UNI.
- Gavilanes, H; Andrade Haro, B. 2004. Introducción a la Ingeniería de Túneles: Caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos. Quito, Ecuador, Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME).
- González De Vallejo, LI. 2002. Ingeniería Geológica. Madrid, España, Prentice Hall.

- Grimstad, E; Barton, N. 2007. Cuarenta años con el sistema Q en Noruega y en el extranjero fortificando por medio Q sistemáticamente utilización Noruega. Recuperado de: <http://nff.no/wp-content/uploads/2016/01/Barton-N.-and-Grimstad-E.-2014-Forty-years-with-the-Q-system-in-Norway-and-abroad.-Fjellsprengningsteknikk-NFF-Oslo-25p.pdf>
- Gutierrez Pelnador, V. 2015. Sostenimiento en minería subterránea: Sostenimiento con madera. Madrid, España, Ingeoexpert.
- Hernández Sampieri, R. 2010. Metodología de la Investigación Científica: Diseños con hipótesis explicativas. Lima, Perú, UDEGRAF SA.
- Hoek, E; Carranza Torres, C; Corkum, B. 2002. El Criterio de Rotura de Hoek-Brown.
- Hoek, E; Marinos, P. 2000. GSI: Una confiable herramienta geológica para la estimación de la resistencia del macizo rocoso. Canadá.
- Hoek, E; Brown, E. 1985. Excavaciones subterráneas en rocas. Mexico, McGraw-Hill.
- Lazaro Maguiña, JE. 2018. Geomecánica aplicada al diseño del sostenimiento para mejorar la estabilidad de las labores mineras en la Mina Caridad de Compañía Minera Lincuna S.A. – 2017. Tesis Ing. Huaraz, Perú, UNASAM.
- López Jimeno, C. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas. Tomo II. Madrid, España, Gráficas Arias Montano, S.A.
- Montoya Toroverero, FR. 2018. Relacion geotécnica y litomorfoestructural del túnel de la Mina Paredones Nivel 5 San Pablo - Cajamarca. Tesis M.Cs. Cajamarca, Perú, UNC.
- OSINERGMIN. 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores mineras. Magdalena del mar, Lima, Peru, INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Padua Fernández, R., Rivera Constantino, R., y Marengo Mogollón, H. 2011. Diseño geotécnico del túnel de desfogue del proyecto hidroeléctrico La Yesca, México. Geotechnical Conference. Recuperado de: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper816.pdf>
- Quispe Martos, KA. 2018. Evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del NV.720, Sociedad Minera Corona S.A. Tesis Ing. Huancayo, Perú, Universidad Continental.

- Ramírez , P; De La Cuadra Irizar, L; Laín Huerta, R; Grijalbo Obeso, E. 2008. Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea. Instituto geológico y minero de España.
- Reyes Rivera, L. 1980. Boletín N° 31 Serie A. Carta geológica Nacional: Geología de los cuadrángulos de Cajamarca (15-f), San Marcos (15-g) y Cajabamba (16-g) . Lima, Peru, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Sheorey, P. 1994. Teoría de tensiones in situ en rocas isotrópicas y transversalmente isotrópicas: Revista internacional de mecánica de rocas y ciencia en minería y geomecánica abstracta, 31(1). págs. 23 - 34. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906294923124?via%3Dihub>.
- Veyrat, S; Galera, JM; Ibarra, G; Menchero, C; Rojas, F. 2014. Análisis tenso-deformacional y diseño de fortificación para una explotación de cobre por sublevel stopping. Atacama Kozan (Chile). 1er. Congreso Internacional de Diseño de Mina por Métodos, N° 24. Santiago, Chile.

ANEXOS

- A. DATOS GEOMECÁNICOS DE CAMPO.
- B. PLANOS.

ANEXO A
DATOS GEOMECÁNICOS DE CAMPO

Tabla 4.20. Información de la estación geomecánica 1.

REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO						TESIS	COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA.										TENSIONES		Subterráneo							
E-1						UBICACIÓN	NIVEL 3	Parametros		valores																
CÓDIGO	RESPONSABLE					TRAMO	DE	Pl. + 00 m.		A		Pl. + 20 m.		Profundida (m.)	7											
SISTEMA	WGS		84	ZONA 17S		HOJA N°	1	COORDENADAS	Emboquille	ESTE (m.)	741177.00	NORTE (m.)	9204036.00	COTA (msnm.)	1090.00	01 (Mpa.)	0.17	0	0.65							
EJECUTADO POR	Brayan Augusto Benel Rivera										FECHA		8/2/2019													
DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN						MACIZO ROCOSO						PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS														
DIS. Nro	FORMA DE EXCAVACIÓN		OPCION	LITOLÓGIA FORMAC.	METEORIZACION	GRADO FRACT.	GSI	TIPOS	RESIST. COMP. UNIAX.	RQD TRAMO	ORIENTACION	ESPACIADO(m)	PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELLENO	ALTERAC. METEOR.	AGUA	CALIDAD DE INFORMACION							
	1= Baul	2= Circular	3= Herradura	4= Cuadrada	5= Rectangular	6= Eliptica	7= Irregular	E=Estratificada o Seudo	D=Diaclasa	ND	DIRECCION	1=>2	1=<1	1= Nada	1=Muy Rug.	TIPO	DUREZA	1=Inalterada	1=Seco							
	HASTIA L DER. (m.)	APICE MAYO R (m.)	HASTIA LIZQ. (m.)	ANCHO DE CAMARA	CUNET A (m.)	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-Regul.	Fn=F.Normal	L	2=2-0.6	2= 0.6-0.2	3= 0.1-1	3= 0.1-1	3=Lig. Rug.	1=Arcilloso	1=Ninguna	1=Inalterada	1=Seco							
	1.80	2.30	2.15	2.26	0.20	2=Lev. Met.	2=Mediano	2=Bloq-Irreg.	Fi=F.Inversa	A	3= 0.6-0.2	4= 0.2-0.06	4= 10-20	4= 1-5	4=Ondulad.-lisa	2=Rugosa	3=Calcita	3=Duro>5mm	2=Lig. Alt.							
						3=Mod	3=Bajo	3=Bloq-Capas	Fd=F.Directa	A	4= 0.2-0.06	5= <0.06	5= >20	5= >5	5=Suave	3=Mod. Alt.	3=Duro>5mm	4=Muy Alt.	2=Humedo							
						4=Alt. Met.	4=Fract-Intenso	mf=Microfalla	Prom. Golpes	A	5= >20					5=Roca Tritur.	5=Suave>5mm	5=Descomp.	3=Lec. Proy.							
						5=Compl.	Agregar MB,B,M,P,MP	SE=Sobrees.	C=Contacto	A	Z/R	DIP	DD	COMPOBACION		6=Bx										
									3 Golp	Yp	71.74					7=Panizo										
																8=Veta										
																9=Epsonta										
1						Roca andesita	2	2	2		E	215	35	315	V		4	2	4	3	5	3	2	2	1	
2												210	32	300	V											
3												232	28	322	V											
4												225	24	315	V											
5												218	26	308	V											
6												230	30	320	V											
7												216	38	306	V											
8												220	35	310	V											
9												218	31	308	V											
10												226	36	316	V											
11												231	38	321	V											
12												229	37	319	V											
13												233	39	323	V											
14											D-1	134	57	224	V											
15												125	54	215	V		3	1	2	4	4	3	2	2	1	
16												133	52	223	V											
17												130	50	220	V											
18												123	48	210	V											
19												131	53	221	V											
20												128	56	218	V											
21												120	49	210	V											
22												124	52	214	V											
23												132	50	222	V											
24												126	47	216	V											
25												131	50	221	V											
26											D-2	5	70	95	V		3	2	4	3	5	3	2	2	1	
27												10	65	100	V											
28												8	62	98	V											
29												12	61	102	V											
30												7	68	97	V											
31												9	59	99	V											
32												11	73	101	V											
33												9	72	99	V											
34												10	75	100	V											
35												15	60	105	V											
36												12	64	102	V											
37												13	67	103	V											
38												8	62	98	V											
39												12	71	102	V											
40												8	76	98	V											
41												10	60	100	V											
42												16	72	106	V											

Diseño Original: M.Sc. Victor Tolentino

Diseño Modificado: Reinaldo Rodriguez - 2017

Diseño Final: Franklin Montoya Toroverero - 2019

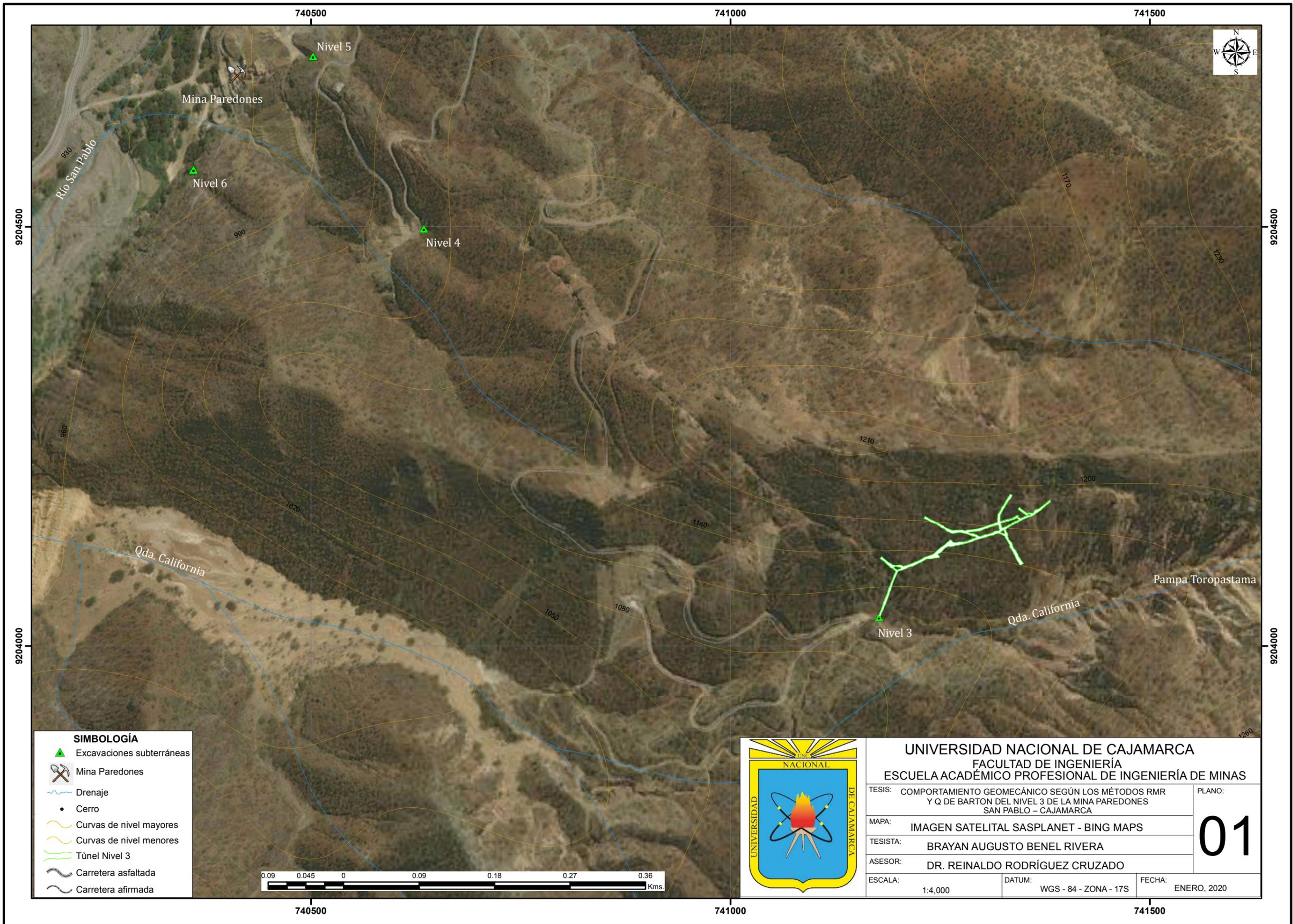
Tabla 4.22. Información de la estación geomecánica 3.

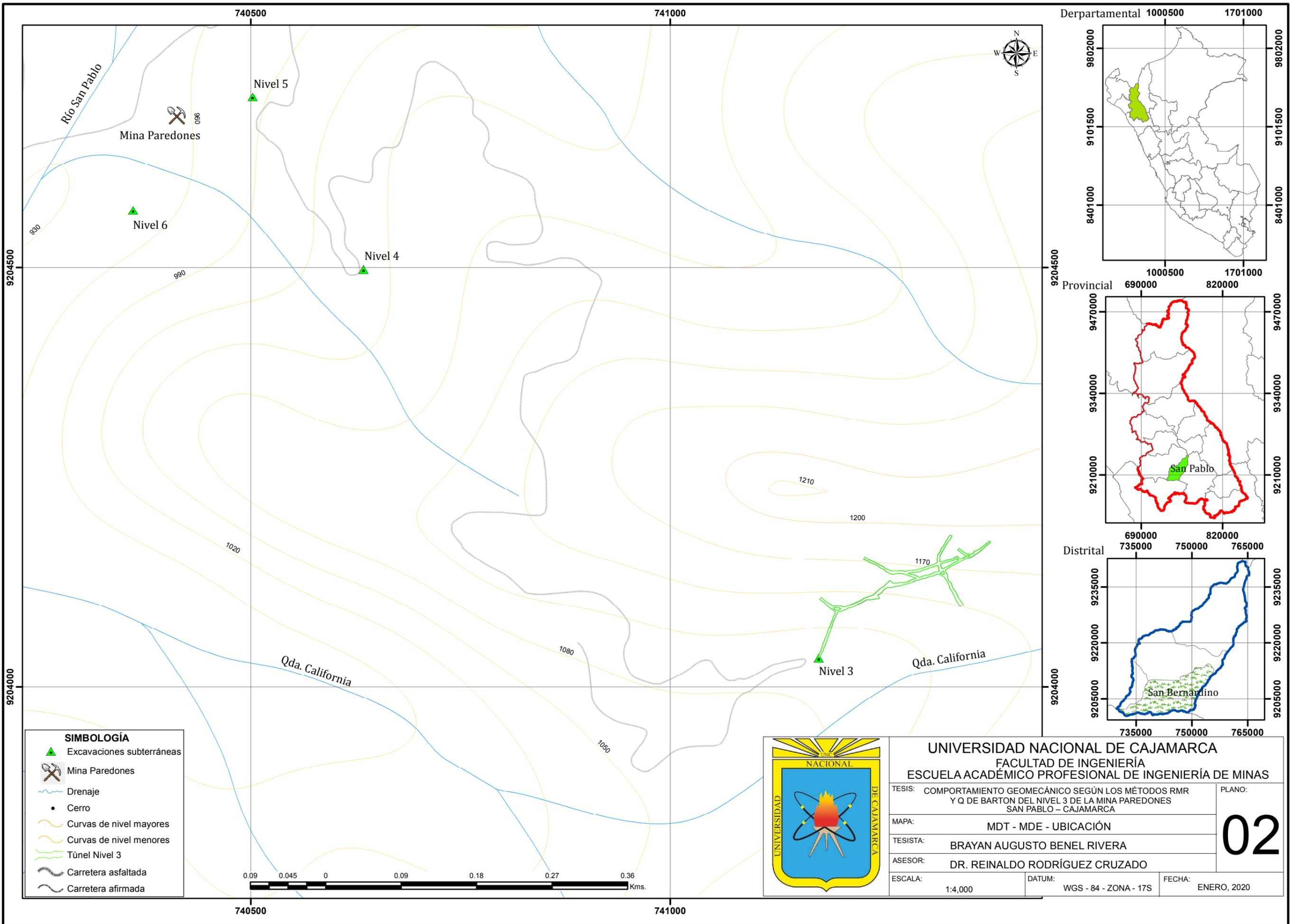
REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO						TESIS	COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA.										TENSIONES		Subterráneo																					
UBICACIÓN						NIVEL 3										Parametros	valores																							
CÓDIGO	E-3					TRAMO	1	DE	PI. + 70 m.	A	PI. + 109 m.	NORTE (m.)	COTA (msnm.)	8/2/2019	O1 (Mpa.)	0.83	Ø	0.57																						
RESPONSABLE	Brayan Augusto Benel Rivera					HOJA N°	1	COORDENADAS	ESTE (m.)	NORTE (m.)	COTA (msnm.)	8/2/2019	O3 (Mpa.)	0.47	m	0.57																								
SISTEMA	WGS	84	ZONA 17S	EJECUTADO POR	Brayan Augusto Benel Rivera																																			
DIS. Nro	DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN					MACIZO ROCOSO					PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS																													
	FORMA DE EXCAVACIÓN		OPCION			LITOLÓGIA FORMAC.	METEORIZACIÓN	GRADO FRACT.	GSI	TIPOS	RESIST. COMP. UNIAX.	RQD TRAMO	ORIENTACIÓN	ESPACIADO(m)	PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELLENO	ALTERAC. METEOR.	AGUA	CALIDAD DE INFORMACIÓN																			
	1= Baul	2= Circular	3= Herradura	4= Cuadrada	5= Rectangular																	6= Elíptica	7= Irregular	E=Estratificada o Seudo	D=Diaclasa	σ _{Ci}	ND	18	DIRECCIÓN	1=>2	1=<1	1= Nada	1=Muy Rug.	1=Arcilloso	1=Ninguna	1=Inalterada	1=Seco	1=Lec. Real		
	2= Lev. Met.	2=Mediano	2=Bloq-Irreg.	Fr=F.Normal	L																	1.5	2=>2.0-6	2=<1-3	2=<0.1	2=Rugosa	2=Qz	2=Duro<5mm		2=Lig. Alt.	2=Humedo	2=Lec. Apar.								
	3= Mod	3=Bajo	3=Bloq-Capas	Fr=F.Inversa	A																	12.00	3=0.6-0.2	3= 3-10	3= 0.1-1	3=Lig. Rug.	3=Calcita	3=Duro>5mm		3=Mod. Alt.	3=Mojado	3=Lec. Proy.								
	4= Alt. Met.	4=Fract-Intenso	mf=Microfalla	Prom. Golpes	Y _p																	66.26	4=0.2-0.06	4= 10-20	4= 1-5	4=Ondulad.-lisa	4=Óxidos	4=Suave<5mm		4=Muy Alt.	4=Goteo									
	5= Compl.	Agregar MB,B,M,P,MP	SE=Sobrees.	C=Contacto	Z/R																	DIP	DD	COMPOBACION	5=<0.06	5=>20	5=>5	5=Suave		5=Suave>5mm	5=Descomp.	5=Flujo								
	HASTIA L DER. (m.)	APICE MAYO R (m.)	HASTIA LIZQ. (m.)	ANCHO DE CÁMARA	CUNET A (m.)																	Roca andesita	3	1	2	E	210	33		300	V	4	2	3	3	9	3	3	2	1
	4.00	4.35	4.20	2.20	0.20																						205	30		295	V									
																											202	26		292	V									
																										200	28	290		V										
										212	31	302	V																											
										215	36	305	V																											
										218	25	308	V																											
										206	29	296	V																											
										209	24	299	V																											
										212	32	302	V																											
										207	25	297	V																											
										211	33	301	V																											
										208	31	308	V																											
										209	28	299	V																											
										213	27	303	V																											
										103	70	193	V	4	1	2	3	9	4	3	2	1																		
										102	63	192	V																											
										104	61	194	V																											
										110	65	200	V																											
										112	61	202	V																											
										100	60	190	V																											
										103	73	193	V																											
										101	62	191	V																											
										108	65	198	V																											
										110	64	200	V																											
										109	70	199	V																											
										102	68	192	V																											
										105	64	195	V																											
										310	33	109	F	4	1	2	4	4	3	2	2	1																		
										305	46	35	V																											
										308	30	38	V																											
										312	24	42	V																											
										301	38	31	V																											
										306	44	36	V																											
										304	40	34	V																											
										309	39	39	V																											
										311	35	41	V																											
										308	41	38	V																											
										303	33	33	V																											
										307	48	37	V																											
										302	35	32	V																											
										308	43	38	V																											
										64																														

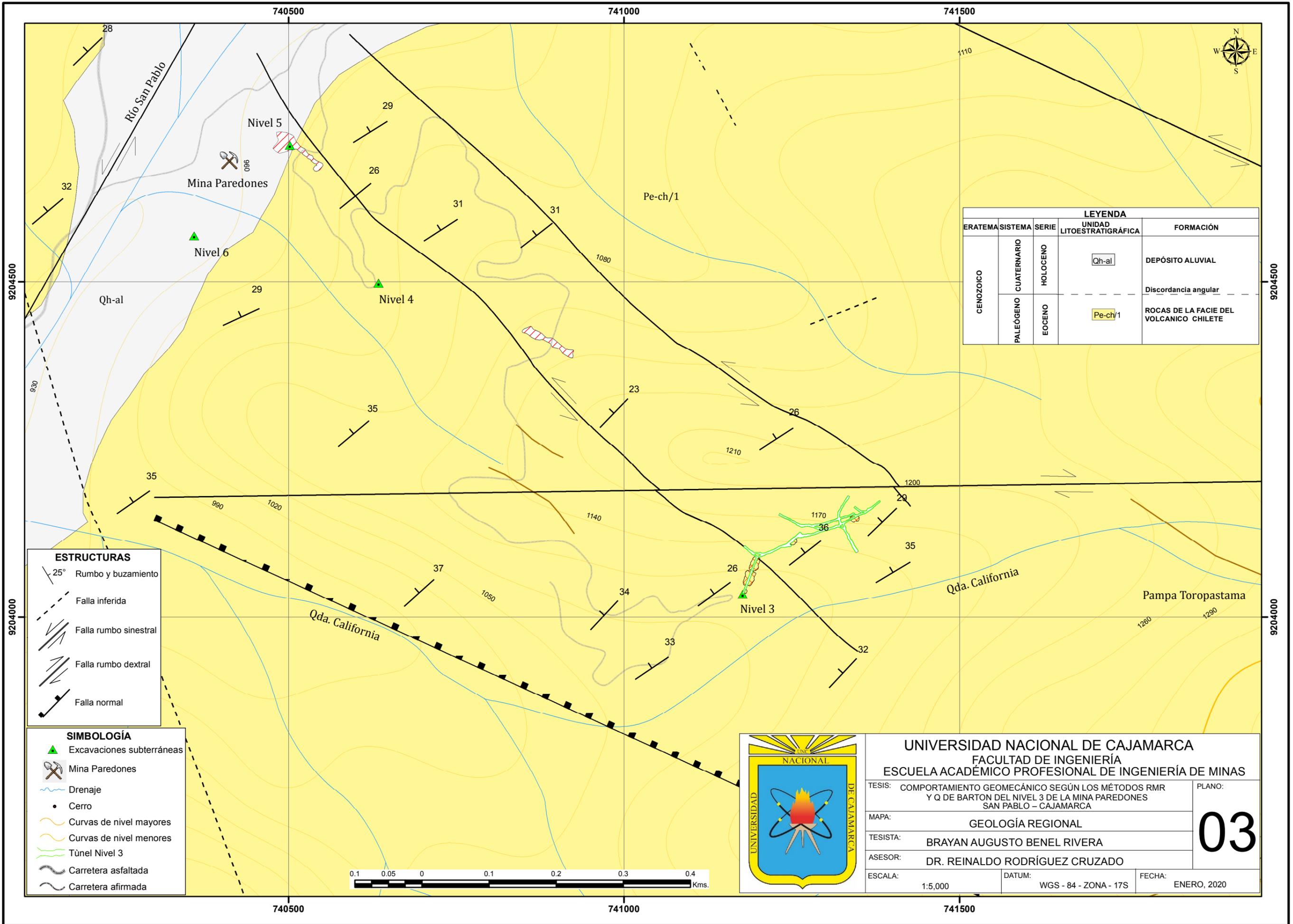
Tabla 4.23. Información de la estación geomecánica 4.

REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO						TESIS	COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA.										TENSIONES		Subterráneo								
UBICACIÓN						NIVEL 3	Parametros		valores																		
CÓDIGO	E-4					TRAMO	1		DE	Pl. + 190 m.		A		Pl. + 200 m.		Profundidad (m.)	69										
RESPONSABLE	Brayan Augusto Benel Rivera					HOJA N°	1		COORDENADAS	ESTE (m.)		NORTE (m.)		COTA (msnm.)		Ø1 (Mpa.)	1.64										
SISTEMA	WGS		84		ZONA 17S	EJECUTADO POR	Brayan Augusto Benel Rivera										FECHA	8/2/2019		Ø3 (Mpa.)	0.91		m	0.55			
DIS. Nro	DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN					MACIZO ROCOSO				PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS																	
	FORMA DE EXCAVACIÓN		OPCION			LITOLÓGIA FORMAC.	METEORIZACIÓN	GRADO FRACT.	GSI	TIPOS	RESIST. COMP. UNIAX.	RQD TRAMO		ORIENTACIÓN		ESPACIADO(m)	PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELLENO		ALTERAC. METEOR.	AGUA	CALIDAD DE INFORMACIÓN			
1= Baul					5		1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-Regul.	E=Estratificada o Seudo	σ _{Ci}	ND	DIRECCIÓN		1=>2	1=<1	1= Nada	1=Muy Rug.	TIPO	DUREZA	1=Inalterada	1=Seco	1=Lec. Real				
2= Circular						2=Lev. Met.	2=Mediano	2=Bloq-Irreg.	D=Diadisa	L		13	D-1		2= 2.0-0.6	2= 1-3	2= <0.1	2=Rugosa	2=Qz	2=Duro>5mm	2=Lig. Alt.	2=Humedo	2=Lec. Apar.				
3= Herradura					3=Mod	3=Bajo	3=Bloq-Capas	Fi=F. Inversa	A		8.67		D-2		3= 0.6-0.2	3= 3-10	3= 0.1-1	3=Lig. Rug.	3=Calcita	3=Duro>5mm	3=Mod. Alt.	3=Mojado	3=Lec. Proy.				
4= Cuadrada					4=Alt. Met.	4=Fract-Intenso	Mf=Microfalla	Fd=F. Directa		Y _p		78.47	D-3		4= 0.2-0.06	4= 10-20	4= 1-5	4=Ondulad.-lisa	4=Óxidos	4=Suave<5mm	4=Muy Alt.	4=Goteo					
5= Rectangular					5=Compl.	Agregar MB,B,M,P,MP	Se=Sobrees.	C=Contacto	D-4		D-5		5= <0.06	5= >20	5= >5	5=Suave	5=Roca Tritur.	5=Suave>5mm	5=Descomp.	5=Flujo							
6= Elíptica											Z/R	DIP	DD	COMPOBACION													
7= Irregular																											
HASTIA L DER. (m.)	APICE MAYO R (m.)	HASTIA L IZQ. (m.)	ANCHO DE CÁMARA	CUNET A (m.)																							
1	2.00	2.10	2.20	5.60	0.20	Roca andesita	3	2	2	E				290	21	20	V		3	1	2	2	Galena, yeso	2-5.	2	2	1
2														293	19	23	V										
3														285	15	15	V										
4														282	32	12	V										
5														286	25	16	V										
6														278	26	8	V										
7														296	30	26	V										
8														280	28	10	V										
9														285	30	15	V										
10														279	28	9	V										
11														289	27	19	V										
12														286	31	16	V										
13														294	32	24	V										
14														284	29	14	V										
15														279	22	9	V										
16														88	74	178	V										
17														72	73	162	V										
18														85	70	175	V										
19														70	68	160	V										
20														81	71	171	V										
21														89	65	179	V										
22														76	68	166	V										
23														78	69	168	V										
24														84	70	174	V										
25														78	72	168	V										
26														83	75	173	V										
27														84	74	174	V										
28														78	65	168	V										
29														19	74	109	V										
30														15	76	105	V										
31														13	70	103	V										
32														10	73	100	V										
33														12	74	102	V										
34														16	78	106	V										
35														11	73	101	V										
36														14	70	104	V										
37														9	68	99	V										
38														18	69	108	V										
39														23	75	113	V										
40														14	70	104	V										
41														18	67	108	V										
42														16	74	106	V										
						Túnel								57													

ANEXO B
PLANOS







LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	FORMACIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Qh-al	DEPÓSITO ALUVIAL
			- - - - -	Discordancia angular
	PALEÓGENO	Eoceno	Pe-ch/1	ROCAS DE LA FACIE DEL VOLCÁNICO CHILETE

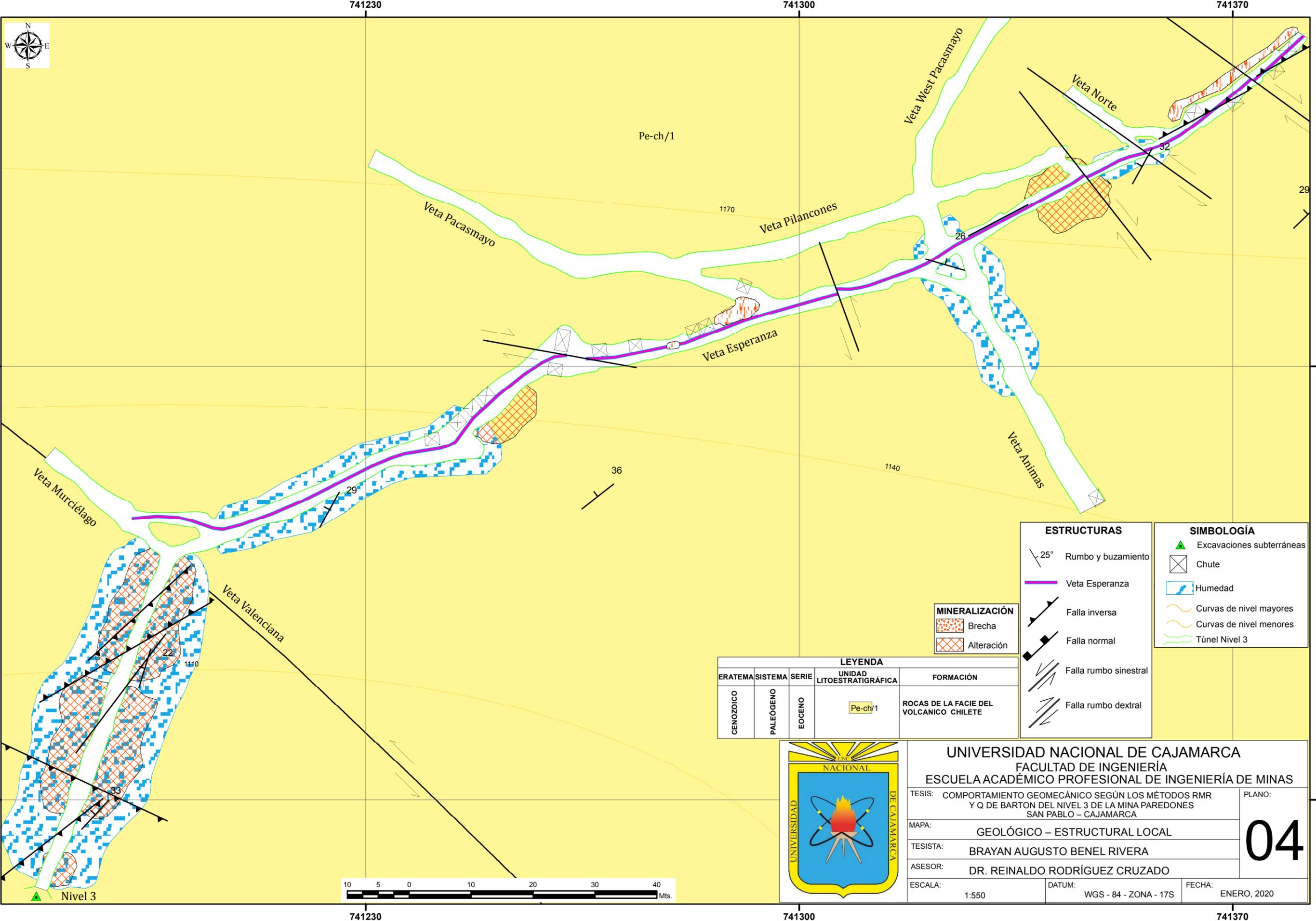
ESTRUCTURAS	
	25° Rumbo y buzamiento
	Falla inferida
	Falla rumbo sinistral
	Falla rumbo dextral
	Falla normal

SIMBOLOGÍA	
	Excavaciones subterráneas
	Mina Paredones
	Drenaje
	Cerro
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel Nivel 3
	Carretera asfaltada
	Carretera afirmada



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

TESIS: COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO - CAJAMARCA		PLANO:
MAPA: GEOLOGÍA REGIONAL		03
TESISTA: BRAYAN AUGUSTO BENEL RIVERA		
ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO		
ESCALA: 1:5,000	DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S	FECHA: ENERO, 2020



MINERALIZACIÓN	
	Brecha
	Alteración

ESTRUCTURAS	
	25° Rumbo y buzamiento
	Veta Esperanza
	Falla inversa
	Falla normal
	Falla rumbo sinistral
	Falla rumbo dextral

SIMBOLOGÍA	
	Excavaciones subterráneas
	Chute
	Humedad
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel Nivel 3

LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	FORMACIÓN
GENOZOICO	PALEOGENO	EOCENO	Pe-ch/1	ROCAS DE LA FACIE DEL VOLCANICO CHILETE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS	
TESIS: COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA	PLANO: 04
MAPA: GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL LOCAL	
TESISTA: BRAYAN AUGUSTO BENEL RIVERA	
ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
ESCALA: 1:550	DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S
	FECHA: ENERO, 2020





Estación 4									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	φ°	s	a	D
Andesita	56.38	78.47	64	26.16	0.660	59.34	0.0020	0.503	0.80
Veta Esperanza	215	75	70	-	4.806	67.66	0.0498	0.501	0.00

Estación 5									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	φ°	s	a	D
Andesita	117.22	63.87	54	6.39	0.564	54.28	0.0004	0.506	0.80
Veta Esperanza	215	75	70	-	4.806	67.66	0.0498	0.501	0.00

Estación 3									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	φ°	s	a	D
Andesita	86.30	66.26	47	5.52	0.311	59.94	0.0004	0.510	0.50
Veta Esperanza	215	75	70	-	4.806	67.66	0.0498	0.501	0.00

Estación 2									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	φ°	s	a	D
Andesita	165.20	71.74	55	2.10	0.301	69.40	0.0005	0.506	0.80
Filica	36.51	48.88	33	0.36	0.040	36.86	0.000018	0.506	0.80

Estación 1									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	φ°	s	a	D
Andesita	165.20	71.74	55	0.301	69.40	0.0005	0.506	0.80	0.80

LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	FORMACIÓN
GENOZOICO	PALEÓGENO	EOCENO	Pe-ch/1	ROCAS DE LA FACIE DEL VOLCANICO CHILETE

- ESTRUCTURAS**
- 25° Rumbo y buzamiento
 - Veta Esperanza
 - Falla inversa
 - Falla normal
 - Falla rumbo sinistral
 - Falla rumbo dextral

- SIMBOLOGÍA**
- ★ Estación geomecánica
 - ▲ Excavaciones subterráneas
 - ⊠ Chute
 - ☒ Humedad
 - ~ Curvas de nivel mayores
 - ~ Curvas de nivel menores
 - Túnel Nivel 3

- MINERALIZACIÓN**
- Brecha
 - Alteración



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

TESIS: COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA

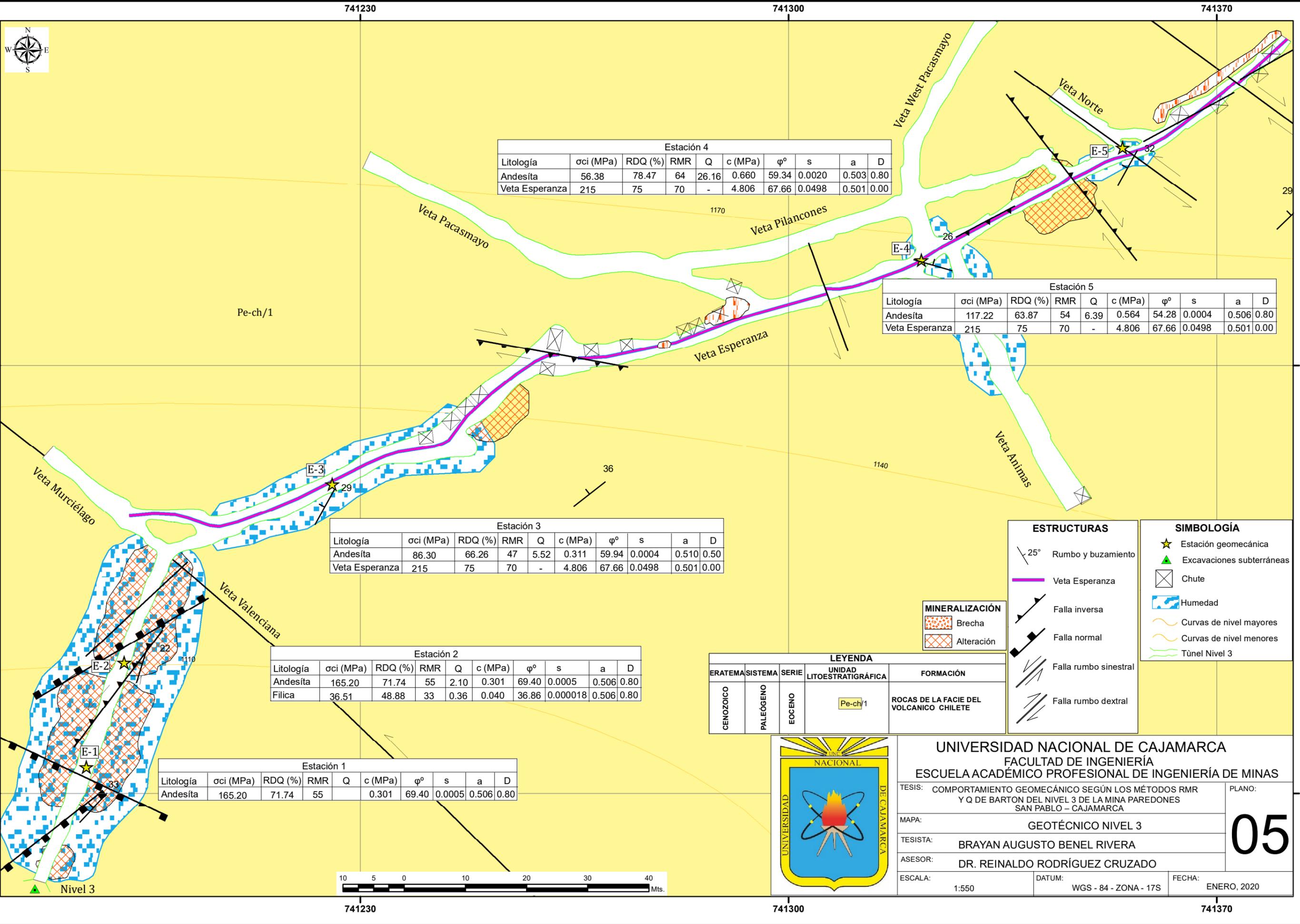
MAPA: **GEOTÉCNICO NIVEL 3**

TESISTA: **BRAYAN AUGUSTO BENEL RIVERA**

ASESOR: **DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

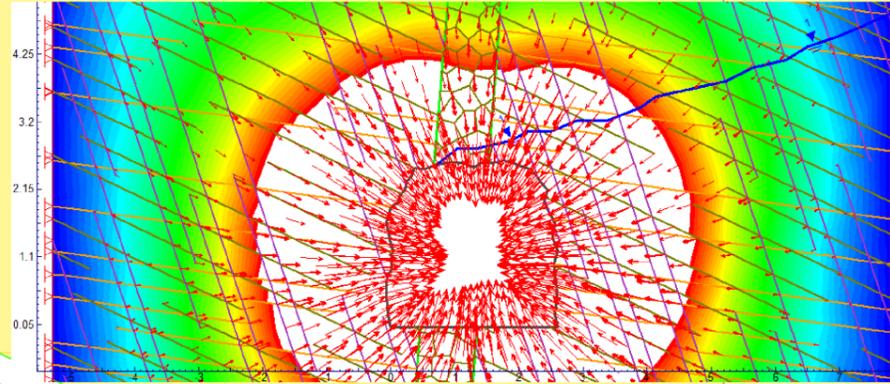
ESCALA: 1:550 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: ENERO, 2020

PLANO: 05

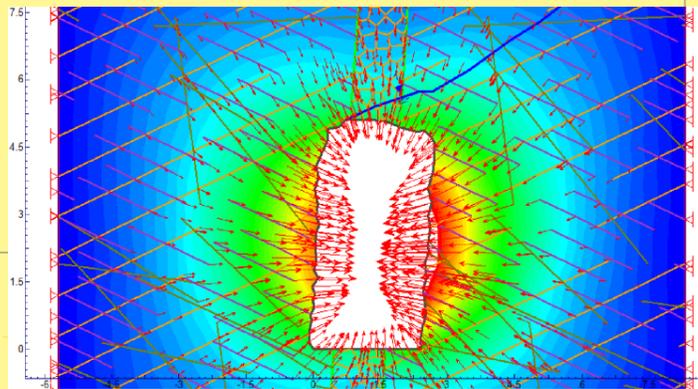




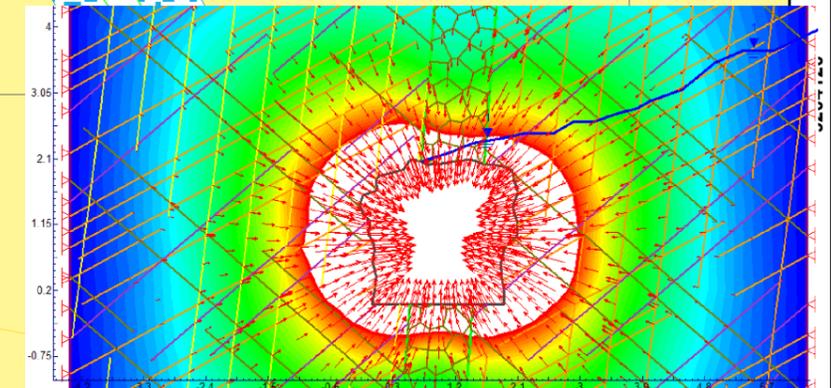
Estación 4				
σ_1 (MPa.)	σ_3 (MPa.)	m	Em(GPa.)	H (m.)
1.64	0.91	0.55	7.102	69.00



Estación 3				
σ_1 (MPa.)	σ_3 (MPa.)	m	Em(GPa.)	H (m.)
0.83	0.47	0.57	3.000	30.00

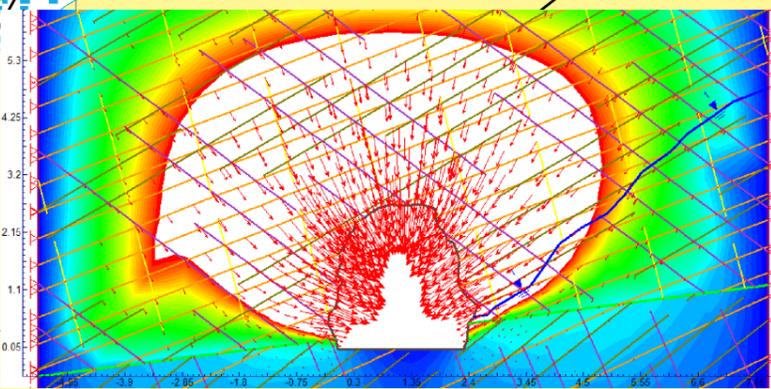


Estación 5				
σ_1 (MPa.)	σ_3 (MPa.)	m	Em(GPa.)	H (m.)
2.00	1.07	0.54	3.823	84.00

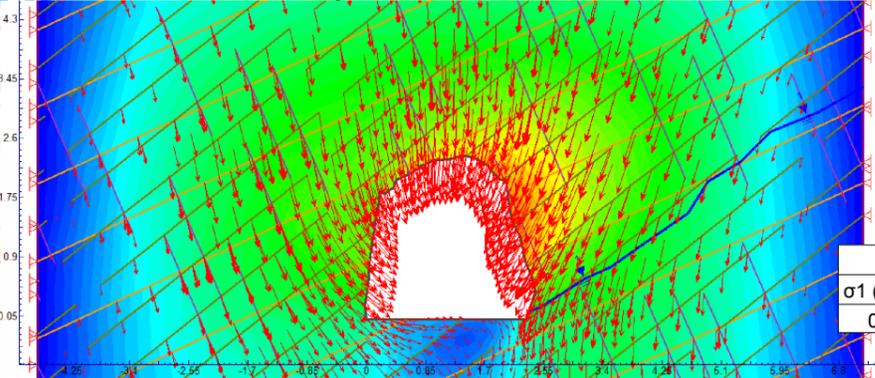


Desplazamientos máximos - zona plástica	
Estación	Desplazamientos totales máximos (m.)
E-1	0.00010
E-2	0.02990
E-3	0.01105
E-4	0.00893
E-5	0.02299

Estación 2				
σ_1 (MPa.)	σ_3 (MPa.)	m	Em(GPa.)	H (m.)
0.28	0.14	0.50	0.570	15.00



Estación 1				
σ_1 (MPa.)	σ_3 (MPa.)	m	Em(GPa.)	H (m.)
0.17	0.11	0.65	6.350	7.00



MINERALIZACIÓN	
	Brecha
	Alteración

LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	FORMACIÓN
GENOZOICO	PALEOGENO	EOCENO	Pe-ch/1	ROCAS DE LA FACIE DEL VOLCANICO CHILETE

ESTRUCTURAS	
	25° Rumbo y buzamiento
	Veta Esperanza
	Falla inversa
	Falla normal
	Falla rumbo sinistral
	Falla rumbo dextral

SIMBOLOGÍA	
	Estación geomecánica
	Excavaciones subterráneas
	Chute
	Humedad
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel Nivel 3



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

TESIS: COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA

MAPA: TENSO-DEFORMACIONAL

TESISTA: BRAYAN AUGUSTO BENEL RIVERA

ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

ESCALA: 1:550 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: ENERO, 2020

PLANO: **06**





741230 741300 741370

Estación 4									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	ϕ°	s	a	D
Andesita	56.38	78.47	64	26.16	0.660	59.34	0.0020	0.503	0.80
Veta Esperanza	215	75	70	-	4.806	67.66	0.0498	0.501	0.00

Estación 5									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	ϕ°	s	a	D
Andesita	117.22	63.87	54	6.39	0.564	54.28	0.0004	0.506	0.80
Veta Esperanza	215	75	70	-	4.806	67.66	0.0498	0.501	0.00

Estación 3									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	ϕ°	s	a	D
Andesita	86.30	66.26	47	5.52	0.311	59.94	0.0004	0.510	0.50
Veta Esperanza	215	75	70	-	4.806	67.66	0.0498	0.501	0.00

Estación 2									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	ϕ°	s	a	D
Andesita	165.20	71.74	55	2.10	0.301	69.40	0.0005	0.506	0.80
Filica	36.51	48.88	33	0.36	0.040	36.86	0.000018	0.506	0.80

Estación 1									
Litología	σ_{ci} (MPa)	RDQ (%)	RMR	Q	c (MPa)	ϕ°	s	a	D
Andesita	165.20	71.74	55	0.301	69.40	0.0005	0.506	0.80	

MINERALIZACIÓN	
	Brecha
	Alteración

LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	FORMACIÓN
GENOZOICO	PALEOGENO	EOCENO	Pe-ch/1	ROCAS DE LA FACIE DEL VOLCANICO CHILETE

ESTRUCTURAS	
	25° Rumbo y buzamiento
	Veta Esperanza
	Falla inversa
	Falla normal
	Falla rumbo sinistral
	Falla rumbo dextral

SIMBOLOGÍA	
	Estación geomecánica
	Excavaciones subterráneas
	Chute
	Humedad
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel Nivel 3

ZONAS DE INESTABILIDAD		
CATEGORÍA	ZONA	
I		Altamente peligrosa
II		Peligrosa
III		Moderadamente peligrosa



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

TESIS: COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTÓN DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO - CAJAMARCA

MAPA: ZONIFICACIÓN DE INESTABILIDADES CRÍTICAS

TESISTA: BRAYAN AUGUSTO BENEL RIVERA

ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

ESCALA: 1:550 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: ENERO, 2019



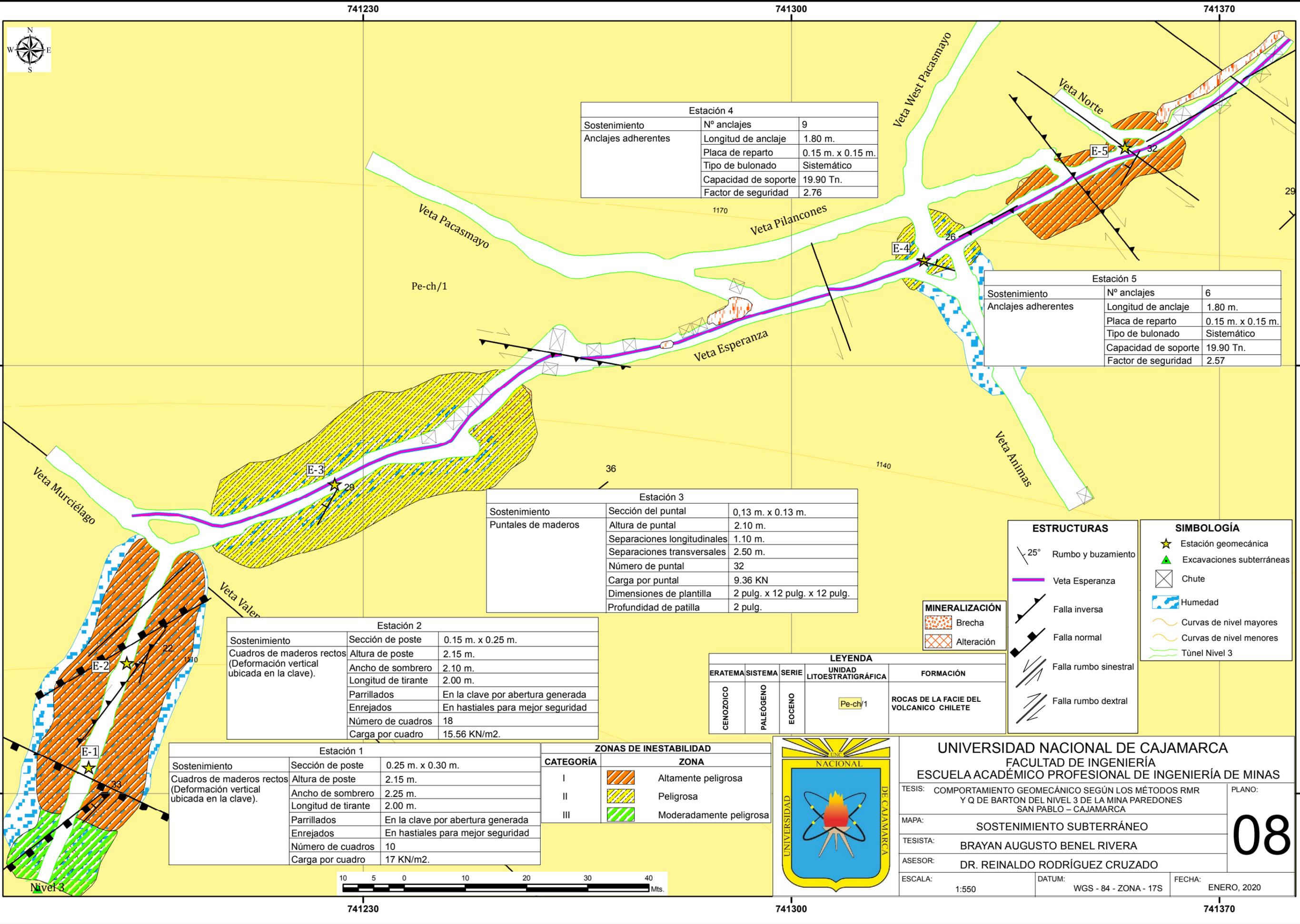
741230 741300 741370

9204120

9204120

9204050

9204050



Estación 4		
Sostenimiento	Nº anclajes	9
Anclajes adherentes	Longitud de anclaje	1.80 m.
	Placa de reparto	0.15 m. x 0.15 m.
	Tipo de bulonado	Sistemático
	Capacidad de soporte	19.90 Tn.
	Factor de seguridad	2.76

Estación 5		
Sostenimiento	Nº anclajes	6
Anclajes adherentes	Longitud de anclaje	1.80 m.
	Placa de reparto	0.15 m. x 0.15 m.
	Tipo de bulonado	Sistemático
	Capacidad de soporte	19.90 Tn.
	Factor de seguridad	2.57

Estación 3		
Sostenimiento	Sección del puntal	0,13 m. x 0,13 m.
Puntales de maderos	Altura de puntal	2.10 m.
	Separaciones longitudinales	1.10 m.
	Separaciones transversales	2.50 m.
	Número de puntal	32
	Carga por puntal	9.36 KN
	Dimensiones de plantilla	2 pulg. x 12 pulg. x 12 pulg.
	Profundidad de patilla	2 pulg.

Estación 2		
Sostenimiento	Sección de poste	0.15 m. x 0.25 m.
Cuadros de maderos rectos (Deformación vertical ubicada en la clave).	Altura de poste	2.15 m.
	Ancho de sombrero	2.10 m.
	Longitud de tirante	2.00 m.
	Parrillados	En la clave por abertura generada
	Enrejados	En hastiales para mejor seguridad
	Número de cuadros	18
	Carga por cuadro	15.56 KN/m2.

Estación 1		
Sostenimiento	Sección de poste	0.25 m. x 0.30 m.
Cuadros de maderos rectos (Deformación vertical ubicada en la clave).	Altura de poste	2.15 m.
	Ancho de sombrero	2.25 m.
	Longitud de tirante	2.00 m.
	Parrillados	En la clave por abertura generada
	Enrejados	En hastiales para mejor seguridad
	Número de cuadros	10
Carga por cuadro	17 KN/m2.	

ZONAS DE INESTABILIDAD	
CATEGORÍA	ZONA
I	Altamente peligrosa
II	Peligrosa
III	Moderadamente peligrosa

LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	FORMACIÓN
GENOZOICO	PALEOGENO	EOCENO	Pe-ch/1	ROCAS DE LA FACIE DEL VOLCANICO CHILETE

ESTRUCTURAS	
	25° Rumbo y buzamiento
	Veta Esperanza
	Falla inversa
	Falla normal
	Falla rumbo sinistral
	Falla rumbo dextral

SIMBOLOGÍA	
	Estación geomecánica
	Excavaciones subterráneas
	Chute
	Humedad
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel Nivel 3

MINERALIZACIÓN	
	Brecha
	Alteración



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

TESIS: COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO SEGÚN LOS MÉTODOS RMR Y Q DE BARTON DEL NIVEL 3 DE LA MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA

MAPA: **SOSTENIMIENTO SUBTERRÁNEO**

TESISTA: **BRAYAN AUGUSTO BENEL RIVERA**

ASESOR: **DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

ESCALA: 1:550 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: ENERO, 2020

08

