

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



TESIS

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL
TUNEL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN
LAMBAYEQUE**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

JUAN LUIS RONCAL BAZÁN

ASESOR

DR. SEGUNDO REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

CAJAMARCA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por darme el ser y la sabiduría; quien nos ayuda a salir adelante en todo momento y en especial en los tiempos más difíciles.

A mi madre María Alejandrina por sus consejos y apoyo a lo largo de toda mi vida, que contribuyeron en formar mi autoestima, carácter, coraje y valores.

A mi pareja Mayra que, con su amor, incondicionalidad y comprensión, y pese a todas las dificultades que pasamos me apoyó para poder desarrollarme profesionalmente.

A mis hijos Luis Alejandro y Victoria Fabiana, quienes son motivo para dar lo mejor de mi cada día.

Roncal Bazán, Juan Luis

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Cajamarca, a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, a los docentes por su dedicación y brindarnos el conocimiento necesario para formarnos tanto como personas y profesionales para este mundo competitivo.

Y en especial al Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado, por su asesoramiento, consejos y mejoras para la realización de la tesis; así como por su guía para ser un excelente profesional.

Roncal Bazán, Juan Luis

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
LISTA DE ABREVIATURAS	vi
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
ANEXOS	x
LISTA DE PLANOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
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	5
2.2.1 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA	5
2.2.1.1 ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA (RQD)	5
2.2.1.2 ROCK MASS RATING (RMR)	7
2.2.1.3 SISTEMA Q DE BARTON	7
2.2.2. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS	10
2.2.2.1 ESTRUCTURAS MAYORES	10
2.2.2.2 ESTRUCTURAS MENORES	11
2.2.3 CRITERIOS DE ROTURA EN ROCAS	11
2.2.3.1 CRITERIO DE HOEK – BROWN	11
2.2.3.2 CRITERIO MORH – COULOMB	12
2.2.4 SOSTENIMIENTO EN EXCAVACIONES	12
2.2.4.1 SOSTENIMIENTOS PASIVOS	12
2.2.4.2 SOSTENIMIENTOS ACTIVOS	13
2.2.4.3 TABLA DE SOPORTE PRÁCTICO MINERO	13

	Pág.
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	13
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1 UBICACIÓN	16
3.2 ACCESIBILIDAD	16
3.3 CLIMA.....	17
3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
3.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	17
3.4.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO	18
3.4.3. MUESTRA	18
3.4.4. UNIDADES DE ANÁLISIS	18
3.4.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	18
3.4.5.1 TRABAJO DE GABINETE	18
3.4.5.2 TRABAJO DE CAMPO	19
3.4.5.3 ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y REDACCIÓN DEL INFORME	20
3.4.6. RECURSOS MATERIALES.....	20
3.4.6.1 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	21
3.4.6.2 EQUIPOS DE MEDICIÓN	21
3.4.6.3 SOFTWARES.....	21
3.4.7. DEFINICIÓN DE VARIABLES	21
3.4.7.1 VARIABLE DEPENDIENTE.....	21
3.4.7.2 VARIABLES INDEPENDIENTES	21
3.5. HIDROLOGÍA	22
3.6. GEOLOGÍA REGIONAL.	23
3.7. GEOLOGÍA LOCAL.....	23
3.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	25
3.8.1 DOMINIO CENTRAL.....	25
3.8.2. DOMINIO OCCIDENTAL	26
3.8.3. ESTUDIO GEOMECÁNICO	26
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27
4.1. EVALUACIÓN GEOMECÁNICA.....	27
4.1.1. ANÁLISIS EN EL SOFTWARE ROCDATA	29
4.1.2. PRECIPITACIONES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	40

	Pág.
4.1.3. ANÁLISIS EN EL SOFTWARE RS2	44
4.2. PROPUESTA DE SOSTENIMIENTO	68
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	80
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
5.1. CONCLUSIONES.....	81
5.2. RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE ABREVIATURAS

WGS-84	:	World Geodetic System 1984.
UTM	:	Universal Transverse Mercator.
GPS	:	Sistema de posicionamiento global.
MDE	:	Modelo digital de elevaciones.
σ_{ci}	:	Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
$\sigma_{3m\acute{a}x}$:	Tensión de confinamiento.
σ_1	:	Esfuerzo principal mayor.
σ_3	:	Esfuerzo principal menor.
MPa	:	Mega Pascales
c	:	Cohesión.
φ	:	Ángulo de Fricción.
σ_n	:	Esfuerzo normal.
Ei	:	Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
Em	:	Módulo de deformación.
D	:	Factor de disturbancia.
Az.	:	Azimut.
Bz.	:	Buzamiento.
FS	:	Factor de Seguridad.
JRC	:	Índice de rugosidad de junta.
RQD	:	Índice de calidad de roca.
RMR	:	Valoración de la masa rocosa.
D	:	Dip.
DD	:	Dip Direction.
m	:	Metro.
msnm	:	Metros sobre el nivel del mar.
Km	:	Kilometro.
mm	:	Milímetro
cm	:	Centímetro
SPM	:	Soporte Práctico Minero.
ESR	:	Relación de sostenimiento de la excavación.
RS2	:	Software geomecánico Phase.
EG	:	Estación Geomecánica.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación geomecánica RQD	6
Tabla 2. Relación entre RQD y frecuencia lineal	6
Tabla 3. Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)	9
Tabla 4. Clasificación geomecánica Q de Barton	10
Tabla 5. Coordenadas de los extremos de túnel de Huallabamba.....	16
Tabla 6. Ruta de accesibilidad a la zona de estudio.....	16
Tabla 7. Estaciones Geomecánicas	27
Tabla 8. Valoración de macizos rocosos según RMR y Q de Barton.....	28
Tabla 9. Datos de entrada para el RocData	29
Tabla 10. Estación Meteorológica Cueva Blanca	41
Tabla 11. Precipitaciones 2017-2021. Estación Meteorológica Cueva Blanca	41
Tabla 12. Factor de transposición	41
Tabla 13. Precipitaciones 2017-2021. Túnel de Huallabamba.....	42
Tabla 14. Zona Sísmica, Motupe - Lambayeque	44
Tabla 15. Aceleración máxima por zonas.....	44
Tabla 16. Razón de esfuerzos	45
Tabla 17. Parámetros para sostenimiento	68
Tabla 18. Sostenimiento.....	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tabla de Soporte Práctico Minero (SPM)	13
Figura 2. Accesibilidad a Huallabamba.	17
Figura 3. A y B son afloramientos de rocas volcánicas andesíticas moderadamente meteorizadas, ubicadas en los flancos del canal de la Quebrada Totoras. C. Encauzamiento de la Quebrada Jarro, conformado por rocas intrusivas.....	22
Figura 4. A. Alineamientos de escarpas rocosos andesíticos, presentando coloraciones verduzcas a grises. B. Geomorfología superficial, donde se proyecta el eje túnel.....	23
Figura 5. A. Afloramiento de granodiorita moderadamente fracturada, con alto grado de fracturamiento y meteorización B. Lavas andesíticas moderadamente fracturada, con leves meteorizaciones en el macizo rocoso. C. Lavas andesíticas poco fracturada, ligeramente meteorizadas de color gris oscuro. D. Roca andesita pseudoestratificada, con ligeras meteorizaciones y fracturamientos en la roca.	24
Figura 6. Vista panorámica del flanco izquierdo de la Quebrada Totoras.	25
Figura 7. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 01. ..	30
Figura 8. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 02. ..	31
Figura 9. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 03. ..	32
Figura 10. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 04. ..	33
Figura 11. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 05. ..	34
Figura 12. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 06. ..	35
Figura 13. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 07. ..	36
Figura 14. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 08. ..	37
Figura 15. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 09. ..	38
Figura 16. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 10. ..	39
Figura 17. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 11. ..	40
Figura 18. Curvas de precipitación anual mensualizadas 2017 - 2021	43
Figura 19. Cálculo de los coeficientes sísmicos en Loadcap	44
Figura 20. EG 01. Distribución del esfuerzo principal mayor.	46

	Pág.
Figura 21. EG 01. Trayectoria de los desplazamientos totales.	47
Figura 22. EG 02. Distribución del esfuerzo principal mayor.	48
Figura 23. EG 02. Trayectoria de los desplazamientos totales.	49
Figura 24. EG 03. Distribución del esfuerzo principal mayor.	50
Figura 25. EG 03. Trayectoria de los desplazamientos totales.	51
Figura 26. EG 04. Distribución del esfuerzo principal mayor.	52
Figura 27. EG 04. Trayectoria de los desplazamientos totales.	53
Figura 28. EG 05. Distribución del esfuerzo principal mayor.	54
Figura 29. EG 05. Trayectoria de los desplazamientos totales.	55
Figura 30. EG 06. Distribución del esfuerzo principal mayor.	56
Figura 31. EG 06. Trayectoria de los desplazamientos totales.	57
Figura 32. EG 07. Distribución del esfuerzo principal mayor.	58
Figura 33. EG 07. Trayectoria de los desplazamientos totales.	59
Figura 34. EG 08. Distribución del esfuerzo principal mayor.	60
Figura 35. EG 08. Trayectoria de los desplazamientos totales.	61
Figura 36. EG 09. Distribución del esfuerzo principal mayor.	62
Figura 37. EG 09. Trayectoria de los desplazamientos totales.	63
Figura 38. EG 10. Distribución del esfuerzo principal mayor.	64
Figura 39. EG 10. Trayectoria de los desplazamientos totales.	65
Figura 40. EG 11. Distribución del esfuerzo principal mayor.	66
Figura 41. EG 11. Trayectoria de los desplazamientos totales.	67
Figura 42. Sostenimiento en la EG 01.	69
Figura 43. Sostenimiento en la EG 02.	70
Figura 44. Sostenimiento en la EG 03.	71
Figura 45. Sostenimiento en la EG 04.	72
Figura 46. Sostenimiento en la EG 05.	73
Figura 47. Sostenimiento en la EG 06.	74
Figura 48. Sostenimiento en la EG 07.	75
Figura 49. Sostenimiento en la EG 08.	76
Figura 50. Sostenimiento en la EG 09.	77
Figura 51. Sostenimiento en la EG 10.	78
Figura 52. Sostenimiento en la EG 11.	79

ANEXOS

LISTA DE PLANOS

- Plano 01. Imagen Satelital.
- Plano 02. Modelo Digital de Elevaciones.
- Plano 03. Unidades Morfogenéticas.
- Plano 04. Geológico Estructural.
- Plano 05. Sección Geológica Estructural.
- Plano 06. Geomecánica de Puntos de Control y RMR.
- Plano 07. Zonificación Geomecánica RMR.
- Plano 08. Proyección del RMR en el Túnel.
- Plano 09. Zonificación Q de Barton.
- Plano 10. Proyección Q de Barton en el Túnel.

RESUMEN

En los distritos de Motupe, Incahuasi y Kañaris en la región de Lambayeque se ejecutará el túnel de Huallabamba, en cuyo eje se encontraría litológicamente rocas intrusivas como granodioritas y rocas extrusivas como lavas andesíticas, diques dacíticos, tufo dacítico y flujo lávico. El estudio superficial evidencia fracturamiento en los macizos rocosos, formando cuñas en la franja de estudio, las cuales constituyen geoestructuras masivas que son afectadas por las precipitaciones e infiltraciones de agua ocasionando alteraciones en el macizo rocoso y en las discontinuidades creando zonas geotécnicamente inestables. Por ello, se realizó la caracterización geomecánica del macizo rocoso y se estableció once estaciones geomecánicas valoradas según el RMR y el Q de Barton, dando como resultado según el RMR macizos rocosos constituidos por roca buena (EG 01, 02, 04, 05 y 06), roca media (EG 03, 07, 08 y 10) y roca mala (EG 09 y 11); y según el Q de Barton, roca buena (EG 02 y 05), roca media (EG 01 y 04), roca mala (EG 03, 06, 07, 08, 09 y 10) y roca muy mala (EG 11). El análisis geotécnico evidencia mayores deformaciones en el techo del túnel debido al peso propio del material de la columna estratigráfica y a los esfuerzos inducidos; por lo tanto, el sostenimiento propuesto para las estaciones 01, 02, 03, 04, 05, 06, 09 y 10 será pernos ocasionales de 1.2 m. de longitud y para las estaciones 07, 08 y 11 pernos sistemáticos de 1.2 m. de longitud con espaciamiento de 1.2 x 1.2 m.

Palabras claves: Análisis geotécnico, caracterización geomecánica. RMR, Q de Barton y sostenimiento.

ABSTRACT

In the districts of Motupe, Incahuasi and Kañaris in the Lambayeque region, the Huallabamba tunnel will be executed, in whose axis lithologically intrusive rocks such as granodiorites and extrusive rocks such as andesitic lavas, dacitic dikes, dacitic tuff and lava flow would be found. The superficial study shows fracturing in the rock masses, forming wedges in the study strip, which constitute massive geostructures that are affected by rainfall and water infiltration causing alterations in the rock mass and in the discontinuities creating geotechnically unstable zones. For this reason, the geomechanical characterization of the rock mass was carried out and eleven geomechanical stations were established, valued according to the RMR and Barton's Q, resulting in rock masses made up of good rock according to the RMR (01, 02, 04, 05 and 06), medium rock (EG 03, 07, 08 and 10) and bad rock (EG 09 and 11); and according to Barton's Q, good rock (EG 02 and 05), medium rock (EG 01 and 04), bad rock (EG 03, 06, 07, 08, 09 and 10) and very bad rock (EG 11). The geotechnical analysis shows greater deformations in the roof of the tunnel due to the weight of the material of the stratigraphic column and the induced stress; therefore, the proposed support for stations 01, 02, 03, 04, 05, 06, 09 and 10 will be spot bolts 1.2 long m. and for stations 07, 08 and 11 systematic bolts 1.2m. long with 1.2 x 1.2 m spacing.

Keywords: Geotechnical analysis, geomechanical characterization, RMR, Barton's Q and support.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En los distritos de Motupe, Incahuasi y Kañaris en la región de Lambayeque se ejecutará el túnel de Huallabamba, en cuyo eje encontraríamos litológicamente rocas intrusivas como granodioritas y rocas extrusivas como lavas andesíticas, diques dacíticos, tufo dacítico y flujo lávico. Además, se evidencia en los puntos de estudio superficiales fracturamientos en los macizos rocosos con mediana a fuerte intensidad, formando cuñas en la franja de estudio, las cuales constituyen geoestructuras masivas que son afectadas por las precipitaciones e infiltraciones de agua ocasionando alteraciones en el macizo rocoso y en las discontinuidades creando zonas geotécnicamente inestables. Estas condiciones serán analizadas para determinar el sostenimiento ideal según las zonas críticas encontradas y el túnel pueda trabajar correctamente.

El problema se define como: ¿cuál es el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos en la franja superficial del eje del túnel proyectado, constituidos por intrusivos granodioríticos y rocas extrusivas como lavas andesíticas, diques dacíticos, tufo dacítico y flujo lávico para el análisis del eje del túnel de Huallabamba afectados por las precipitaciones, infiltraciones y sismicidad? y la hipótesis planteada es: el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos en la franja superficial del eje del túnel proyectado, constituidos por intrusivos granodioríticos y rocas extrusivas como lavas andesíticas, diques dacíticos, tufo dacítico y flujo lávico para el análisis del eje del túnel de Huallabamba se encuentran afectados por fracturamientos que posibilitan la infiltración originando la disminución de la resistencia de las discontinuidades, creando inestabilidades geotécnicas que se tienen que mejorar con diferentes tipos de sostenimiento.

La justificación es que la proyección del túnel de Huallabamba, proporcionará abastecimiento de agua a centros poblados que carecen de este suministro líquido, para ello se realizará exploraciones geotécnicas de los macizos rocosos para realizar posteriores excavaciones subterráneas para la conducción de

agua, comprendiendo las siguientes variables para el análisis geotécnico como: geoestructuras, sismicidad e infiltración de agua, que darán a conocer el comportamiento del macizo rocoso. Sin embargo, la caracterización geomecánica definirá: el grado de alteración, resistencia, orientación e infiltración; logrando obtener resultados para el proceso de control, mejoramiento y optimización, siguiendo una correcta metodología de obtención de resultados para la caracterización geomecánica y comportamiento geotécnico.

La investigación es de nivel explicativo y tiene como objetivo general definir el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos en la franja superficial del eje del túnel proyectado, constituidos por intrusivos granodioríticos y rocas extrusivas como lavas andesíticas, diques dacíticos, tufo dacítico y flujo lávico para el análisis del eje del túnel de Huallabamba afectados por las precipitaciones, infiltraciones y sismicidad. Como objetivos específicos se tiene: realizar el cartografiado geológico geotécnico de los afloramientos rocosos, caracterizar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, determinar las condiciones hidrológicas y sísmicas de la zona de trabajo, determinar la zonificación geotécnica en base al trazado del túnel, definir el comportamiento geotécnico y definir el tipo de sostenimiento.

La tesis se presenta organizada en capítulos: capítulo I, menciona el problema de investigación, relacionado con las variables y los objetivos planteados a desarrollar; capítulo II, conforma la recopilación de información bibliográfica relacionados con la investigación en excavaciones subterráneas; capítulo III, está relacionado con la descripción del área de investigación y la metodología de la investigación utilizada; capítulo IV, la presentación y discusión de resultados, planteados por las variables de la investigación y capítulo V, define las conclusiones y recomendaciones de la tesis.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Oconotrillo (2011). Realizó el proyecto: “Análisis de soporte utilizado para el túnel de conducción del Proyecto Hidroeléctrico Paso Acho, Volcán Panamá”. El proyecto Paso Ancho se ubica en la República de Panamá, provincia Chiriquí, distrito Bugaba; geológicamente está conformado por rocas volcánicas conformado por basaltos, andesitas, cenizas, tobas, aglomerados y lavas. Los ensayos de compresión uniaxial (σ_{ci}) muestran valores: 25 a 50 MPa, RMR: 22 a 43, Q: 0.06 a 0.36. Sectorizando el eje del túnel en 6 zonas y definiendo sostenimiento para las zonas 2 a 6, como bulonado sistemático más shotcrete o cerchas ligeras a medianas con espaciamiento de 1.50 m. y para la zona 1 no se requiere sostenimiento. De acuerdo al software Phase², tiene deformaciones no mayores a la orden de milímetros, para K = 1 es de 0.3 mm. en la solera y para K = 2 es de 0.7 mm. en los hastiales.

Suarez et al. (2009). Realizó la investigación: “Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del Proyecto Hidroeléctrico Porce III, Colombia”. Se localiza en Colombia, departamento de Antioquia. Para su desarrollo se utilizó métodos: empíricos, analíticos y observacionales. Litológicamente se ubica en la Cordillera Central constituida por rocas metamórficas, compuestas por: esquistos de variada composición y neises cuarzo feldespáticos. Utilizando los métodos empíricos se obtuvo valores de acuerdo al RQD% (10 a 60), RMR (17 a 33) y Q (0.006 a 3.30). Asimismo, concluyó específicamente, que el modelo elastoplástico de fundamento continuo de un material elástico lineal isotrópico, no necesariamente puede ser apropiado para las condiciones complejas de ciertos macizos rocosos, como los presentados en el sitio de las obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Porce III.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Aranzamendi (2019). Realizó el: Estudio geológico - geotécnico para la construcción y soporte del túnel de conducción F03 – central hidroeléctrica Hidromanta I – Perú. La zona de estudio se ubica en el departamento de Ancash, provincia de Corongo, distrito de Yanac y La Pampa. El cartografiado geológico muestra que el emplazamiento será sobre rocas granodioríticas, con diferente grado de fracturamiento y meteorización. La caracterización geotécnica estima valores de RMR entre 55 y 75 con grados de meteorización I y III; donde la calidad geotécnica es baja se observa un grado de alteración I y IV; con permeabilidad media a baja al inicio, pasando a muy baja a impermeable a medida que aumenta la calidad del macizo rocoso. De acuerdo a la caracterización del macizo rocoso presenta tres tipos de sostenimiento: shotcrete, swellex y cimbras reticulares.

Benel (2019). En su tesis: “Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo – Cajamarca”. El túnel del Nivel 3 está emplazado en rocas andesitas gris verduscas y aglomerados del Volcánico Chilete. La caracterización geomecánica muestra resultados de resistencia a la compresión uniaxial: 36.51 MPa. a 165.20 MPa. por su anisotropía y el estado tensional de la excavación, definidas por deformaciones acumulativas en la clave (estación 1 y 2), hastiales (estación 3) y periféricas homogéneas (estación 4 y 5). Obteniendo resultados de calidad de roca: mala a buena, teniendo correlaciones empíricas: RMR y Q de Barton. Definió el sostenimiento por cuadros de maderos rectos, puntales de madera y anclajes sistemáticos adherentes.

Montoya (2018). En su tesis: “Relación geotécnica y litomorfoestructural del túnel de la Mina Paredones Nivel 5 San Pablo – Cajamarca”, definió la interacción de inestabilidades progresivas y aceleradas con los cambios litológicos de la excavación y la utilización de métodos numéricos. Geotécnicamente el Nivel 5 presenta redistribución de esfuerzos tenso-deformaciones de manera continua y progresiva. Sin embargo, la investigación muestra además que las 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. en la periferia de la excavación, 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.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

Bazán (2017). En su tesis: “Estudio geomecánico del macizo rocoso para la proyección del túnel de totoras (Huallabamba – Inkawasi y Kañaris)”. Mediante los mapeos determinó que el túnel se encuentra con presencia de discontinuidades; asimismo que las rocas encontradas son: dacita, andesita (moderadamente fracturadas y con alta resistencia a la compresión uniaxial) y granodioritas (fuertemente meteorizadas y fácilmente deleznable). La clasificación geomecánica RMR muestra rocas entre buena calidad (RMR de 70) y mala (RMR de 35). Evidenciándose la presencia de nivel freático, sin embargo, no se descarta la percolación de las aguas de escorrentía superficial al nivel de la rasante del túnel.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

Durante las fases preliminares de diseño, se necesita información detallada sobre el macizo rocoso, siendo importante los criterios empíricos para la clasificación de la roca. Por otro lado, los esquemas de clasificación se pueden utilizar para construir una imagen de la composición y las características mecánicas de las rocas para proporcionar estimaciones iniciales de las necesidades de apoyo. Sin embargo, el uso de estos procedimientos de diseño requiere acceso a la información detallada sobre tensiones insitu, propiedades de la masa rocosa y secuencia de excavación y planificación.

2.2.1.1 ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA (RQD)

El índice de designación de calidad de la roca o rock quality designation index es una clasificación geomecánica que nos indica el grado de fracturamiento

del macizo rocoso y nos muestra la frecuencia lineal de discontinuidades (Gavilanes y Andrade, 2004). El RQD es uno de los sistemas más empleados para la caracterizar la competencia del macizo rocoso.

El RQD asigna un porcentaje de clasificación del macizo rocoso, de 100% (el más competente) a 0% (el menos competente: condición suelo). Los rangos del valor del RQD se muestra en el Cuadro 2.1 siguiente:

Tabla 1. Clasificación geomecánica RQD

Descripción del Índice de Calidad de Roca	Valor del RQD
Muy pobre	0 - 25
Pobre	25 - 50
Regular	50 - 75
Buena	75 - 90
Excelente	90 - 100

Fuente: Deere, 1964.

Como una alternativa al RQD, la frecuencia lineal de discontinuidades también es un índice para estimar la intensidad de juntas en un macizo rocoso. Se calcula simplemente agregando el número de discontinuidades naturales por metro de muestro (Villaescusa, 1992).

Tabla 2. Relación entre RQD y frecuencia lineal

Calidad de roca	Frecuencia lineal	RQD
Muy pobre	> 17	0 - 20
Pobre	12 - 17	20 - 40
Regular	7 - 12	40 - 60
Buena	4 - 7	60 - 80
Muy buena	1.5 - 4	80 - 95
Excelente	< 1.5	95 - 100

Fuente: Villaescusa, 1992.

2.2.1.2 ROCK MASS RATING (RMR)

El método se aplica asignando la valoración correspondiente para cada parámetro. El factor de ajuste, depende de la orientación de las discontinuidades y tiene valores distintos para túneles, cimentaciones o taludes. El resultado de la suma de los 5 parámetros, menos el factor de ajuste, es la calificación final del RMR89 Bieniawski, que puede variar entre 0 y 100. Se obtiene estimando los siguientes parámetros (Tabla 3):

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades, considera los siguientes parámetros:
 - ✓ Longitud de las discontinuidades.
 - ✓ Abertura.
 - ✓ Rugosidad.
 - ✓ Relleno.
 - ✓ Alteración.
- Condiciones del agua subterránea
- Orientación de las discontinuidades.

Obteniendo cinco tipos o clases de rocas según el valor del RMR:

- Clase I : $100 < \text{RMR} < 81$, Roca muy buena
- Clase II : $80 < \text{RMR} < 61$, Roca buena
- Clase III : $60 < \text{RMR} < 41$, Roca media
- Clase IV : $40 < \text{RMR} < 21$, Roca mala
- Clase V : $20 < \text{RMR} < 0$, Roca muy mala

2.2.1.3 SISTEMA Q DE BARTON

El sistema Q fue desarrollado en el NGI por Barton et al. (1974), para el diseño de excavaciones subterráneas, principalmente túneles. Este sistema ha sido mejorado y actualizado constantemente siendo la última actualización del año 2007,

la cual incluye investigaciones analíticas respecto al espesor, espaciamiento y reforzamiento de arcos armados reforzados con concreto lanzado (RRS) como una función de la carga y calidad del macizo rocoso, así como la absorción de energía del concreto lanzado. El sistema Q se basa en la estimación de seis parámetros independientes y expresa la calidad de la roca Q, como función de esos parámetros:

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

Los parámetros que definen estos cocientes son:

- **RQD:** La designación del índice de calidad de la roca definida por Deere.
- **J_n:** Un coeficiente asociado al número de sets de estructuras presentes en el macizo rocoso.
- **J_r:** Coeficiente asociado a la rugosidad de las estructuras presentes en el macizo rocoso.
- **J_a:** Coeficiente asociado a la condición o grado de alteración de las estructuras presentes en el macizo rocoso.
- **J_w:** Coeficiente asociado a la condición de aguas en las estructuras presentes en el macizo rocoso.
- **SRF:** Coeficiente asociado al posible efecto de la condición de esfuerzos en el macizo rocoso.

Tabla 3. Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)

A. Parámetros de clasificación con sus valores									
Parámetros			Rango de valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de resistencia de Carga puntual (Is)	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	4-2 MPa	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión uniaxial.		
		Resistencia de la compresión uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50- 100 MPa	25- 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
Puntaje			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntaje		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discont.		>2 m.	0.6-2 m.	200-600 mm.	50-200 mm.	<50 mm.		
	Puntaje		20	15	10	8	5		
4	Condición de las discontinuidades		Superficies muy rugosas sin continuidad, sin separación, paredes de rocas sin alteración	Superficies rugosas con separación <1mm. Paredes de roca ligeramente meteorizadas.	Superficies ligeramente rugosas, con separación <1mm. Paredes altamente meteorizadas.	Superficies pulidas o relleno <5mm de espesura o separación 1-5mm.Continuas	Relleno blando > 5mm de espesor. Separación >5mm. Continuas		
	Puntaje		30	25	20	10	0		
5	Aguas Subterráneas	Flujo por cada 10m. de longitud del túnel (l/m)	Ninguno	<10	10-25	25-125	>125		
		(Presión de agua en la diaclasa) (Tensión principal mayor σ_1)	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
		Puntaje	15	10	7	4	0		
B. Ajuste la orientación de las discontinuidades									
Orientaciones del rumbo y buzamiento			Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable		
Puntaje	Túneles y minas		0	-2	-5	-10	-12		
	Cimentaciones		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
C. Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la evaluación total									
Puntaje			100-81	80-61	60-41	40-21	<21		
Tipos de roca			I	II	III	IV	V		
Descripción			Muy buena	Buena	Regular	Media	Muy mala		
D. Significado de los tipos de rocas									
Tipo de roca			I	II	III	IV	V		
Tiempo medio de sostén			20 años, claro de 15 m.	1año, claro de 10 m.	1semana, claro de 5 m.	10horas, claro de 2.5 m.	30minutos, claro de 1 m.		
Cohesión del macizo rocoso (KPa)			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Angulo de fricción del macizo rocoso (°)			>45	35-45	25-35	15-25	<15		
E. Guías para la Clasificación según las condiciones de las discontinuidades									
Longitud (Persistencia)			<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
Puntaje			6	4	2	1	0		
Separación (Abertura)			Ninguna	<0.1mm.	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm		
Puntaje			6	5	4	1	0		
Rugosidad			Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Superficies Pulidas		
Puntaje			6	5	3	1	0		
Relleno			Ninguno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando<5mm	Blando>5mm		
Puntaje			6	4	2	2	0		
Meteorización			Inalterada	Ligeramente meteorizada	Moderadamente meteorizada	Altamente Meteorizada	Descompuesta		
Puntaje			6	5	3	1	0		
F. Efecto de la orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades de los túneles									
Rumbo perpendicular al eje del túnel					Rumbo paralelo al eje del túnel				
Avance en el sentido del buzamiento- Buz. 45°-90°			Avance en el sentido del buzamiento- Buz. 20°-45°		Buzamiento 45°-90°		Buzamiento 20°-45°		
Muy favorable			Favorable		Muy desfavorable		Regular		
Avance contra el sentido del buzamiento- Buz. 45°-90°			Avance contra el sentido del buzamiento- Buz. 20°-45°		Buzamiento 0°-20° Independiente del rumbo				
Regular			Desfavorable		Regular				

Fuente: Gavilanes y Andrade, 2004

Tabla 4. Clasificación geomecánica Q de Barton

Descripción	Q
Roca excepcionalmente mala	0.001 - 0.01
Roca extremadamente mala	0.01 - 0.1
Roca muy mala	0.1 - 1
Roca mala	1 - 4
Roca regular	4 - 10
Roca Buena	10 - 40
Roca muy buena	40 - 100
Roca extremadamente buena	100 - 400
Roca excepcionalmente buena	400 - 1000

Fuente: Barton et al., 1974.

2.2.2. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

Las estructuras geológicas se pueden observar a diferentes escalas, desde una escala a nivel continental a una escala de microfracturas en la composición de la matriz de roca. Para los propósitos de la geomecánica en túneles, las estructuras geológicas se pueden dividir en “estructuras mayores”, incluyendo zonas de corte y fallas regionales (estructuras a escalas de la mina), y las menos extensas o “estructuras menores”, como las familias de discontinuidades, los estratos, etc. (Estructuras a una escala local para un área de la mina).

2.2.2.1 ESTRUCTURAS MAYORES

Las estructuras principales se originan por grandes movimientos de la corteza terrestre, ocurridos antes, durante, o después de la formación de los yacimientos. Dichos movimientos han generado sistemas de fallas geológicas que son de interés para los geólogos que tratan de entender cómo se formaron. Las fallas son planos de debilidad a lo largo de los cuales se han desplazado bloques de roca y podrían tener una gran trascendencia en la estabilidad global del túnel. Las actividades de minado podrían reactivar movimientos a lo largo de las fallas y causar un daño significativo a las cavidades subterráneas.

2.2.2.2 ESTRUCTURAS MENORES

Las estructuras menores o discontinuidades están frecuentemente supeditadas a las estructuras mayores. Un buen conocimiento del sistema de estructuras mayores proveerá una percepción inicial para el estudio de las estructuras menores. Las estructuras menores son aquellas que tienen al menos un metro de longitud y se repiten a un intervalo apreciable (familias de discontinuidades, estratificación) y son de interés para la geomecánica. Típicamente, la información de estructuras menores que se debe obtener incluye la ubicación, buzamiento y dirección de buzamiento. Además, es una buena práctica registrar la condición de las discontinuidades (rugosidad, ondulación, relleno, persistencia, espaciamiento, etc.) ya que esta información puede ser usada para la clasificación del macizo rocoso.

Las técnicas de mapeo geomecánico pueden ser de “línea de detalle” o mediante “estaciones” geomecánicas. La dirección y ubicación en que se ejecute el mapeo podría incurrir en sesgos en el levantamiento de la información.

2.2.3 CRITERIOS DE ROTURA EN ROCAS

2.2.3.1 CRITERIO DE HOEK – BROWN

El criterio para evaluar la resistencia de la matriz rocosa es mediante una aproximación lineal de la envolvente de rotura curvilínea en un rango de campo tensional. Desarrollado inicialmente para su aplicación a macizos rocosos fracturados sin alterar su matriz rocosa resistente.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor respectivamente, σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, m y s son constantes adimensionales de Hoek y Brown para la roca del material, con $s=1$ para roca intacta. Los valores de la resistencia a la compresión uniaxial, m , s

pueden ser obtenidos a partir de ensayos de compresión uniaxial (σ_{ci}) y triaxiales (m, s, a).

2.2.3.2 CRITERIO MORH – COULOMB

Es un criterio lineal que es ampliamente usado para definir las condiciones de falla en un suelo, asumiendo el comportamiento lineal que éstos generalmente presentan. Entre los términos que lo componen, la cohesión es una medida de la adherencia entre las partículas que componen el suelo. En suelos granulares secos y saturados la cohesión se supone nula (“suelos no cohesivos”); el caso opuesto lo representan los suelos finos, especialmente las arcillas, en cuyo comportamiento la cohesión juega un rol primordial.

$$\tau = c + \sigma_n \text{tg}\phi$$

2.2.4 SOSTENIMIENTO EN EXCAVACIONES

El tiempo transcurrido entre la ejecución de la excavación y la instalación del sostenimiento dependerá de las condiciones del macizo rocoso. En rocas de buena calidad, el sostenimiento podrá ser retrasado en el tiempo; en caso contrario, la instalación deberá realizarse lo más pronto posible: “la colocación tardía del sostenimiento en un determinado tramo, favorece la relajación y descompresión del macizo rocoso, pudiendo ser la causa de manifestaciones de inestabilidad” (LOM, 2015).

Atendiendo como actúa en la roca, el sostenimiento podrá ser activo o pasivo:

2.2.4.1 SOSTENIMIENTOS PASIVOS

Actúan en la superficie de la excavación o en su interior (ejemplo: cimbras metálicas, cuadros de madera, concreto lanzado (shotcrete) y pernos cementados). Estos elementos pasivos requieren que la roca se desplace o deforme para recién empezar a actuar como soporte.

2.2.4.2 SOSTENIMIENTOS ACTIVOS

Actúan en el interior del macizo rocoso, son capaces de proporcionar refuerzo a la roca desde el instante mismo de su instalación, logrando que la roca forme una zona de compresión y participe en la estabilidad de la excavación (refuerzo de roca).

2.2.4.3 TABLA DE SOPORTE PRÁCTICO MINERO

La Tabla de Soporte Práctico Minero (SPM) permite determinar el sostenimiento en base a la dimensión equivalente y a la clasificación geomecánica del macizo rocoso (Vallejo, 2008).

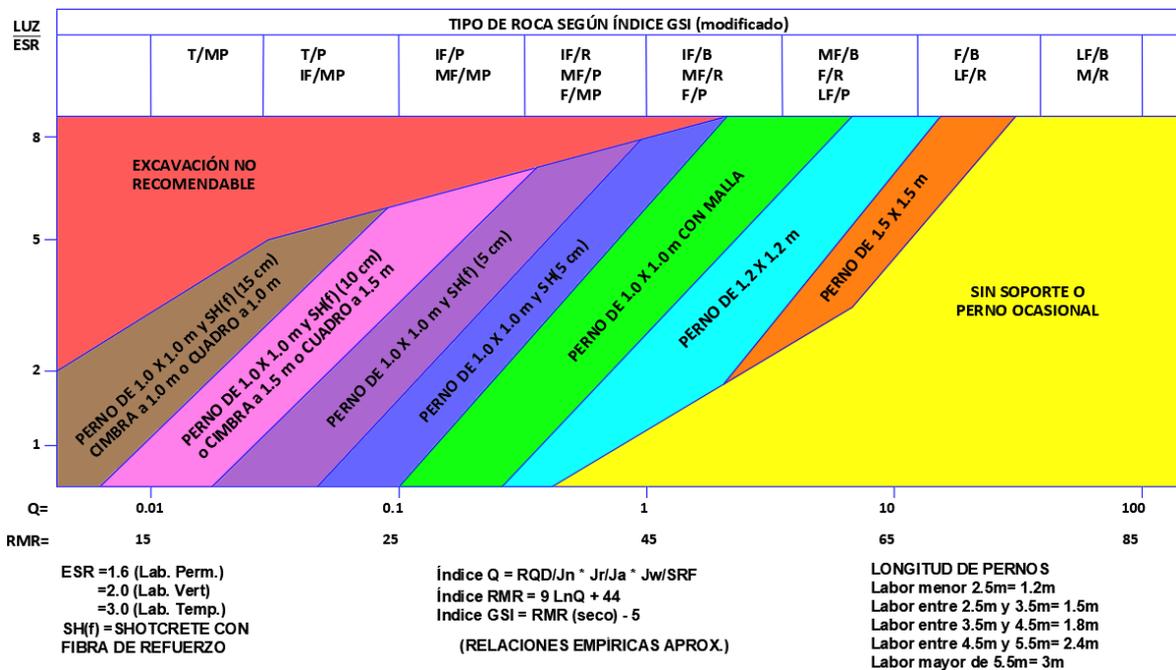


Figura 1. Tabla de Soporte Práctico Minero (SPM)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Ademe: El diseño de ademes es para las excavaciones subterráneas ayuda al macizo rocoso a soportarse (Hoek y Brown, 1980).

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

Emboquille: Aquella actuación que consiste en excavar a cielo abierto una ladera hasta obtener un talud desde el que se inicia la excavación del túnel (Guerra, 2011).

Estrato: Roca conformada por la sedimentación de fragmentos o partículas provenientes de la desintegración de las rocas preexistentes o de la precipitación de las soluciones químicas acuosas (Dávila, 2011).

Falla: Están asociadas con los límites entre las placas tectónicas de la Tierra. El movimiento de estas rocas puede causar terremotos. Las fallas inactivas son aquellas que en algún momento tuvieron movimiento a lo largo de ellas pero que ya no se desplazan. (González de Vallejo, 2002).

Factor de zona: Determina la zona sísmica (Z) donde se encuentra el proyecto en base al mapa de zonificación sísmica (Ministerio de Vivienda, construcción y saneamiento, 2021).

Mapeo por celdas: Se desarrolla a través de la ejecución de estaciones geomecánicas, las cuales deben abarcar un área aproximada de 3.00 m x 3.00 m.; identificando y cuantificando las características del macizo rocoso de las principales familias (Osinermin, 2017).

Métodos numéricos: Es realizado típicamente mediante el análisis de esfuerzos alrededor de las excavaciones subterráneas, esto se puede realizar identificando las zonas de daño alrededor de las excavaciones (Osinermin, 2017).

Precipitación: Es toda forma de humedad, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas, las garugas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación (Chereque, 1989).

Resistencia: La máxima tensión que un cuerpo puede soportar sin fallas por rotura o por deformación continua. La resistencia a la rotura, se refiere a la tensión en el momento de la rotura. El término puede ser descrito como el punto más elevado de la curva tensión-deformación (Gavilanes y Andrade, 2004).

Zonificación geomecánica: Proceso de delimitación de zonas en donde la masa rocosa tiene condiciones geomecánicas similares y por lo tanto también el comportamiento similar (Cruz, 2004).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

Se encuentra localizado en los distritos: Incahuasi, Kañaris y Salas; conformando la provincia de Ferreñafe, departamento de Lambayeque al norte del Perú; utilizando coordenadas en el sistema UTM DATUM – WGS – 84 ZONA 17S pertenece al cuadrángulo Incahuasi (13-e), ubicado a una cota de 2485 msnm. al NE de la ciudad de Chiclayo. El eje de túnel se encuentra entre las progresivas del Km. 05+360 – Km 11+380, teniendo como puntos de referencia el punto inicial y final del emboquille del túnel a construir.

Tabla 5. Coordenadas de los extremos de túnel de Huallabamba

Extremo del Túnel	Latitud	Longitud	Cota (msnm.)
Inicial	6° 4'39.36"S	79°22'4.01"O	2509
Final	6° 4'8.70"S	79°25'1.83"O	2487

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso a la zona de investigación es por medio de vía terrestre asfaltada y afirmada desde la ciudad de Chiclayo hasta el distrito de Huallabamba, siendo la primera por la carretera Chiclayo - Pucara de 217 Km., en un tiempo aproximado de 4h 22 min. y el segundo tramo por Pucara - Huallabamba de 47 Km. en un tiempo de 2h 30 min. como se muestra en la Figura 1.

Tabla 6. Ruta de accesibilidad a la zona de estudio.

Tramo A- B	Tipo de vía	Condiciones de la vía	Distancia (Km.)	Tiempo (h.)
Chiclayo - Motupe	Asfaltada	Buen estado	79	1:42
Motupe - Pucara	Asfaltada	Buen estado	138	2:40
Pucara - Huallabamba	Afirmado	Malo	47	2:30

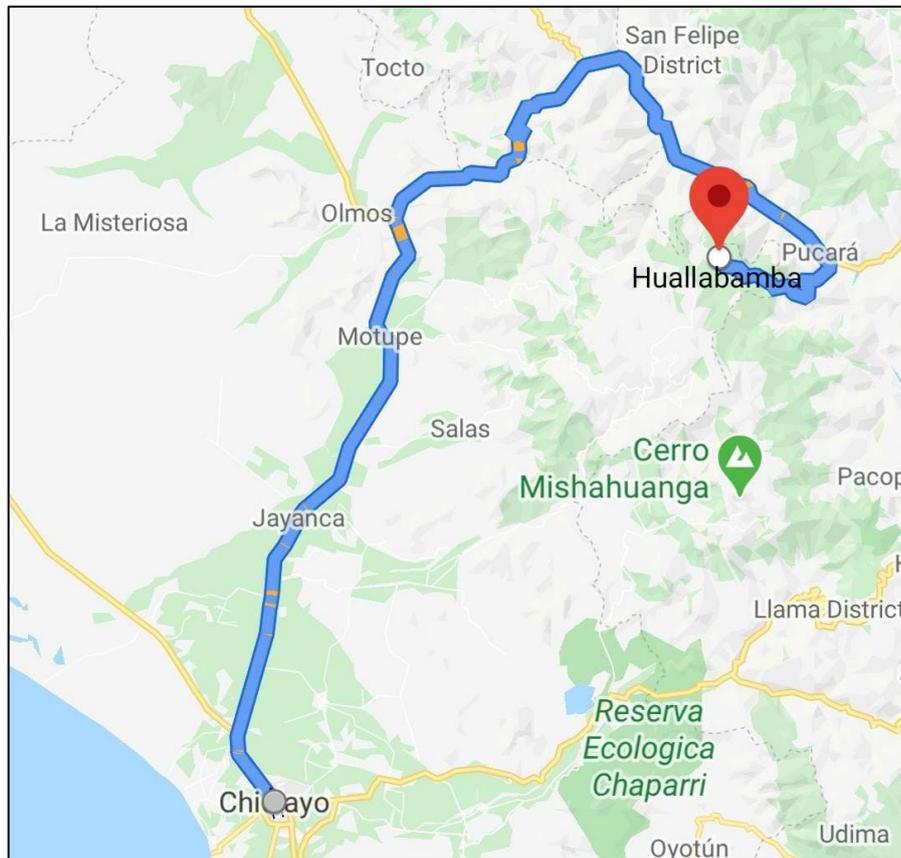


Figura 2. Accesibilidad a Huallabamba.
Fuente: Google Maps, 2020.

3.3 CLIMA

El área de estudio tiene un clima templado a frío, las temperaturas promedio mínimas están entre 13 y 14°C, mientras que las temperaturas máximas fluctúan entre 21 y 22°C, ambas no varían mucho durante el año (INGEMMET, 2013).

3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La metodología propuesta en la tesis es de carácter no experimental, ya que el investigador no interviene, controla ni manipula las variables; nivel correlacional - explicativa, debido a que se evalúa la relación entre las variables independientes – dependiente y se plantea una hipótesis para explicar causa y efecto; definidas por secuencias de campo, gabinete y culminación de la tesis.

3.4.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO

Los macizos rocosos están conformados por rocas volcánicas o extrusivas y rocas intrusivas que se encuentran en la proyección del eje del túnel de Huallabamba, cortando a rocas granodioríticas del Paleógeno – Neógeno, que afloran en la superficie y en la proyección subterránea, en un total de 5,982 km.

3.4.3. MUESTRA

Puntos de control geomecánicos en superficie, mediante estaciones de cartografiado geológico-geotécnico, que muestran la calidad de roca, litología, y meteorización; correspondiendo a la proyección del eje del túnel Huallabamba.

3.4.4. UNIDADES DE ANÁLISIS

Relacionadas con las variables: geoestructuras, geoformas, precipitación, infiltración, sismicidad, RMR, RQD y Q de Barton.

3.4.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

El método de investigación fue el de deducción – inducción y se empleó técnicas directas como la observación, describiendo las variables del área de estudio en la franja superficial a través de los puntos de control geomecánicos, para obtener información y realizar el análisis de datos obtenidos en campo mediante el cartografiado: geológico y geomecánico. El método de trabajo se divide en tres etapas, describiéndose a continuación:

3.4.5.1 TRABAJO DE GABINETE

Fueron las actividades previas al trabajo de campo, incluyendo: búsqueda de información, planificación del trabajo, recopilación de bibliografía, definición de la metodología, sectorización del cartografiado geológico-geotécnico y equipos a utilizar en la recolección de información.

3.4.5.2 TRABAJO DE CAMPO

Se realizó definiendo las etapas en gabinete y abarcó el mapeo geomecánico que incluye la ubicación de las estaciones, determinación y registro de las características del macizo rocoso; determinación y registro de la orientación y características de las discontinuidades; así como la determinación de la resistencia en campo de la matriz rocosa; se graficó los perfiles de las discontinuidades encontradas en cada estación; y se extrajeron muestras de roca para ensayos de laboratorio.

La ubicación de estaciones se basó en la identificación de los afloramientos rocosos, haciendo uso del GPS se determinó las coordenadas y altitud de las estaciones geomecánicas, así mismo se registró sus dimensiones aproximadas (longitud y altura de exposición) y su orientación (dirección e inclinación).

- Características del macizo rocoso

Se determinó y registró las características principales del macizo rocoso los cuales fueron litología, grado de meteorización, grado de fracturamiento y grado de alteración.

- Orientación de las discontinuidades

Con ayuda de la brújula se midió y luego se registró la orientación de buzamiento y dirección del buzamiento de todas las discontinuidades identificadas en el afloramiento, en algunas de ellas se midió el azimut y buzamiento que posteriormente fueron convertidas a DIP y Dip Direction.

- Características de las discontinuidades

Se determinaron las características de las discontinuidades tales como: espaciado, persistencia, abertura, rugosidad, relleno, alteración y condiciones de agua en las 10 estaciones geomecánicas.

- Ensayos de resistencia

Con el martillo de SCHMIDT se realizó ensayos no destructivos a la matriz rocosa, registrando el rebote de cada ensayo, para luego calcular la resistencia de la matriz en las nueve estaciones.

- Perfil de la pared de la discontinuidad

Se utilizó un perfilómetro, también conocido como Peine de Barton para graficar el perfil de la pared de la discontinuidad, consiste en obtener una línea que se compara con una línea de perfiles propuestos por el autor, cada perfil está asignado a un valor del JRC que varía de 0 a 20.

- Extracción de muestras

Se extrajo veinte (10) muestras de roca de las estaciones geomecánicas, los ensayos de compresión uniaxial nos permitieron conocer la resistencia de la matriz rocosa.

3.4.5.3 ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y REDACCIÓN DEL INFORME

Los datos recopilados en campo han sido trasladados a una base de datos y trabajados hasta obtener el trabajo final. Se sintetizó la información en tablas, gráficos y planos, utilizando softwares: Microsoft Office, para la digitalización del informe, AutoCAD y ArcGIS para la representación de la zona de estudio en planos, Rocdata y RS2 para el análisis geomecánico. Por último, se muestra las conclusiones y recomendaciones.

3.4.6. RECURSOS MATERIALES

Durante el desarrollo de la investigación, fueron necesarios algunos equipos e instrumentos para la recopilación de datos para su posterior interpretación en gabinete. Los equipos e instrumentos utilizados fueron:

3.4.6.1 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Matriz geológica – geotécnica, MDE, plano geológico, imagen satelital y libreta de campo

3.4.6.2 EQUIPOS DE MEDICIÓN

Brújula geotécnica, GPS Garmin, Peine de Barton, cámara fotográfica, Martillo Schmidt, lupa, picota, rayador, wincha, flexómetro, linternas y casco.

3.4.6.3 SOFTWARES

AutoCAD, Rocdata, ArcGIS y RS2.

3.4.7. DEFINICIÓN DE VARIABLES

3.4.7.1 VARIABLE DEPENDIENTE

- Inestabilidad Geotécnica. Estados tenso - deformacionales que se origina en el eje de la excavación subterránea creando inestabilidad en las rocas.

3.4.7.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

- Sismicidad. Medida de la actividad sísmica de algún lugar específico, según su frecuencia y magnitud a lo largo del tiempo.
- Precipitación. Agua condensada atmosférica que se deposita en la superficie de la tierra.
- Infiltración. Proceso de infiltración del agua en el suelo y rocas, a través de las discontinuidades.

3.5. HIDROLOGÍA

La viabilidad del proyecto es conducir aguas de la quebrada Totoras al canal de conducción en la progresiva Km. 11+420 en la quebrada Jarro Quebrado. A los 3,750 msnm. nace la quebrada S/N, con una longitud de 2,635 metros y orientación NE, esta confluye con otra quebrada S/N a los 3,250 msnm., formando la quebrada De Cruz, con longitud de 4,050 metros y orientación N, nuevamente confluyen con una quebrada S/N a los 2,985 msnm., con longitud de 2,467 m. con orientación NW, y por último nuevamente vuelven a confluir con la quebrada S/N a los 2,855 msnm., en el centro poblado Totoras, cambiando de nombre a quebrada Tortoras con longitud de 3,480 m. siendo con orientación NE hasta el empalme con la proyección del túnel Totoras a los 2,500 msnm.



Figura 3. A y B son afloramientos de rocas volcánicas andesíticas moderadamente meteorizadas, ubicadas en los flancos del canal de la Quebrada Totoras. C. Encauzamiento de la Quebrada Jarro, conformado por rocas intrusivas.

3.6. GEOLOGÍA REGIONAL

A nivel regional, se han reconocido cinco unidades geomorfológicas: Cordillera Occidental de los Andes, altiplanicies, valles, montaña de Mochumí y montañas de Pucará. El proyecto se enmarca dentro de la “Cordillera Occidental de los Andes”, esta corresponde a la zona más elevada con altitudes que van entre los 300 a 4000 msnm.; su morfología ha sido modificada por varias etapas de levantamientos y erosión. Sectores con afloramientos de rocas intrusivas y volcánicas. La parte más elevada de esta cordillera, constituye la divisoria de las cuencas del Pacífico y del Atlántico; sector donde nacen los principales ríos y quebradas: Flanco oeste con el río La Leche y flanco este con el Río Chotano.



Figura 4. A. Alineamientos de escarpas rocosos andesíticos, presentando coloraciones verduzcas a grises. B. Geomorfología superficial, donde se proyecta el eje túnel.

El relieve en la zona del presente estudio está caracterizado por presentar morfologías diferenciadas en la que se han determinado las siguientes sub unidades: Laderas de montañas, cauces fluviales, llanuras aluviales y conos de los depósitos coluviales.

3.7. GEOLOGÍA LOCAL

La evaluación geológica indica que el Canal Huallabamba se desarrolla en rocas volcánicas de la Formación Porculla, mientras que el tramo totora al túnel, involucra a dos litologías: Volcánico Porculla e intrusivos graníticos alterados. El Volcánico Porculla, consiste de una potencia considerable de

volcánicos dacíticos con intercalaciones de tobas; los piroclásticos son más abundantes que los derrames volcánicos. Los volcánicos se presentan en capas medianas pobremente estratificadas y dan afloramientos macizos que vistos de lejos se asemejan a rocas intrusivas. Existe un contraste bien definido entre las dacitas macizas y las tobas, por su dureza y resistencia (INGEMMET, 2013).

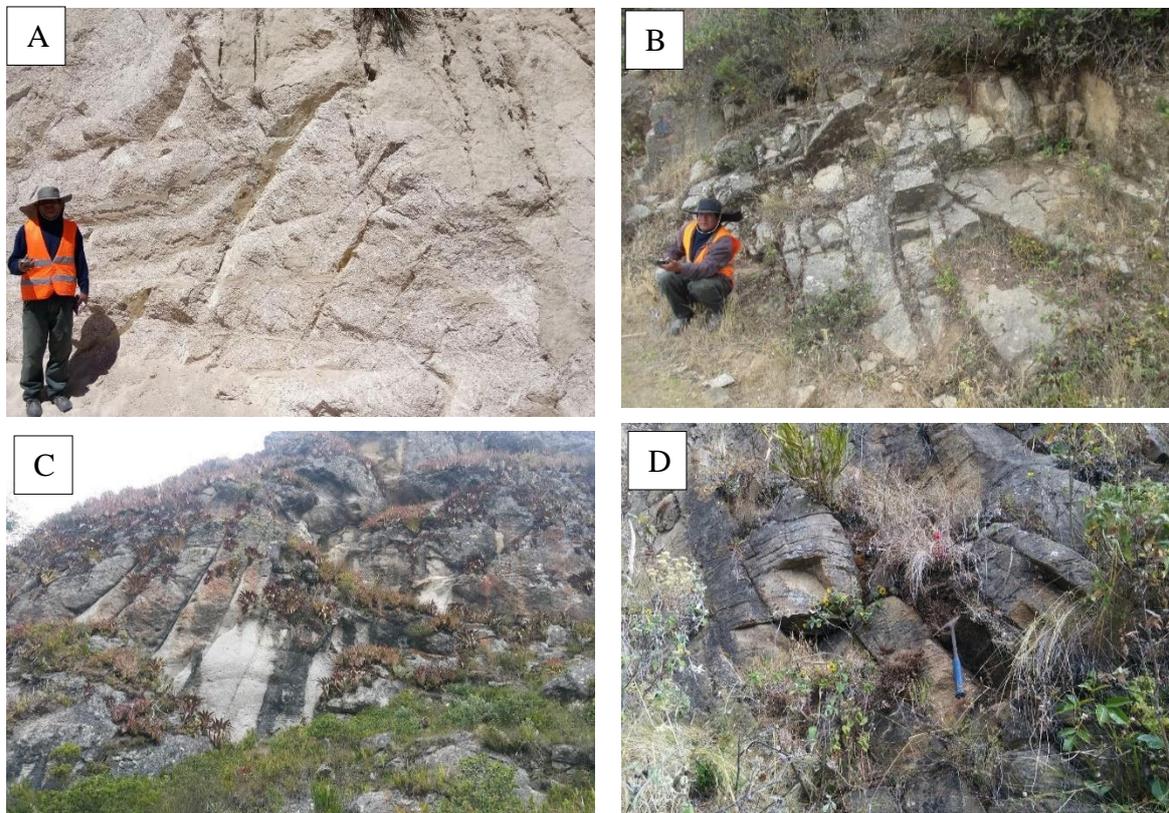


Figura 5. A. Afloramiento de granodiorita moderadamente fracturada, con alto grado de fracturamiento y meteorización B. Lavas andesíticas moderadamente fracturada, con leves meteorizaciones en el macizo rocoso. C. Lavas andesíticas poco fracturada, ligeramente meteorizadas de color gris oscuro. D. Roca andesita seudoestratificada, con ligeras meteorizaciones y fracturamientos en la roca.



Figura 6. Vista panorámica del flanco izquierdo de la Quebrada Totoras.

3.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de la investigación, se ubica en los dominios occidental y central; a continuación, se describe cada dominio estructural:

3.8.1 DOMINIO CENTRAL

Se caracteriza por estar limitada por dos sistemas de fallas regionales Incahuasi y Huancabamba. El sistema de fallas Incahuasi de dirección NO-SE, afecta a las secuencias de flujos piroclásticos, lavas andesíticas y dacíticas de los centros volcánicos paleógenos; dioritas, granodioritas, tonalitas, monzogranitos, cuarzo monzogranitos de las unidades Carrizal y Penachi. El sistema de fallas Huancabamba de dirección NNO-SSE, corresponde a una falla de rumbo en el área del cuadrángulo de Incahuasi. Sistema de fallas que afecta principalmente a secuencias de flujos piroclásticos paleógenos, considerado además como el más importante, puesto que, a lo largo de estas fallas se emplazan importantes cuerpos mineralizados tipo pórfidos, como es el caso del pórfido de La Granja y el pórfido de Cañariaco (INGEMMET, 2013).

3.8.2. DOMINIO OCCIDENTAL

Corresponde al sector oeste del cuadrángulo de Incahuasi, sus estructuras se prolongan al norte hacia los cuadrángulos de Jayanca y Chongoyape. En general, este dominio se caracteriza por la presencia de muchos cuerpos intrusivos que probablemente contribuyeron en la deformación de las rocas preexistentes (INGEMMET, 2013).

Mayormente, el área del proyecto se ubica en el Dominio Central, donde muchas de las estructuras geológicas están cubiertas por los productos de los centros volcánicos de la zona. La parte superior de este dominio, está dominada por las secuencias volcánicas paleógenos, que no presentan deformación y se encuentra en estratos sub horizontales y a veces con una ligera inclinación. Sin embargo, las rocas, se muestran afectadas por sistemas de fracturas y/o diaclasas; uno del principal sigue el alineamiento de las quebradas y ríos principales. Las observaciones de campo no infieren la presencia de fallas activas en la zona de interés del proyecto.

3.9.3. ESTUDIO GEOMECÁNICO

Se definieron once (11) estaciones geomecánicas para la determinación de las características de la matriz rocosa, como: propiedades de las discontinuidades y resistencia de la roca; mediante registros geológicos-geotécnicos en las zonas donde se identificaron afloramientos rocosos, litológicamente compuestos por: lava andesítica, granodiorita, flujos lávicos y diques dacíticos. Estas estaciones están distribuidas: entrada del túnel, eje, salida del túnel y alrededores. Para la determinación de la resistencia de matriz rocosa se utilizó el rebote con el Martillo de Schmidt, estando directamente relacionado con la resistencia de la matriz rocosa; el ensayo se realizó horizontalmente (0°), inclinado hacia abajo (-45°) y verticalmente (-90°). Sin embargo, se extrajeron muestras de roca para ser enviadas al laboratorio donde se realizaron ensayos de compresión uniaxial, para poder determinar la resistencia a la compresión simple.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. EVALUACIÓN GEOMECÁNICA

La evaluación geomecánica se realizó superficialmente en la proyección del eje del Túnel de Huallabamba, para ello se registró datos como: las coordenadas geográficas, características del macizo rocoso (litología, meteorización, grado de fracturamiento, RQD y resistencia de la roca intacta) y las propiedades de las discontinuidades (tipo, orientación, espaciamiento, persistencia, abertura, rugosidad, condición del relleno, alteración y agua). Con los datos de campo se obtuvo la valoración del macizo rocoso según los criterios RMR y Q de Barton.

Tabla 7. Estaciones Geomecánicas

Estación Geomecánica	Progresiva
EG 01	Km 0+000 – Km 0+316
EG 02	Km 0+316 – Km 0+739
EG 03	Km 0+739 – Km 1+173
EG 04	Km 1+173 – Km 1+699
EG 05	Km 1+699 – Km 2+489
EG 06	Km 2+489 – Km 3+452
EG 07	Km 3+452 – Km 4+041
EG 08	Km 4+041 – Km 4+425
EG 09	Km 4+425 – Km 4+700
EG 10	Km 4+700 – Km 5+092
EG 11	Km 5+092 – Km 5+982

Tabla 8. Valoración de macizos rocosos según RMR y Q de Barton

Estación	Resistencia Promedio	Parámetro RMR					Valoración RMR					RMR Básico	Corrección por orientación	RMR Corregido	Calificación RMR	GSI	Parámetros Q						Q	Calificación Q	LITOLOGIA
		Resistencia	RQD	Espaciamiento (cm)	Condición de las	Agua	RQD	Resistencia	Espaciamiento	Condición de las discontinuidades	Agua						RQD	Jn	Ja	Jr	Jw	SRF			
EG 01	75	R4	100	75	20	10	20	7	20	20	10	77	-5	72	Roca Buena	67	100	6	2	3	1	2.5	10.00	Roca Media	Lava andesítica
EG 02	75	R4	100	100	20	10	20	7	25	20	10	82	-5	77	Roca Buena	72	100	3	2	3	1	2.5	20.00	Roca Buena	Lava andesítica
EG 03	15	R2	89	78	12	10	17	2	20	10	12	61	-2	59	Roca Media	54	89	12	2	2	1	2.5	2.95	Roca Mala	Lava andesítica
EG 04	75	R4	99	67	20	10	20	7	20	20	10	77	-2	75	Roca Buena	70	99	12	2	3	1	2.5	4.93	Roca Media	Lava andesítica
EG 05	37.5	R3	100	75	20	10	20	4	20	20	10	74	-2	72	Roca Buena	67	100	6	1	2.5	1	2.5	16.67	Roca Buena	Lava andesítica
EG 06	37.5	R3	95	75	12	10	20	4	20	12	10	66	-5	61	Roca Buena	56	95	15	2	2.5	1	2.5	3.17	Roca Mala	Lava andesítica
EG 07	15	R2	49	33	11	10	8	2	20	11	10	51	-5	46	Roca Media	41	49	15	2	2	1	2.5	1.31	Roca Mala	Lava Andesítica
EG 08	15	R2	82	42	8	10	17	2	20	8	10	57	-2	55	Roca Media	50	82	15	3	2	1	2.5	1.46	Roca Mala	Lava Andesítica
EG 09	37.5	R3	72	16	12	10	13	4	10	12	10	49	-10	39	Roca Mala	34	72	6	3	2	1	2.5	3.85	Roca Mala	Granodiorita
EG 10	75	R4	66	28	14	10	13	7	10	12	10	52	-10	42	Roca Media	37	66	15	1	2.1	1	2.5	3.71	Roca Mala	Dique dacítico
EG 11	0.625	R0	0	30	12	10	3	0	20	12	10	45	-12	33	Roca Mala	28	10	12	1	2.7	1	2.5	0.89	Roca Muy Mala	Granodiorita

4.1.1. ANÁLISIS EN EL SOFTWARE ROCDATA

Usando el software RocData v4.0 se procesó los datos obtenidos en campo (resistencia de la roca intacta, GSI, peso específico y profundidad del túnel) con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia máximos del macizo rocoso mediante los criterios de falla de Hoek-Brown Generalizado (mb, s y a) y Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción interna); los mismos que serán usados para el análisis en RS2.

Tabla 9. Datos de entrada para el RocData

Estación Geomecánica	Resistencia Prom. (MPa)	GSI	Peso específico (MN/m ³)	Cota superficial (msnm)	Cota interior proyectada (msnm)	Profundidad h (m)
EG 01	75.0	67	0.024	2555	2529	26
EG 02	75.0	72	0.024	2801	2528	273
EG 03	15.0	54	0.025	2973	2527	446
EG 04	75.0	70	0.024	3143	2526	617
EG 05	37.5	67	0.024	3286	2525	761
EG 06	37.5	56	0.025	2929	2523	406
EG 07	15.0	41	0.025	2651	2524	128
EG 08	15.0	50	0.025	2765	2521	144
EG 09	37.5	34	0.026	2797	2521	276
EG 10	75.0	37	0.026	2710	2520	190
EG 11	0.625	28	0.026	2583	2519	64

En el software RocData la representación gráfica de la envolvente de rotura según Hoek-Brown viene representada por la curva de color rojo en función de las tensiones principales y su equivalente Mohr-Coulomb de color azul en función de tensiones normales y de corte; por su parte la Línea de Mogi se muestra de color verde, por debajo de las envolventes indicando un modo de rotura frágil.

Estación Geomecánica 01

Comprendida entre las progresivas: Km 0+000 – Km 0+316 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 72 (Roca Buena) y 10 (Roca Media) según el Q de Barton.

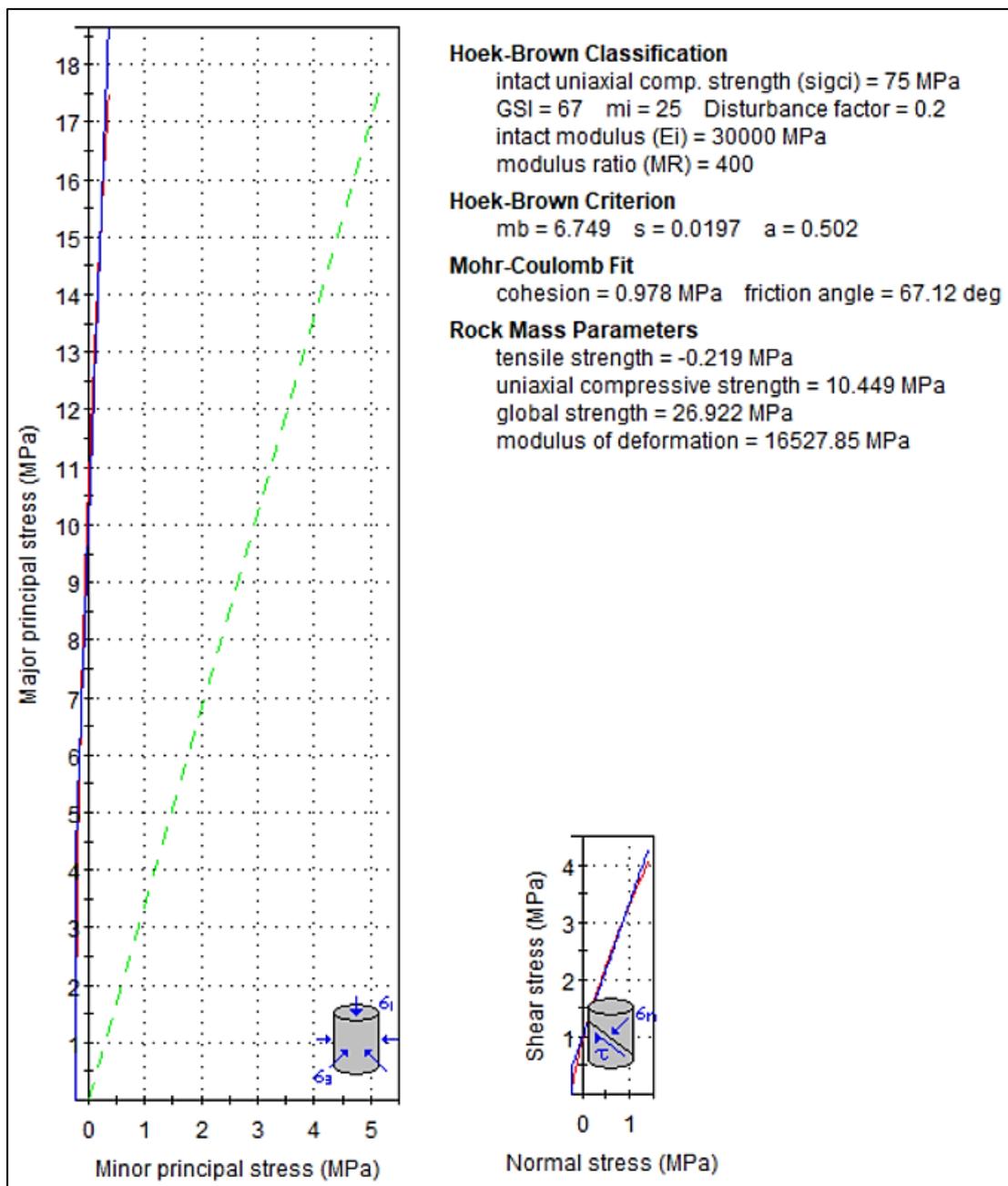


Figura 7. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 01.

Estación Geomecánica 02

Comprendida entre las progresivas: Km 0+316 – Km 0+739 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 77 (Roca Buena) y 20 (Roca mala) según el Q de Barton.

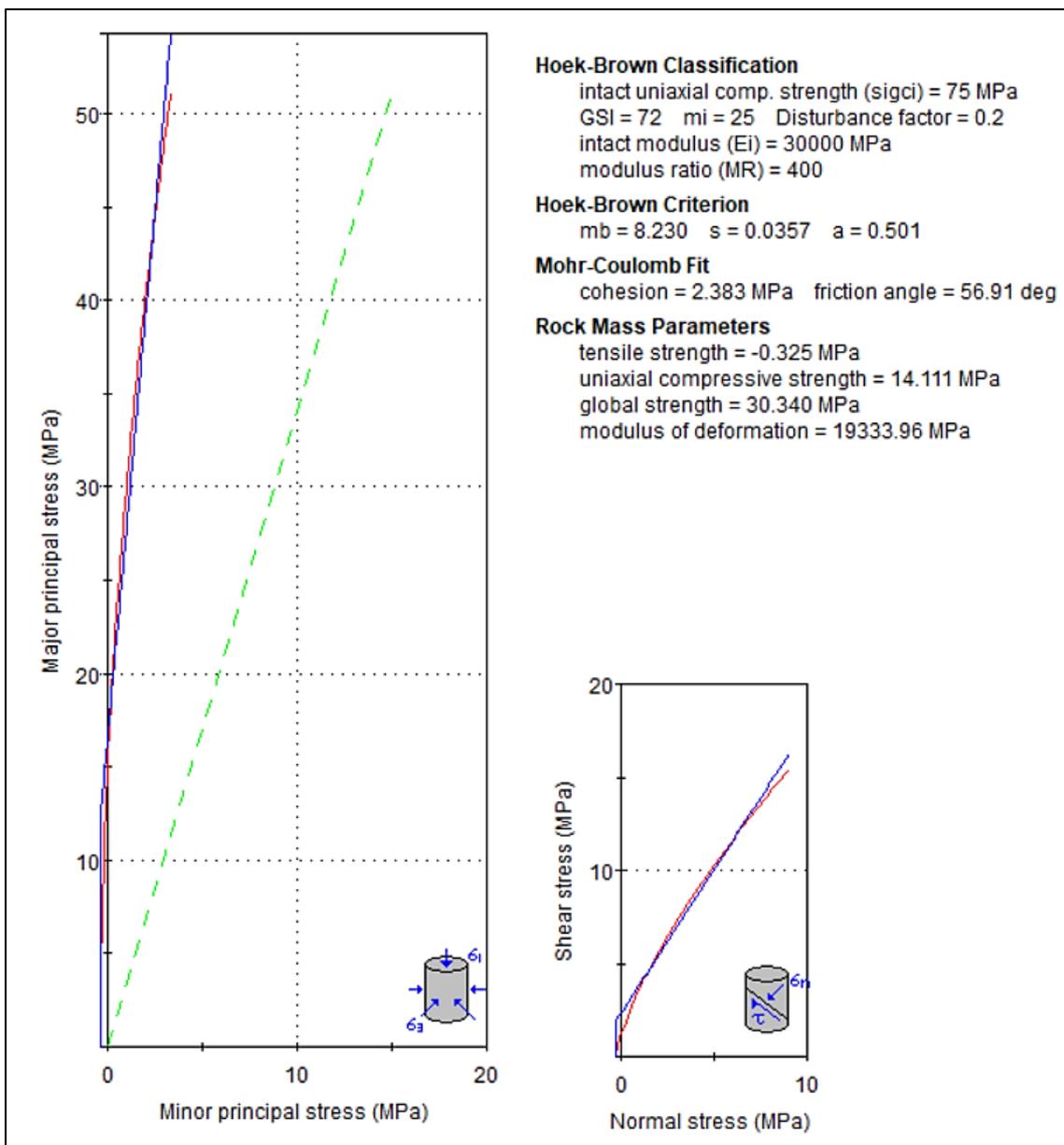


Figura 8. Envolvente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 02.

Estación Geomecánica 03

Comprendida entre las progresivas: Km 0+739 – Km 1+173 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 59 (Roca Media) y 2.95 (Roca muy mala) según el Q de Barton.

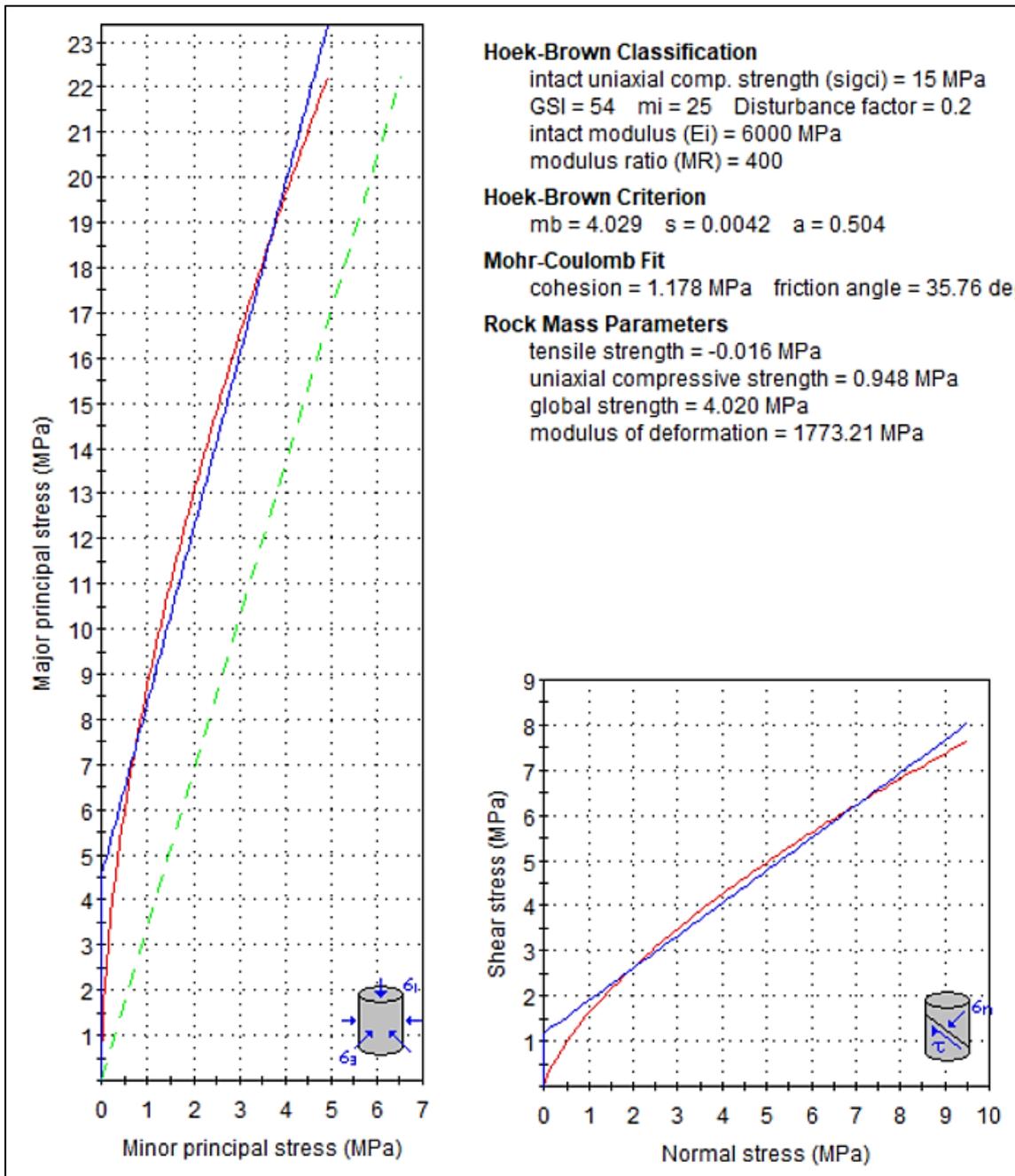


Figura 9. Envoltente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 03.

Estación Geomecánica 04

Comprendida entre las progresivas: Km 1+173 – Km 1+699 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 75 (Roca Buena) y 4.93 (Roca Media) según el Q de Barton.

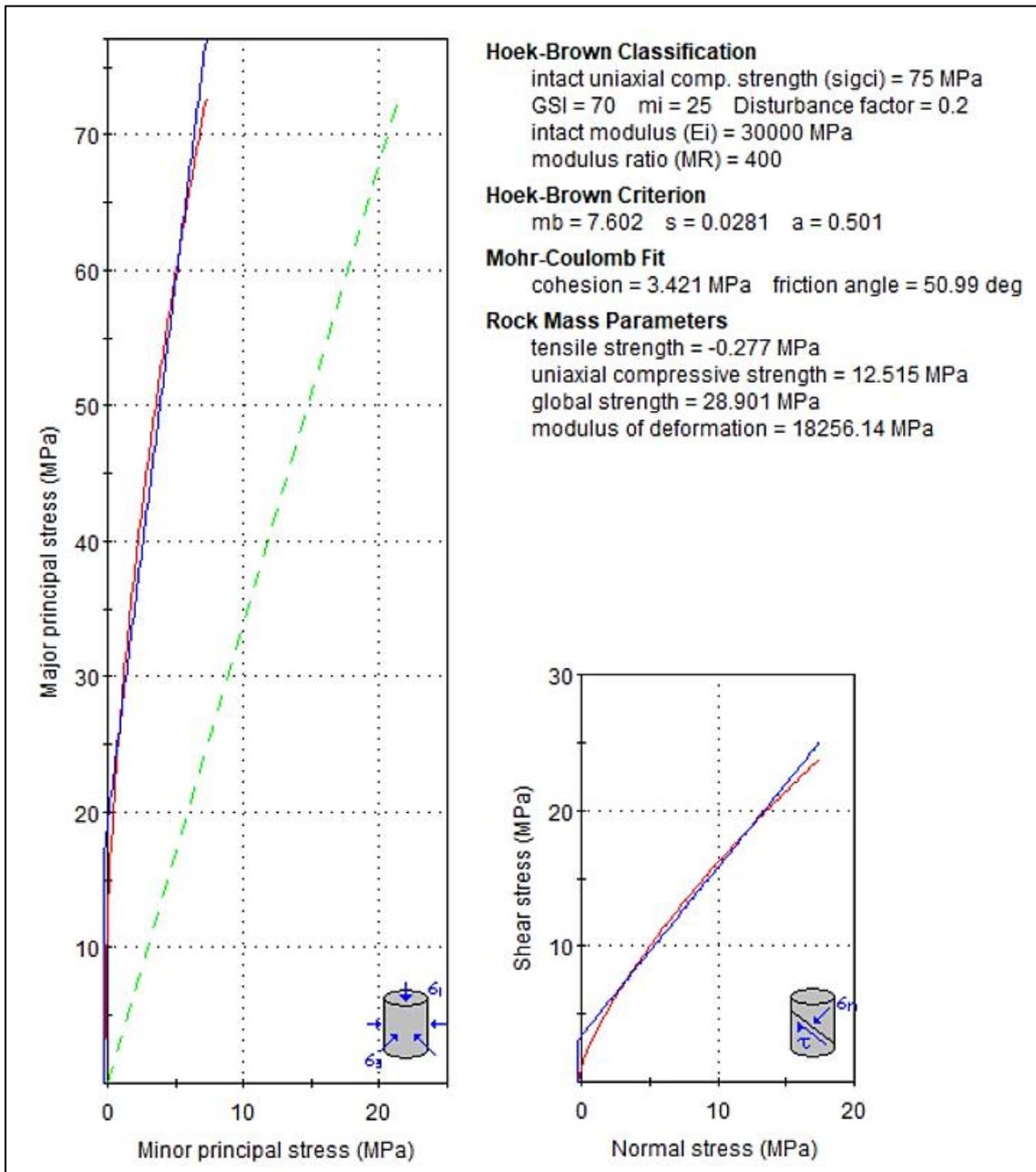


Figura 10. Envolvente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 04.

Estación Geomecánica 05

Comprendida entre las progresivas: Km 1+699 – Km 2+489 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 72 (Roca Buena) y 16.67 (Roca Buena) según el Q de Barton.

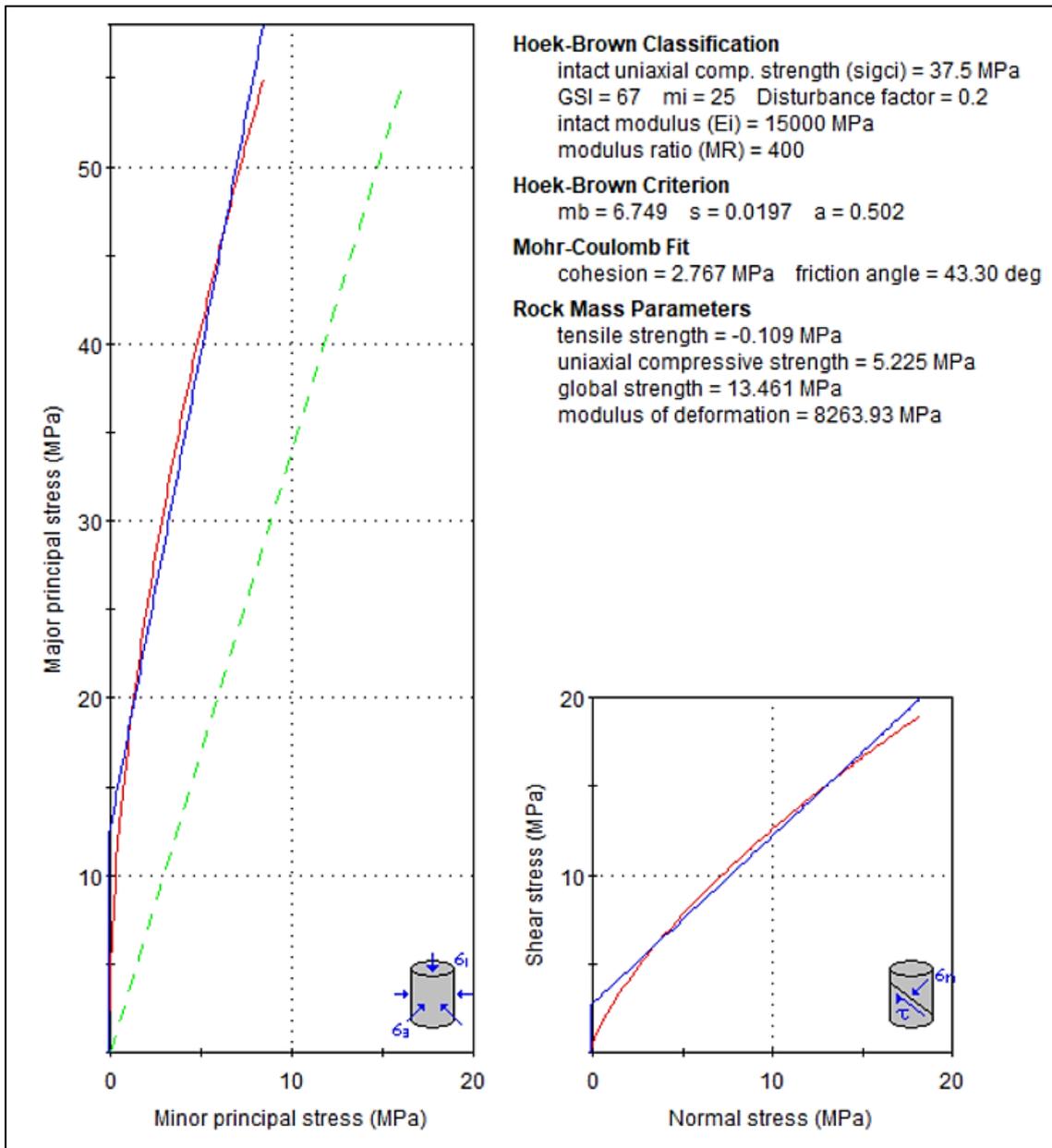


Figura 11. Envoltura de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 05.

Estación Geomecánica 06

Comprendida entre las progresivas: Km 2+489 – Km 3+452 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 61 (Roca Buena) y 3.17 (Roca Mala) según el Q de Barton.

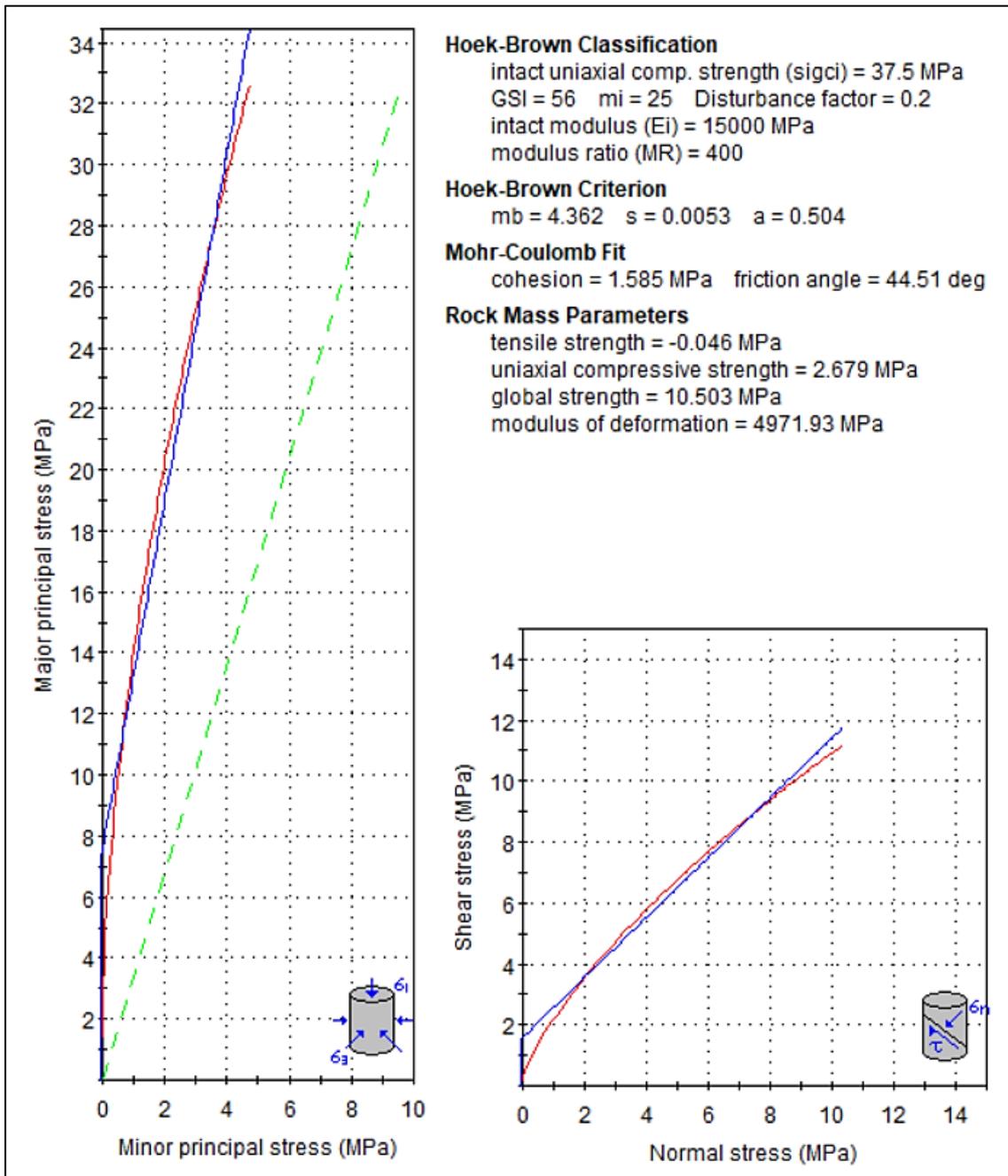


Figura 12. Envolvente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 06.

Estación Geomecánica 07

Comprendida entre las progresivas: Km 3+452 – Km 4+041 y conformada por Lava Andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 46 (Roca Media) y 1.31 (Roca Mala) según el Q de Barton.

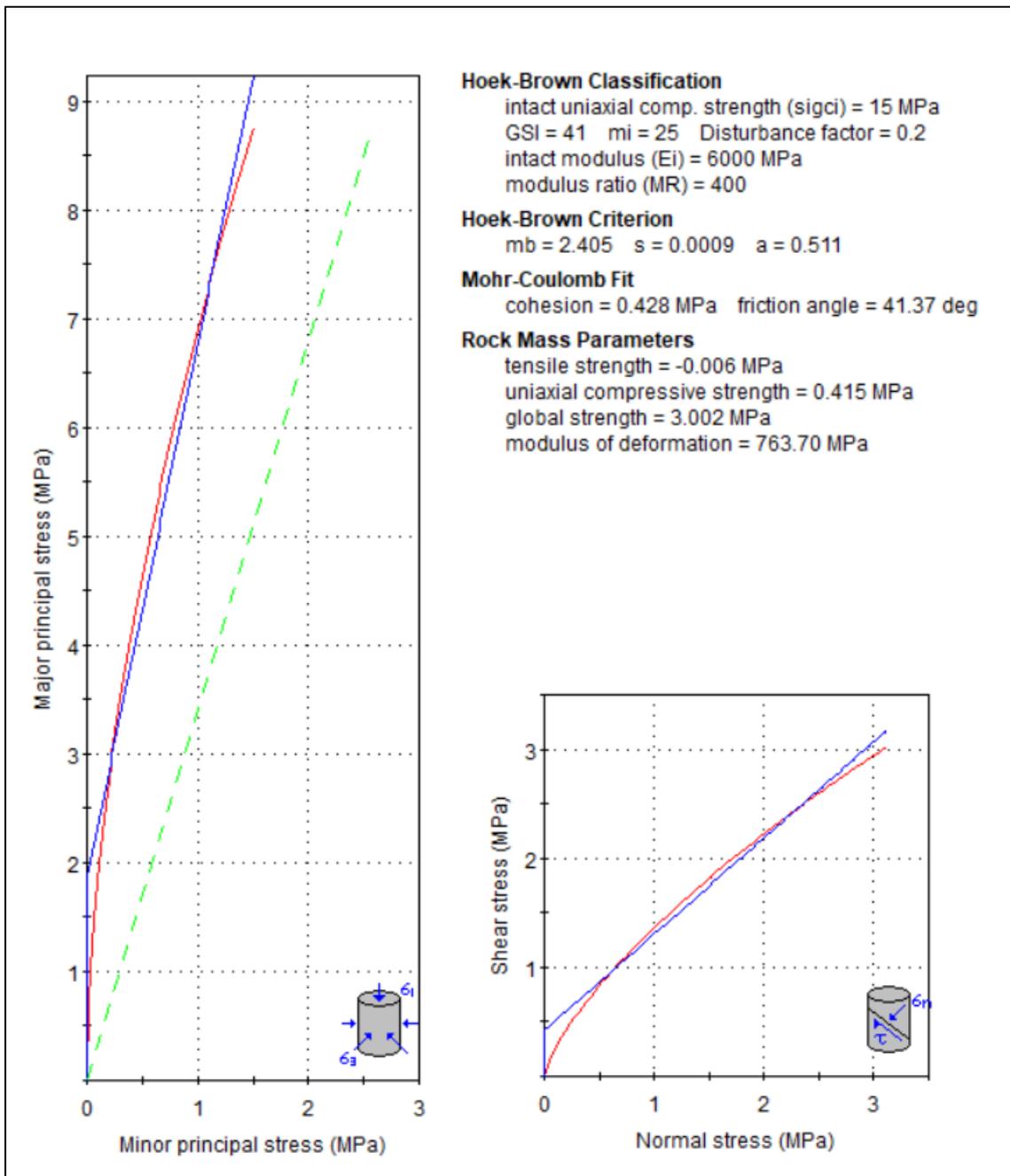


Figura 13. Envolvente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 07.

Estación Geomecánica 08

Comprendida entre las progresivas: Km 4+041 – Km 4+425 y conformada por Lava Andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 55 (Roca Media) y 1.46 (Roca Mala) según el Q de Barton.

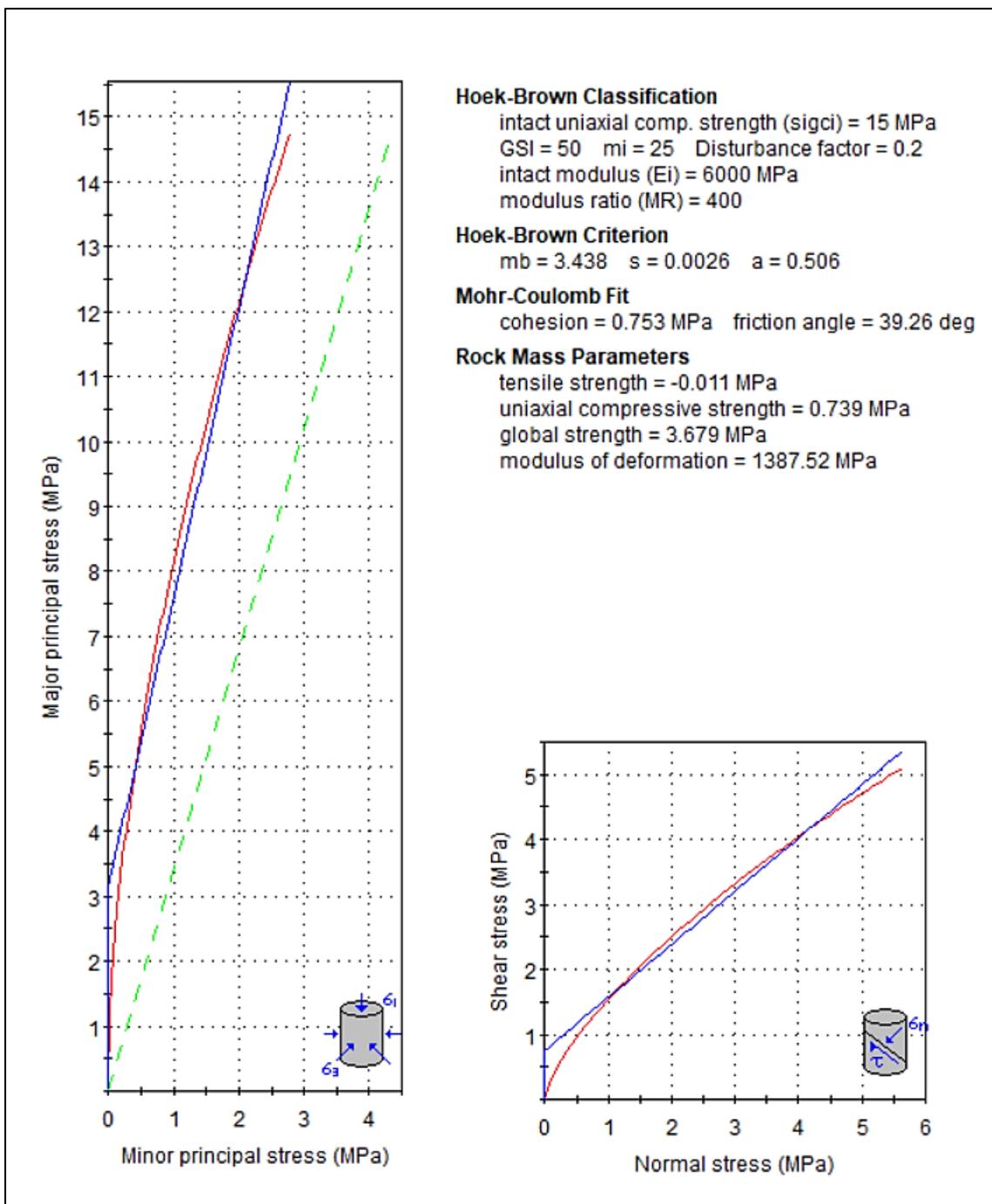


Figura 14. Envoltura de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 08.

Estación Geomecánica 09

Comprendida entre las progresivas: Km 3+425 – Km 4+700 y conformada por Granodiorita, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 39 (Roca Mala) y 3.85 (Roca Mala) según el Q de Barton.

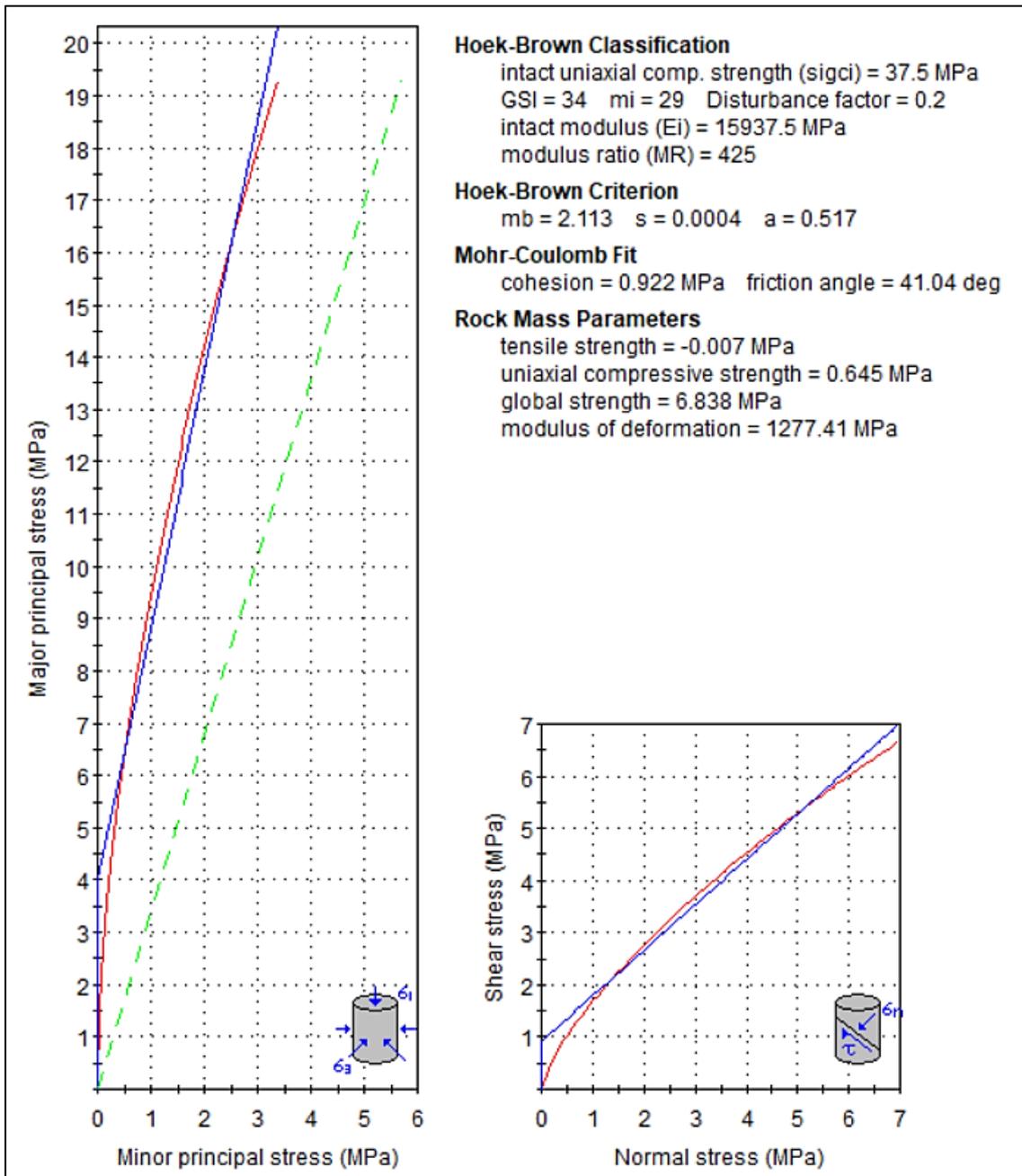


Figura 15. Envolvente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 09.

Estación Geomecánica 10

Comprendida entre las progresivas: Km 4+700 – Km 5+092 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 42 (Roca Media) y 3.71 (Roca Mala) según el Q de Barton.

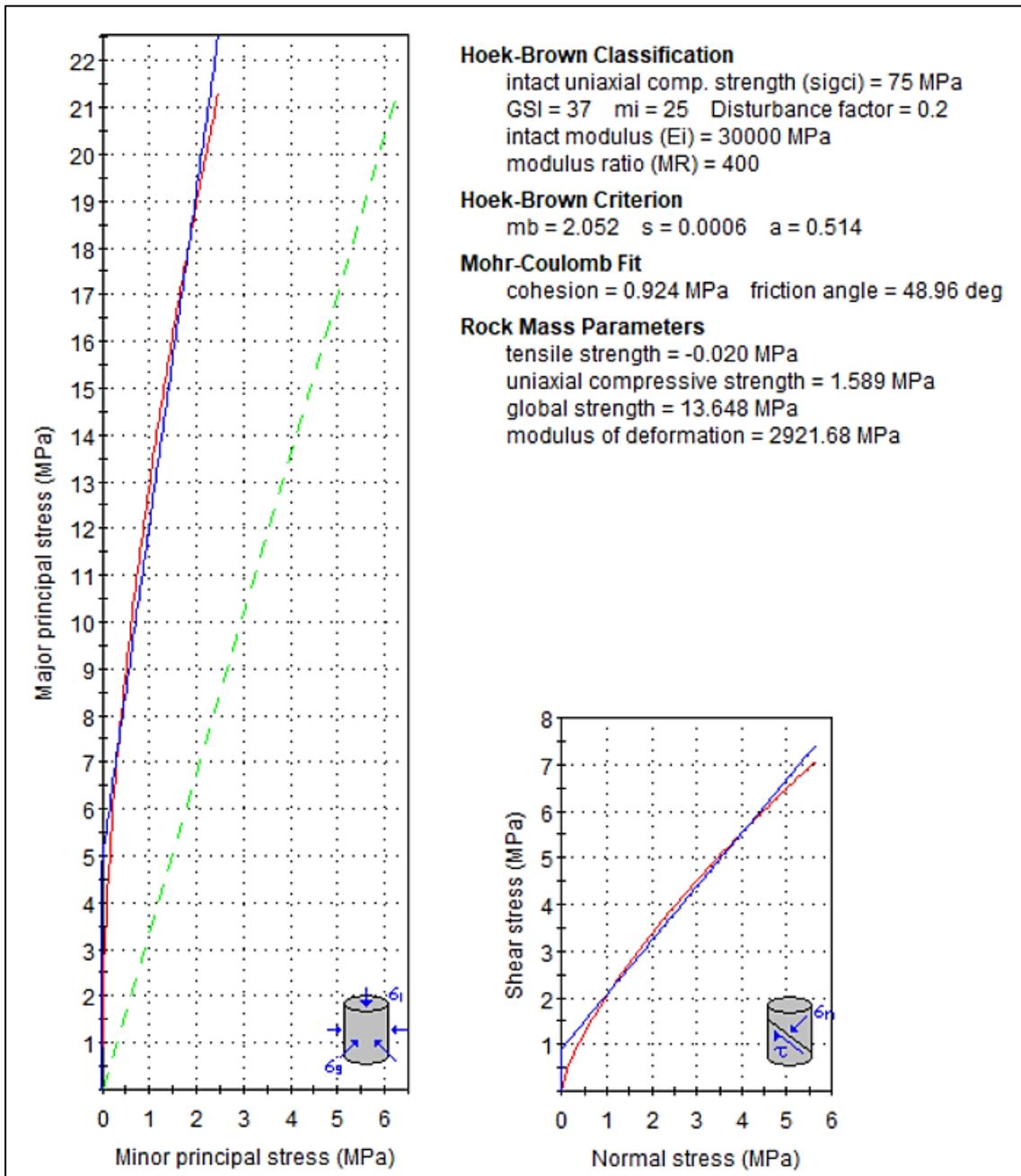


Figura 16. Envoltura de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 10.

Estación Geomecánica 11

Comprendida entre las progresivas: Km 5+092 – Km 5+982 y conformada por Lava andesítica, esta estación geomecánica según el RMR tiene una valoración de 33 (Roca Mala) y 0.89 (Roca Muy Mala) según el Q de Barton.

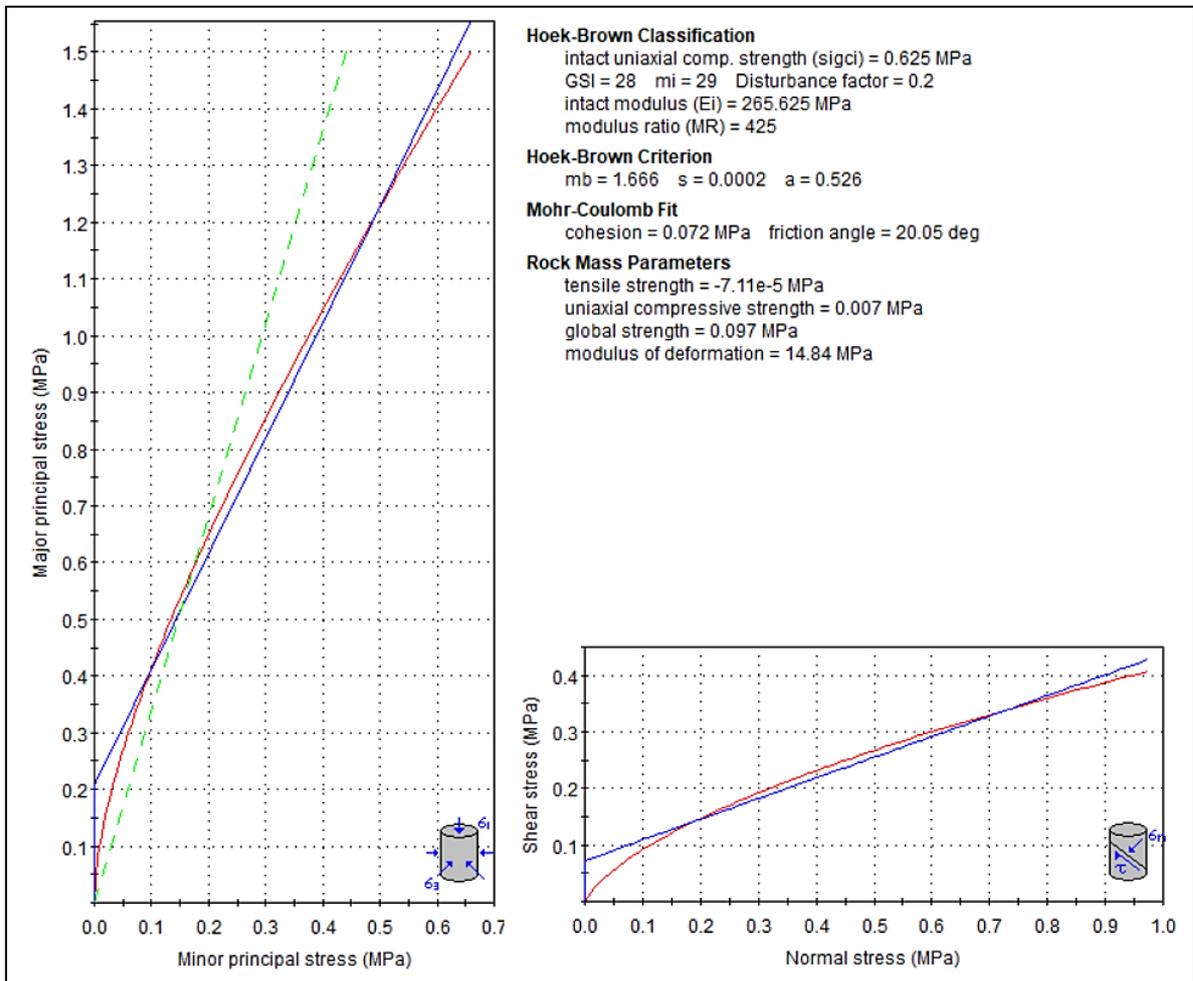


Figura 17. Envolvente de rotura según Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, EG 11.

4.1.2. PRECIPITACIONES EN LA ZONA DE ESTUDIO

Para determinar las precipitaciones en el área de estudio se realizará la transposición según la ecuación de Oswald (Ortiz, O. 2004), desde la estación meteorológica más cercana, la estación Cueva Blanca; para ello se divide la altitud media de la cuenca en la zona de estudio entre la altitud media de la Estación Cueva Blanca, dando como resultado $F_t = 0.868$.

Tabla 10. Estación Meteorológica Cueva Blanca

Estación Meteorológica Cueva Blanca					
Departamento	Lambayeque	Provincia:	Ferreñafe	Distrito:	Incahuasi
Latitud:	6°7'52.68"	Longitud:	79°24'16.2"	Altitud:	3300 msnm.

Fuente: SENAMHI, 2021

Tabla 11. Precipitaciones 2017-2021. Estación Meteorológica Cueva Blanca

Estación Meteorológica Cueva Blanca												
Precipitación (mm) / Periodo 2017-2021												
Periodo	Año Anterior							Año Posterior				
	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
2017-2018	8.8	4.8	39.1	26.8	51.7	28.1	22.5	134.4	59.3	98.2	115.8	221.6
2018-2019	14.1	8.4	2.9	8.9	40.8	100.2	59.2	66.0	169.8	118.4	208.2	50.6
2019-2020	6.0	38.4	7.6	0.0	66.3	71.7	100.7	29.3	40.8	55.2	153.1	37.6
2020-2021	44.9	30.8	5.9	47.3	37.4	40.0	172.8	86.3	58.3	248.5	101.2	138.2

Tabla 12. Factor de transposición

Estación Cueva Blanca - al Túnel Huallabamba				
Estación Cueva Blanca	Precipitación a la altitud H_1 (enero 2018)		PP ₁	134.4 mm
	Altitud media de la estación meteorológica		H ₁	3300 msnm
Túnel Huallabamba	Precipitación a la altitud H		PP	116.6 mm
	Altitud media de la cuenca en la zona de estudio		H	2864 msnm
Factor de transposición	Ft		H/H₁	0.868

Para determinar las precipitaciones en la zona de estudio se multiplica el factor de trasposición ($Ft=0.868$) por cada valor de precipitación de la estación Cueva Blanca; consiguiendo así nuevos valores de precipitación en la zona de estudio, los mismos que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Precipitaciones 2017-2021. Túnel de Huallabamba

Transposición de Precipitación: Estación Cueva Blanca - Al Túnel Huallabamba																
Precipitación (mm) / Periodo 2017-2021																
Periodo	Año Anterior							Año Posterior					Total PP Anual	Promedio PP Anual	PP Total Oct-Abril	% de PP Total Oct-Abril
	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May				
Precipitación 2017-2018	7.6	4.2	33.9	23.3	44.9	24.4	19.5	116.6	51.5	85.2	100.5	192.3	703.9	58.7	442.6	62.88%
Precipitación 2018-2019	12.2	7.3	2.5	7.7	35.4	87.0	51.4	57.3	147.4	102.8	180.7	43.9	735.5	61.3	661.8	89.98%
Precipitación 2019-2020	5.2	33.3	6.6	0.0	57.5	62.2	87.4	25.4	35.4	47.9	132.9	32.6	526.5	43.9	448.8	85.23%
Precipitación 2020-2021	39.0	26.7	5.1	41.1	32.5	34.7	150.0	74.9	50.6	215.7	87.8	12.0	770.0	64.2	646.1	83.91%

Periodo (2017-2021)	Año Anterior							Año Posterior					Data (2017-2021)			
	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May				
Promedio	16.0	17.9	12.0	18.0	42.6	52.1	77.1	68.6	71.2	112.9	125.5	70.2	684.0	57.0	549.8	80.50%
Mediana	9.9	17.0	5.9	15.5	40.1	48.5	69.4	66.1	51.0	94.0	116.7	38.3	719.7	60.0	547.5	84.57%
Desviación estándar	15.6	14.3	14.7	18.2	11.3	28.2	56.0	38.0	51.3	72.2	41.4	82.5	108.4	9.0	120.5	12.03%
Máximo	39.0	33.3	33.9	41.1	57.5	87.0	150.0	116.6	147.4	215.7	180.7	192.3	770.0	64.2	661.8	89.98%
Mínimo	5.2	4.2	2.5	0.0	32.5	24.4	19.5	25.4	35.4	47.9	87.8	12.0	526.5	43.9	442.6	62.88%

Promedio de precipitaciones anuales (X)	57 mm
Desviación estándar (DS)	9 mm
Línea de Precipitación Referencial Conservadora (X+DS):	66 mm

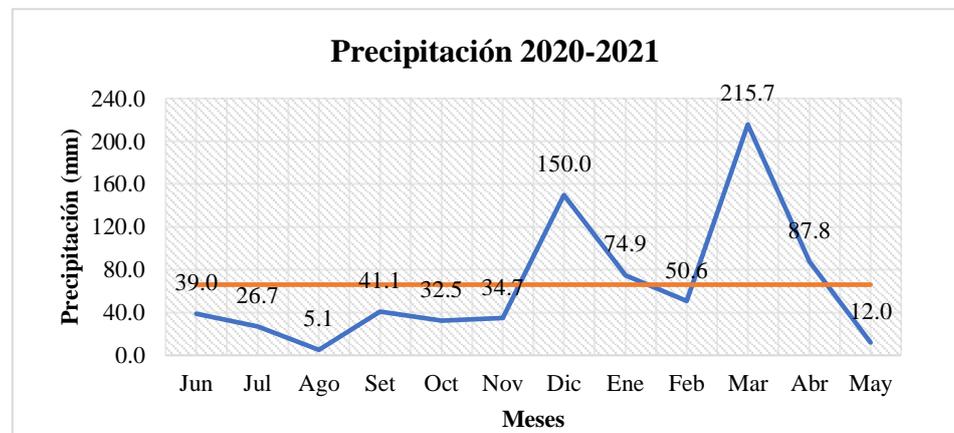
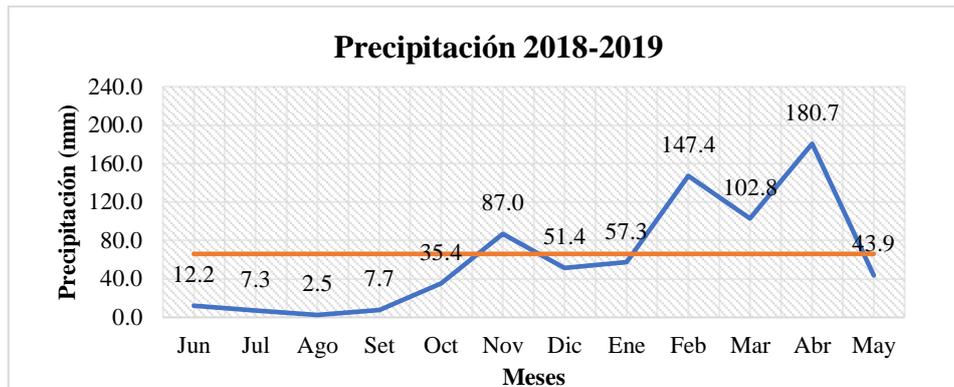
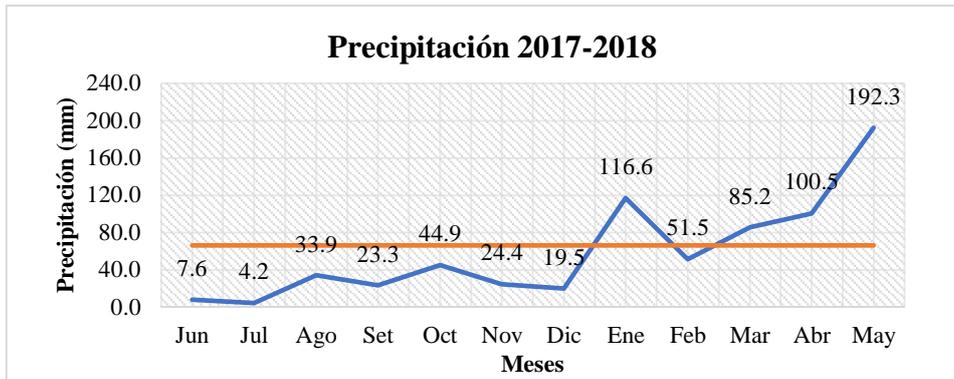


Figura 18. Curvas de precipitación anual mensualizadas 2017 - 2021

4.1.3. ANÁLISIS EN EL SOFTWARE RS2

Para el análisis en RS2 se determinó el coeficiente sísmico horizontal y vertical en el software Loadcap.

Tabla 14. Zona Sísmica, Motupe - Lambayeque

Región	Provincia	Distrito	Zona Sísmica
Lambayeque	Lambayeque	Motupe	4

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019.

Tabla 15. Aceleración máxima por zonas

Factores de Zona "Z"	
Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019.

Según la Tabla 15 el área donde se realizará el Túnel de Huallabamba está en la zona Sísmica 4, cuyo coeficiente de aceleración máxima es igual a 0.45; con ello en el software Loadcap determinamos el coeficiente sísmico horizontal (Kh) y vertical (Kv).

The screenshot shows the 'Loadcap' software interface for calculating seismic coefficients. The 'Acción sísmica' (Seismic Action) section is active, displaying the following settings:

- Tipo terreno** (Soil type): Roca (Rock)
- Corrección parámetros Terzaghi** (Terzaghi parameter correction):
 - Corrección cohesión (2/3c)
 - Corrección Ángulo de rozamiento interno (arctg(0.67*tan(Fi)))
 - Ng=2*(Nq-1)*tan(Fi/2)
 - Factor profundidad=1
- Acción sísmica** (Seismic Action):
 - Cálculo coeficientes sísmicos** (Calculate seismic coefficients): Enabled
 - Aceleración máxima (ag/g)** (Maximum acceleration): 0.45
 - Magnitud** (Magnitude): M 0
 - Coeficientes sísmicos** (Seismic coefficients):
 - Coeficiente intensidad sísmica terreno** (Soil seismic intensity coefficient): Khk 0.225
 - Coeficiente intensidad sísmica estructura** (Structure seismic intensity coefficient): Khi 0.1125
 - Efecto sísmico según** (Seismic effect according to): Ningún efecto sísmico (No seismic effect)

The values for Khk (0.225) and Khi (0.1125) are highlighted with a red box in the original image.

Figura 19. Cálculo de los coeficientes sísmicos en Loadcap

Por lo tanto, los coeficientes sísmicos horizontal (K_h) y vertical (K_v) para la zona de trabajo son 0.225 y 0.1125 respectivamente.

Otro dato importante para el análisis en RS2 es conocer el estado tensional natural; para ello, se utilizó el planteamiento de Sheorey ($k = 0.25 + 7Eh (0.001+1/h)$) y se determinó la razón de esfuerzos (k).

Tabla 16. Razón de esfuerzos

Estación Geomecánica	Profundidad h (m)	Módulo de Elasticidad Eh (Mpa)	k
EG 01	26	16527.90	4.82
EG 02	273	19334.00	0.88
EG 03	446	1773.21	0.29
EG 04	617	18256.10	0.59
EG 05	761	8263.93	0.38
EG 06	406	4971.93	0.37
EG 07	128	763.70	0.30
EG 08	244	1387.52	0.30
EG 09	276	1277.41	0.29
EG 10	190	2921.68	0.38
EG 11	64	14.84	0.25

Los datos analizados en el software RS2 fueron la distribución de los esfuerzos y la trayectoria de los desplazamientos máximos, ambos parámetros controlan la estabilidad del túnel.

El esfuerzo vertical in situ fue determinado en RS2 considerando la columna litológica que se encuentra por encima del techo del túnel. Para el caso de la malla de elementos finitos ésta se consideró de forma triangular con tres nodos.

Estación Geomecánica 01

La Figura 19 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo de 0.6 MPa y máximo de 11.4 MPa; además se observa que la concentración es mayor en el techo por lo que se podría generar zonas inestables y producirse caída de bloques.

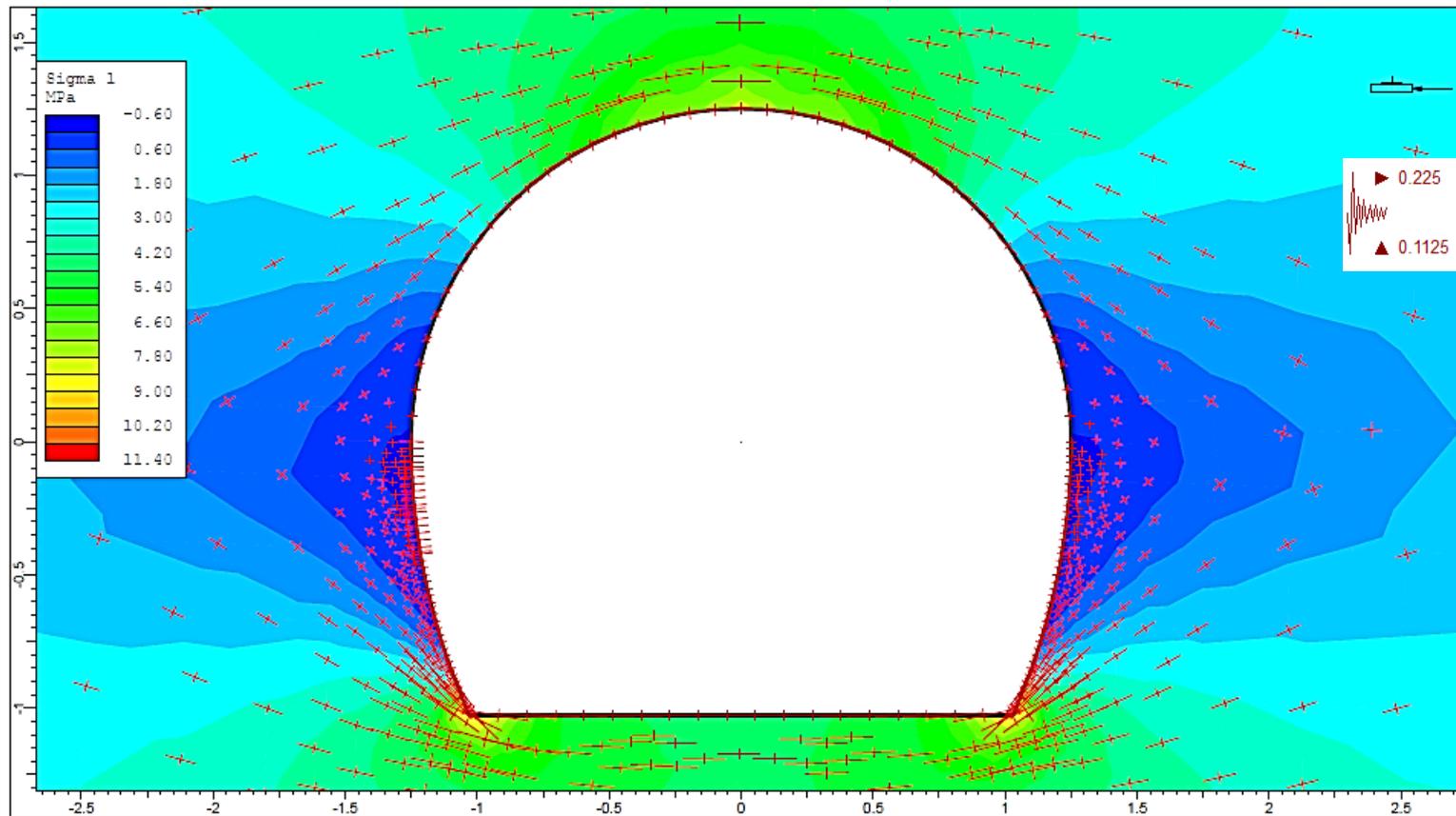


Figura 20. EG 01. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 20 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 0.4mm.

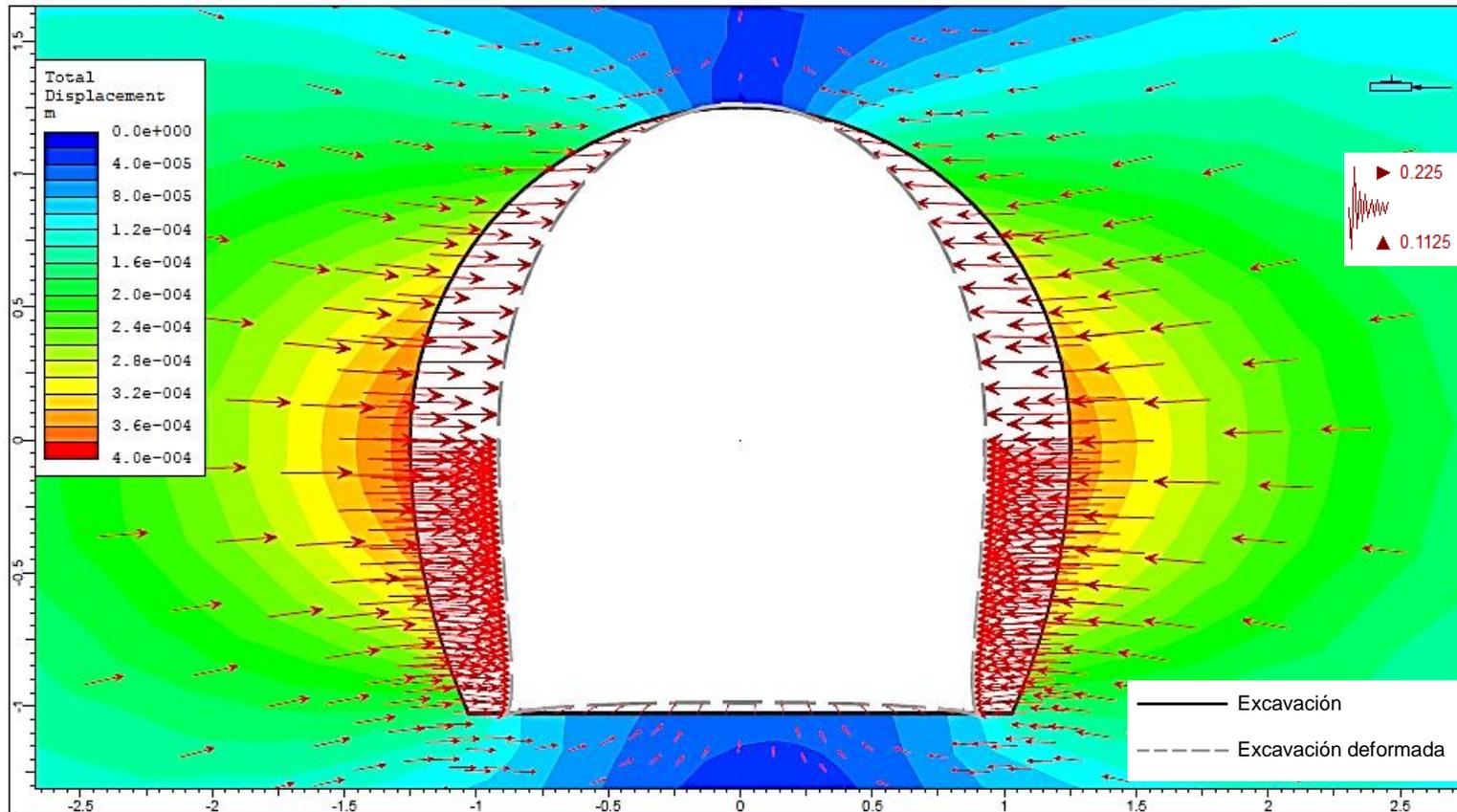


Figura 21. EG 01. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 02

La Figura 21 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo de 3 MPa y máximo de 33 MPa; además se observa que la concentración es mayor en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

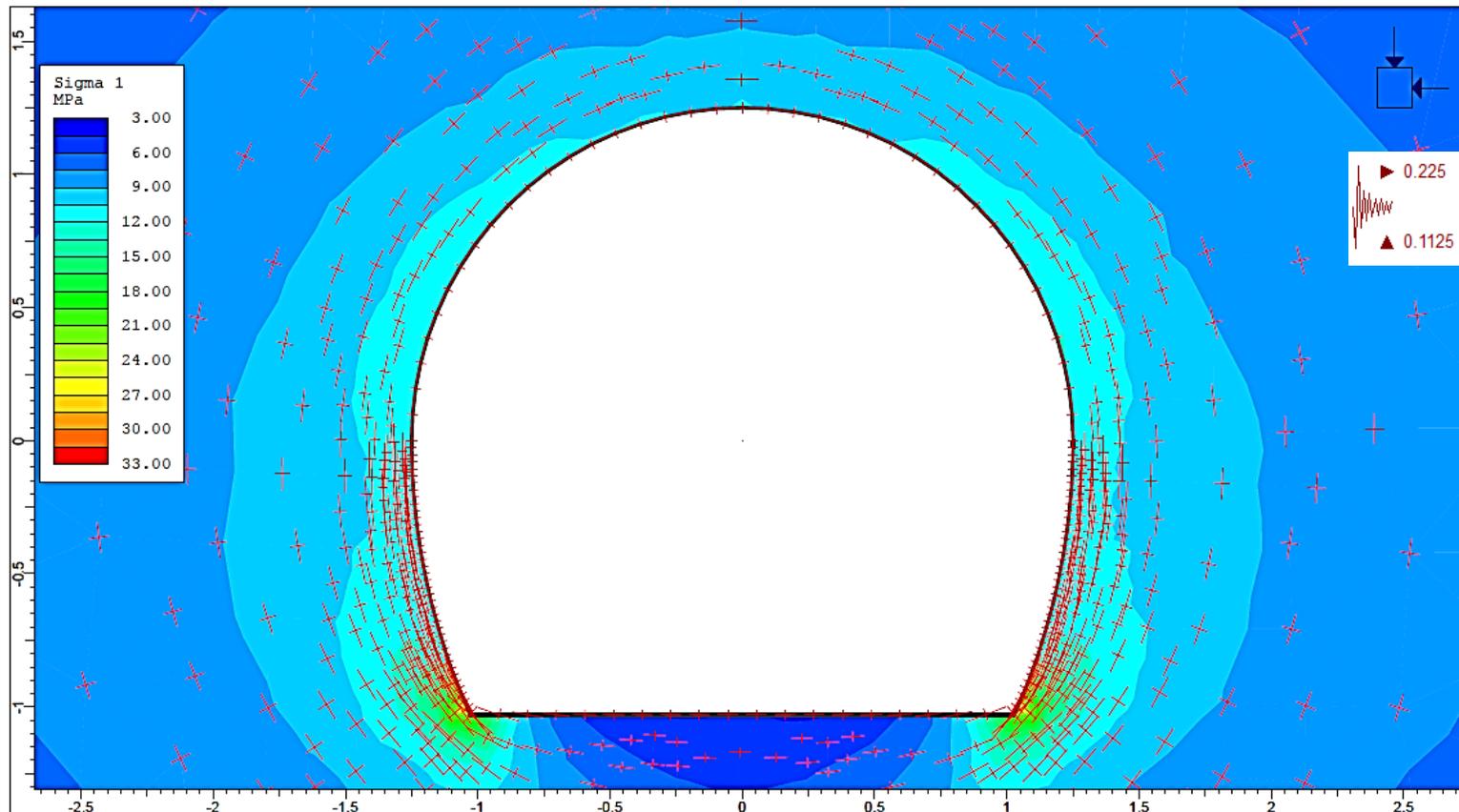


Figura 22. EG 02. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 22 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 0.7mm.

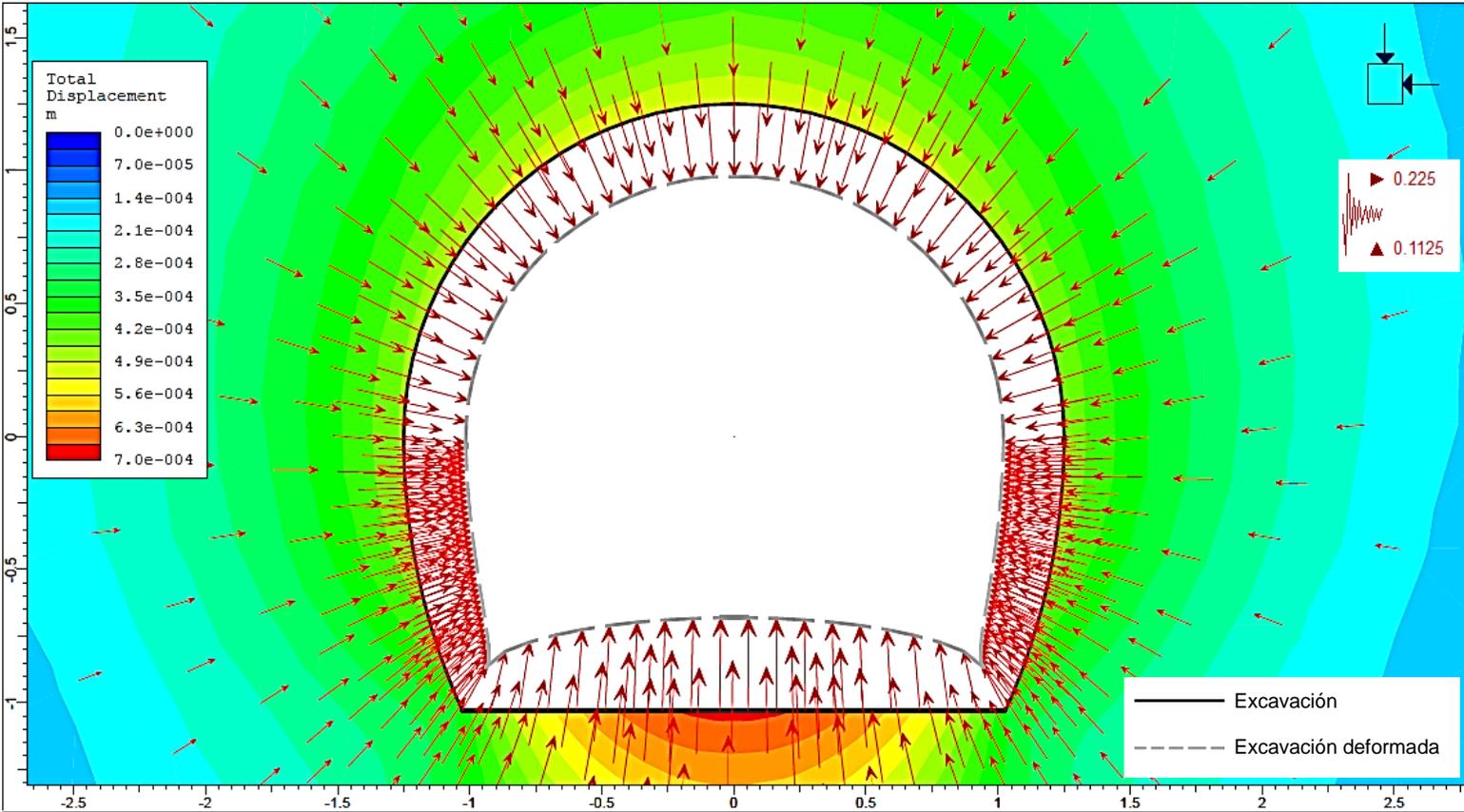


Figura 23. EG 02. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 03

La Figura 23 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo de 2 MPa y máximo de 38 MPa; además se observa que la concentración es mayor en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

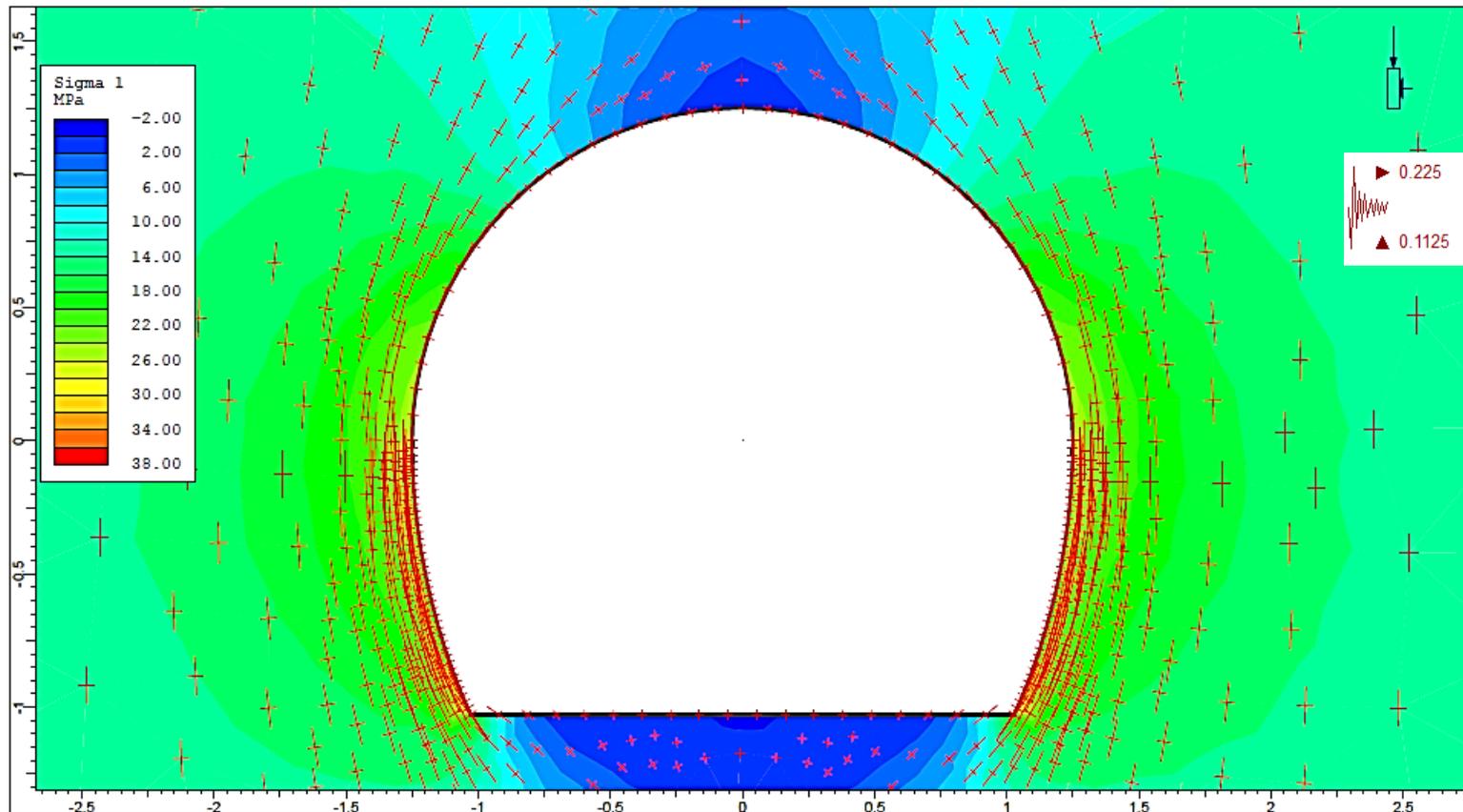


Figura 24.EG 03. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 24 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 14 mm. en el piso del túnel.

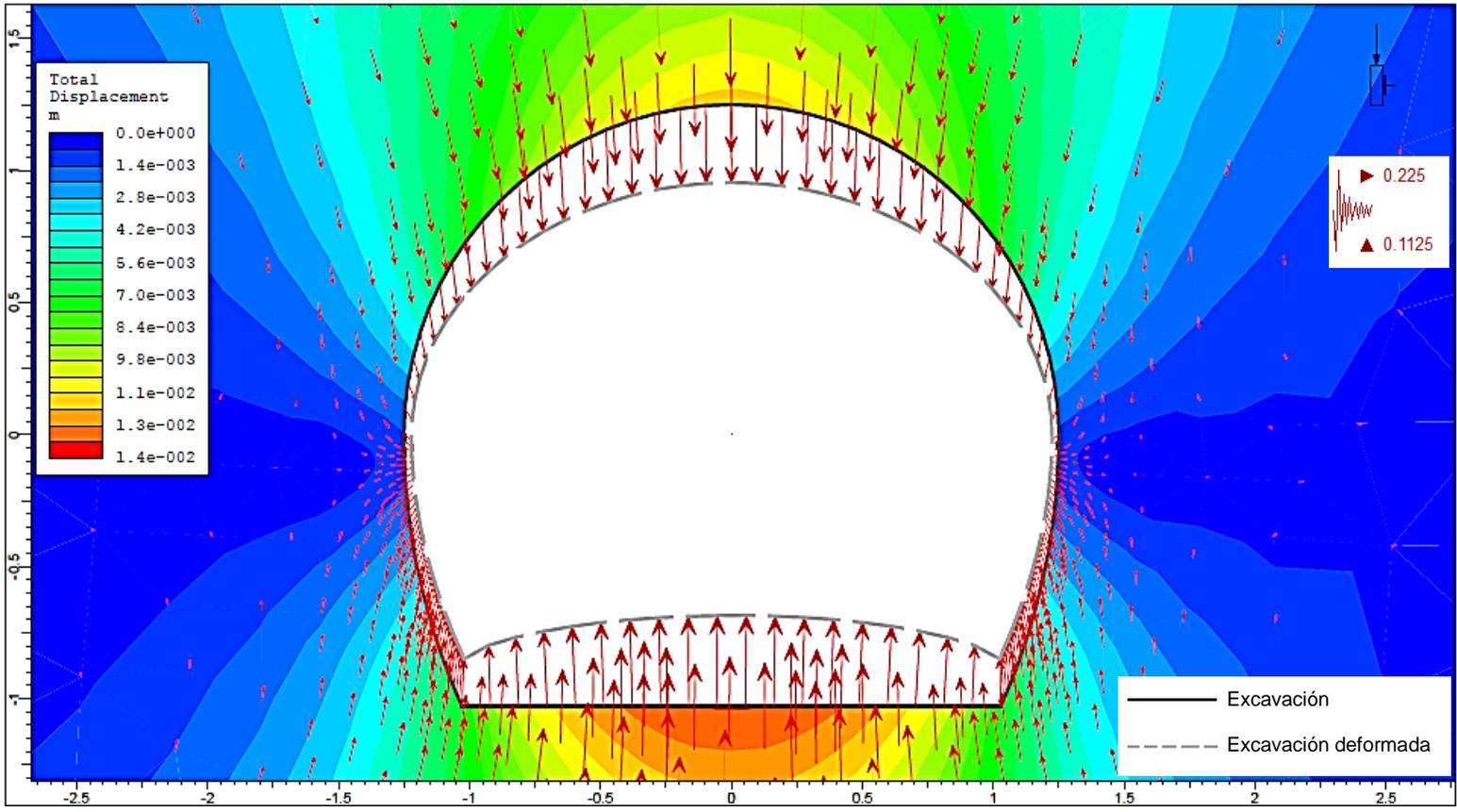


Figura 25. EG 03. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 04

La Figura 25 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo de 6 MPa y máximo de 60 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

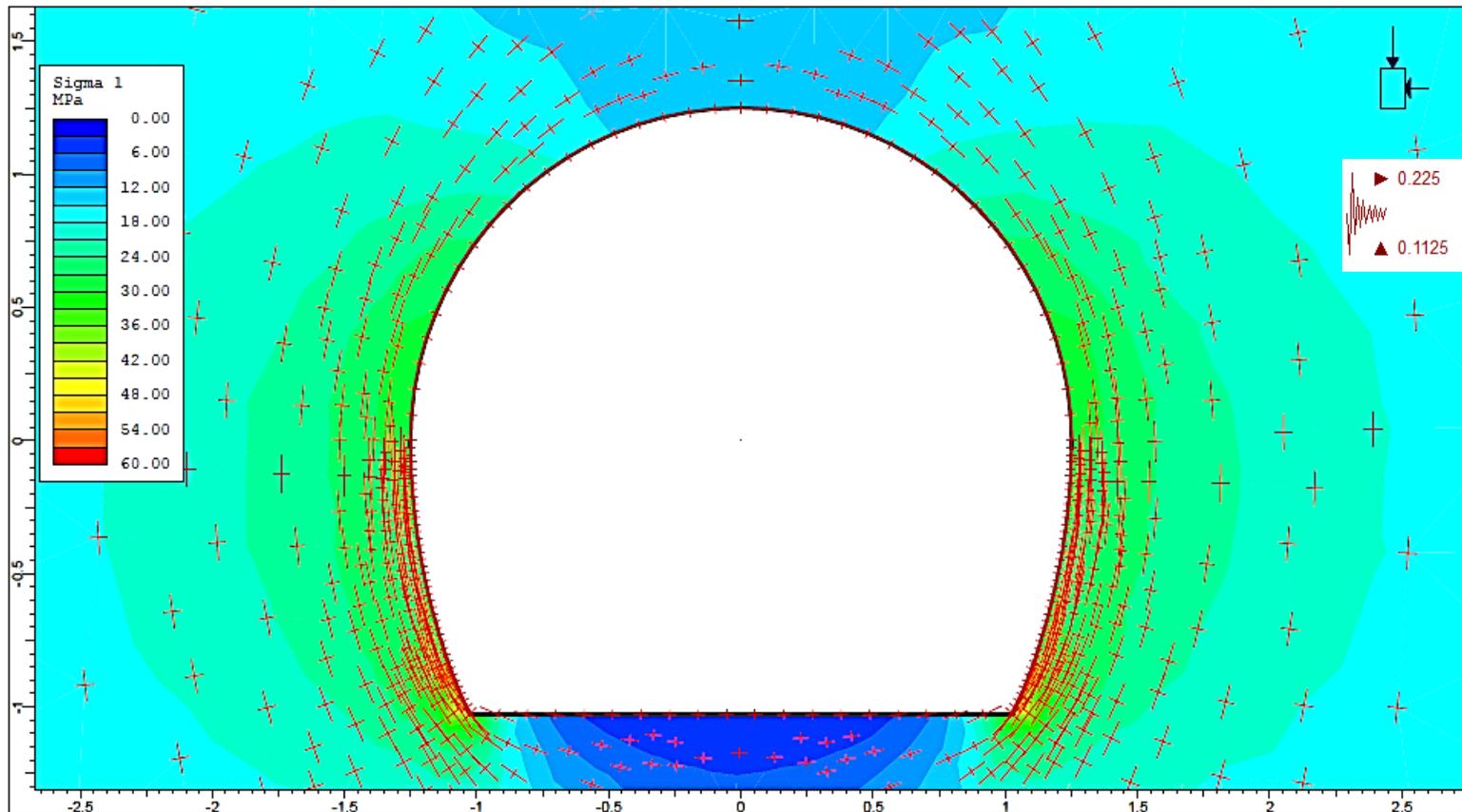


Figura 26.EG 04. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 26 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 1.7mm.

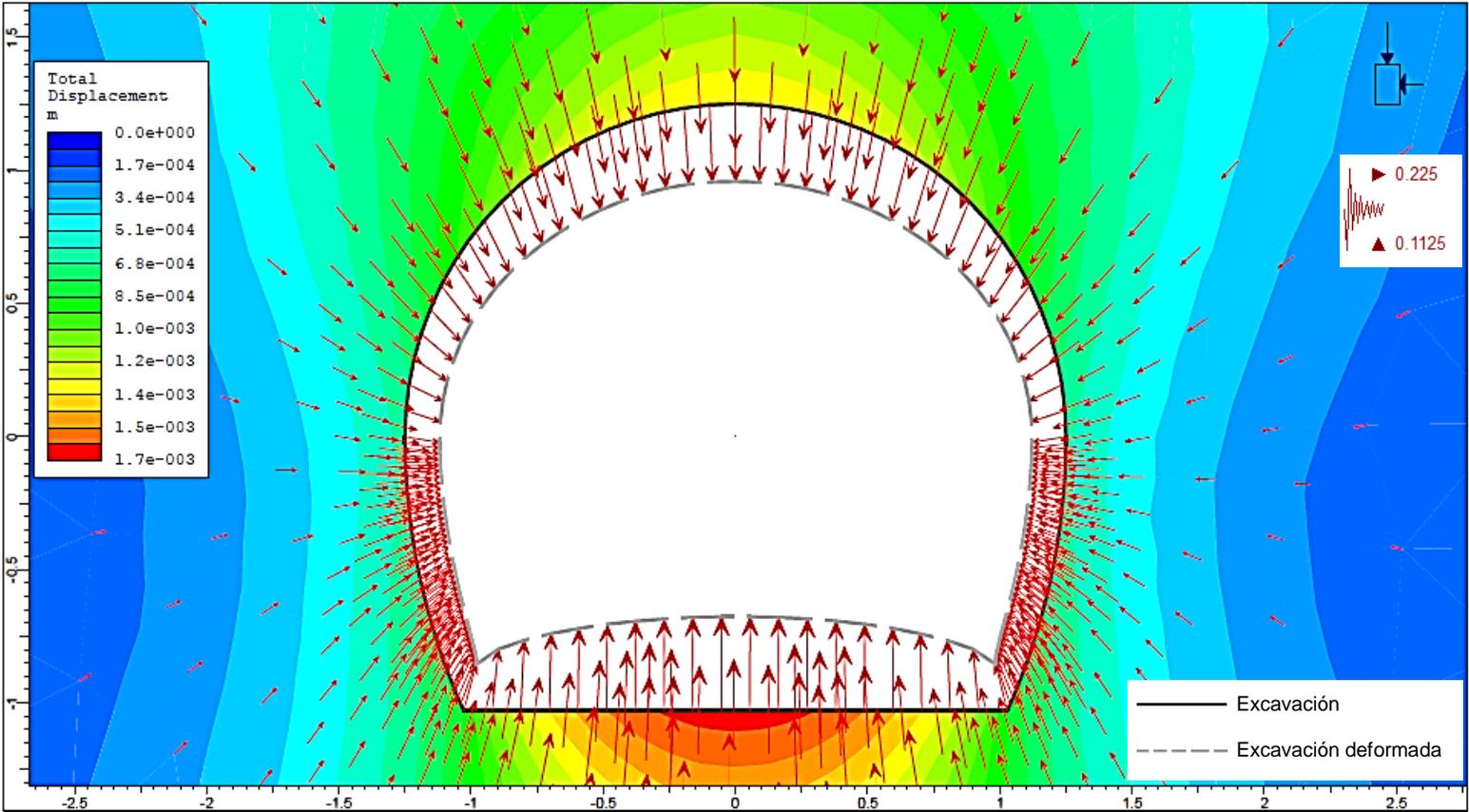


Figura 27. EG 04. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 05

La Figura 27 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo de 3 MPa y máximo de 67 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

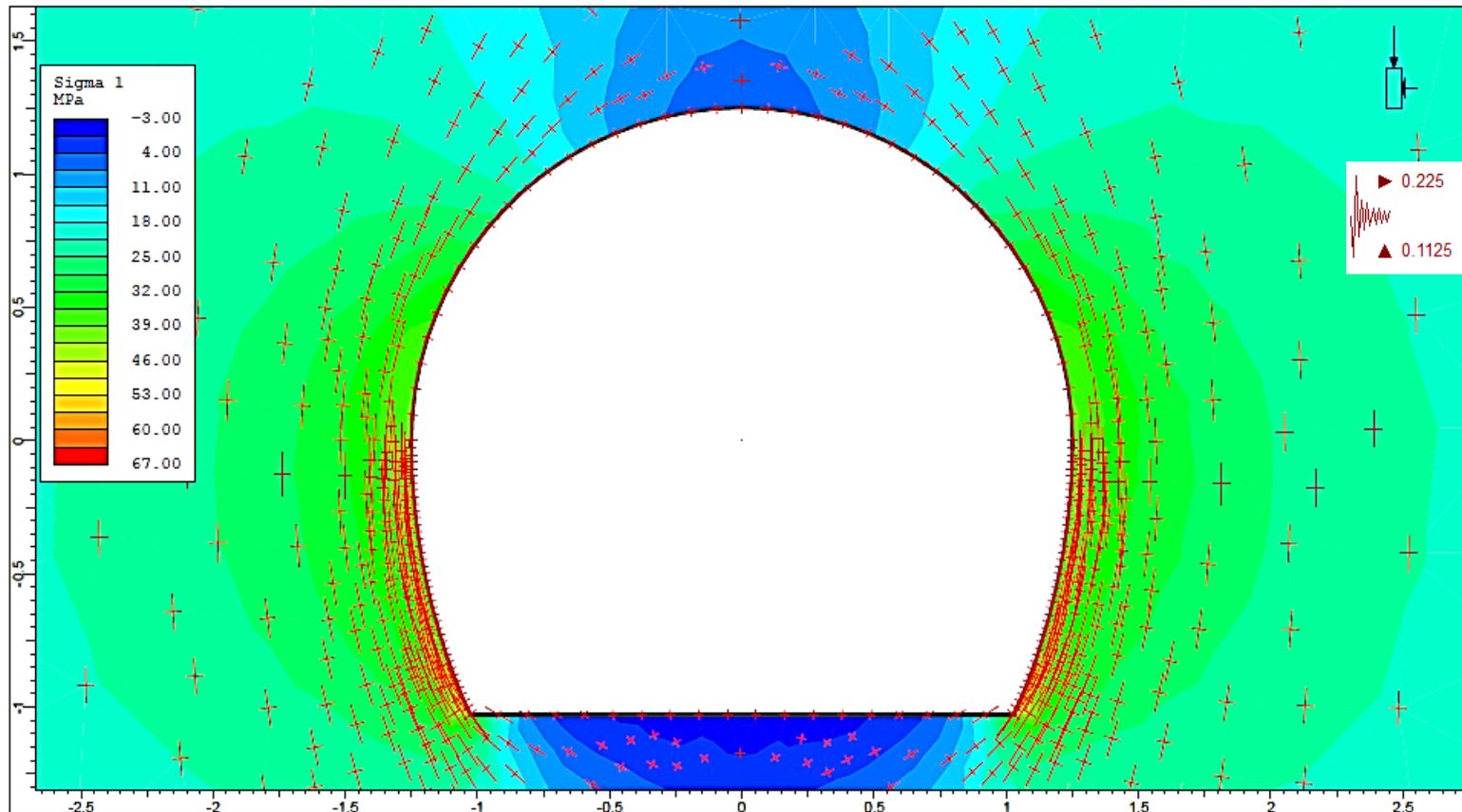


Figura 28. EG 05. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 28 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 5 mm.

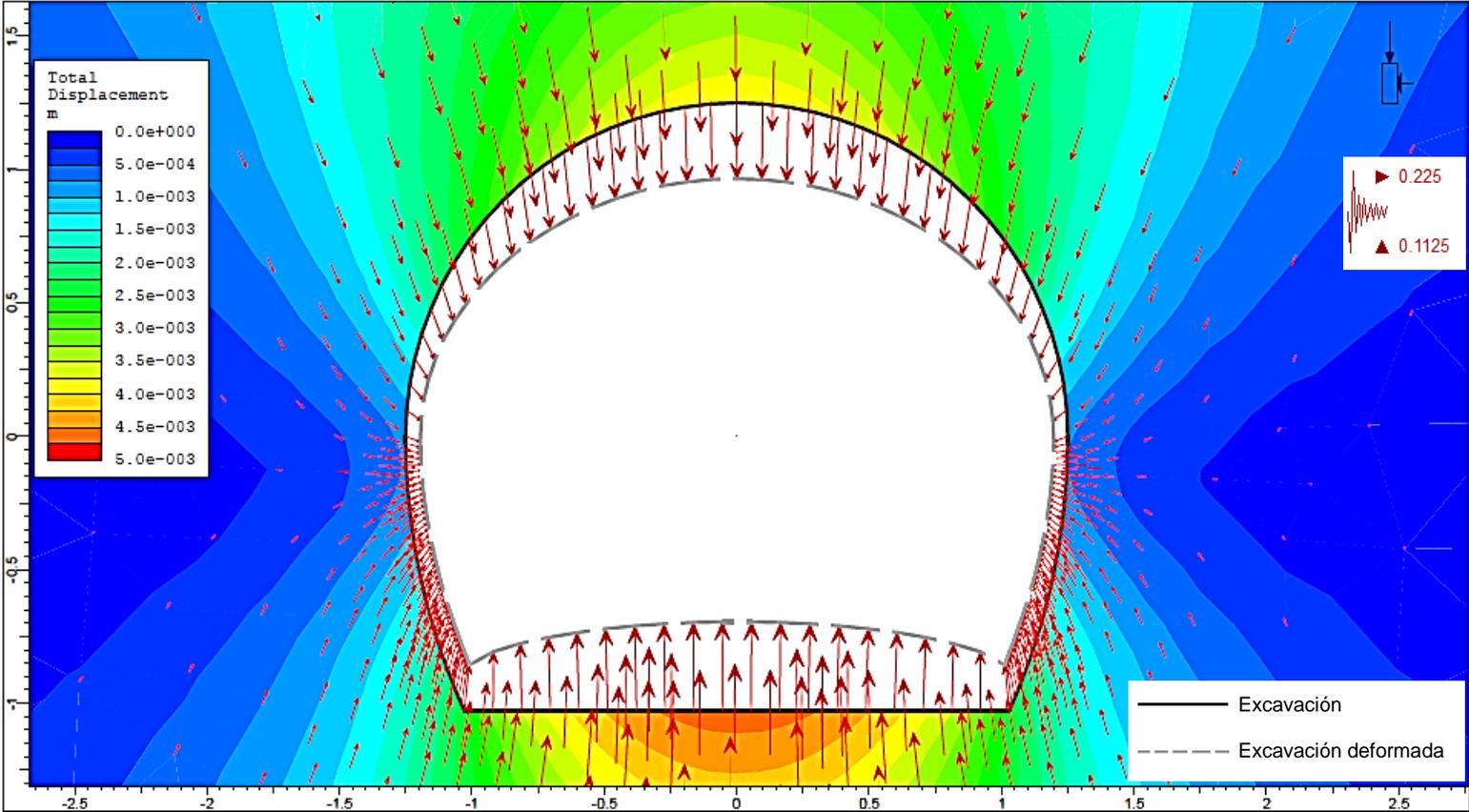


Figura 29. EG 05. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 06

La Figura 29 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con un valor mínimo de 2 MPa y máximo de 38 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

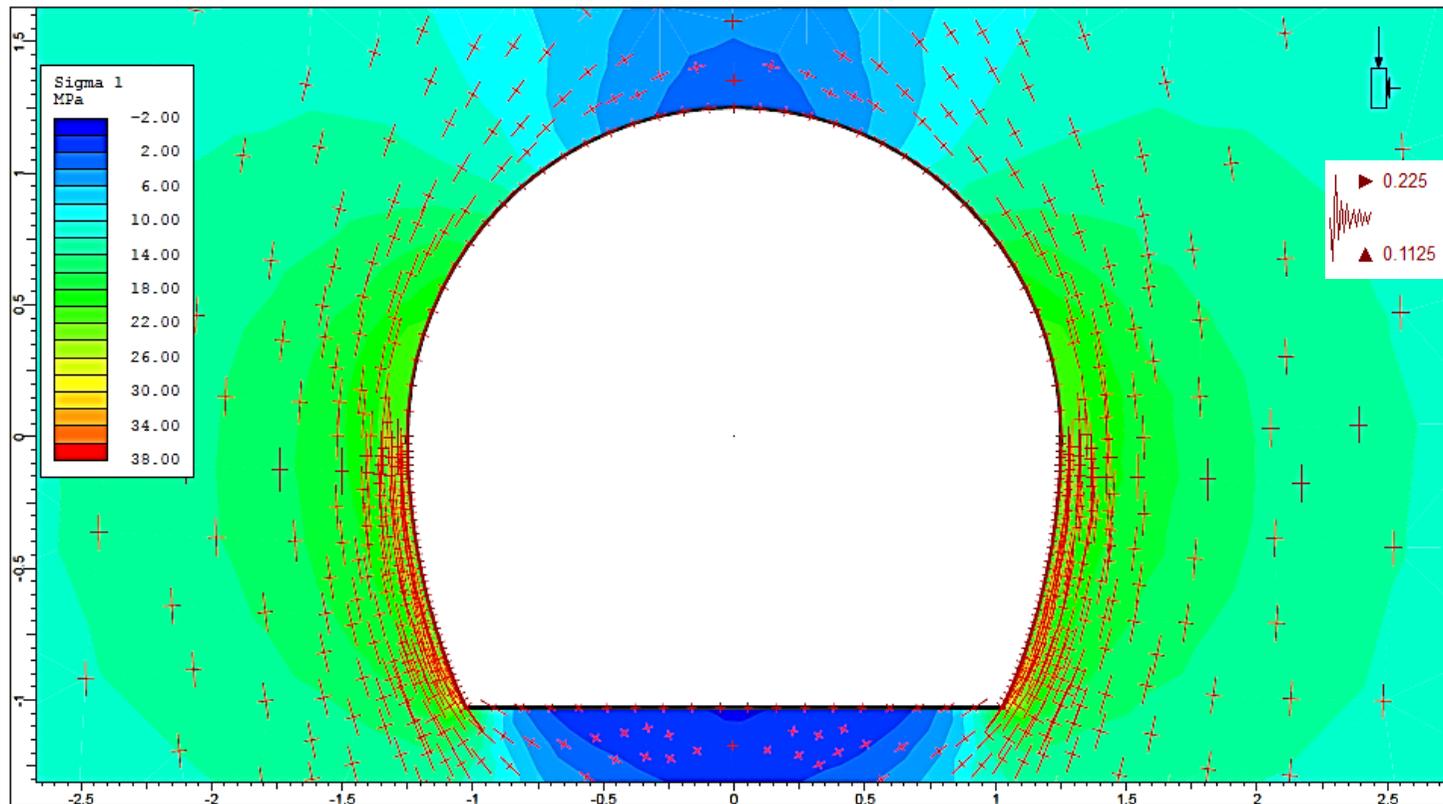


Figura 30.EG 06. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 30 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 5 mm.

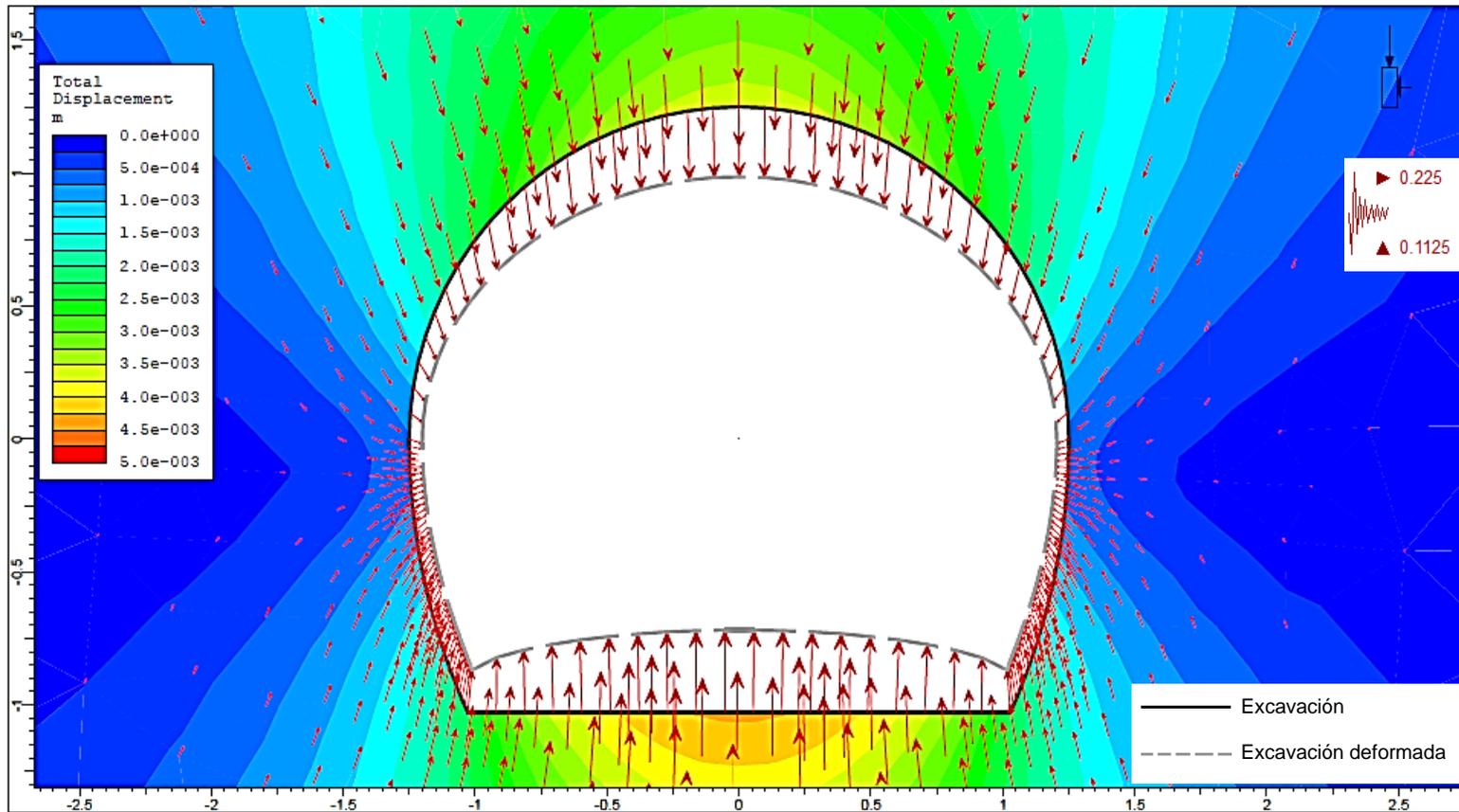


Figura 31. EG 06. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 07

La Figura 31 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con un valor mínimo de 0.5 MPa y máximo de 9.5 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

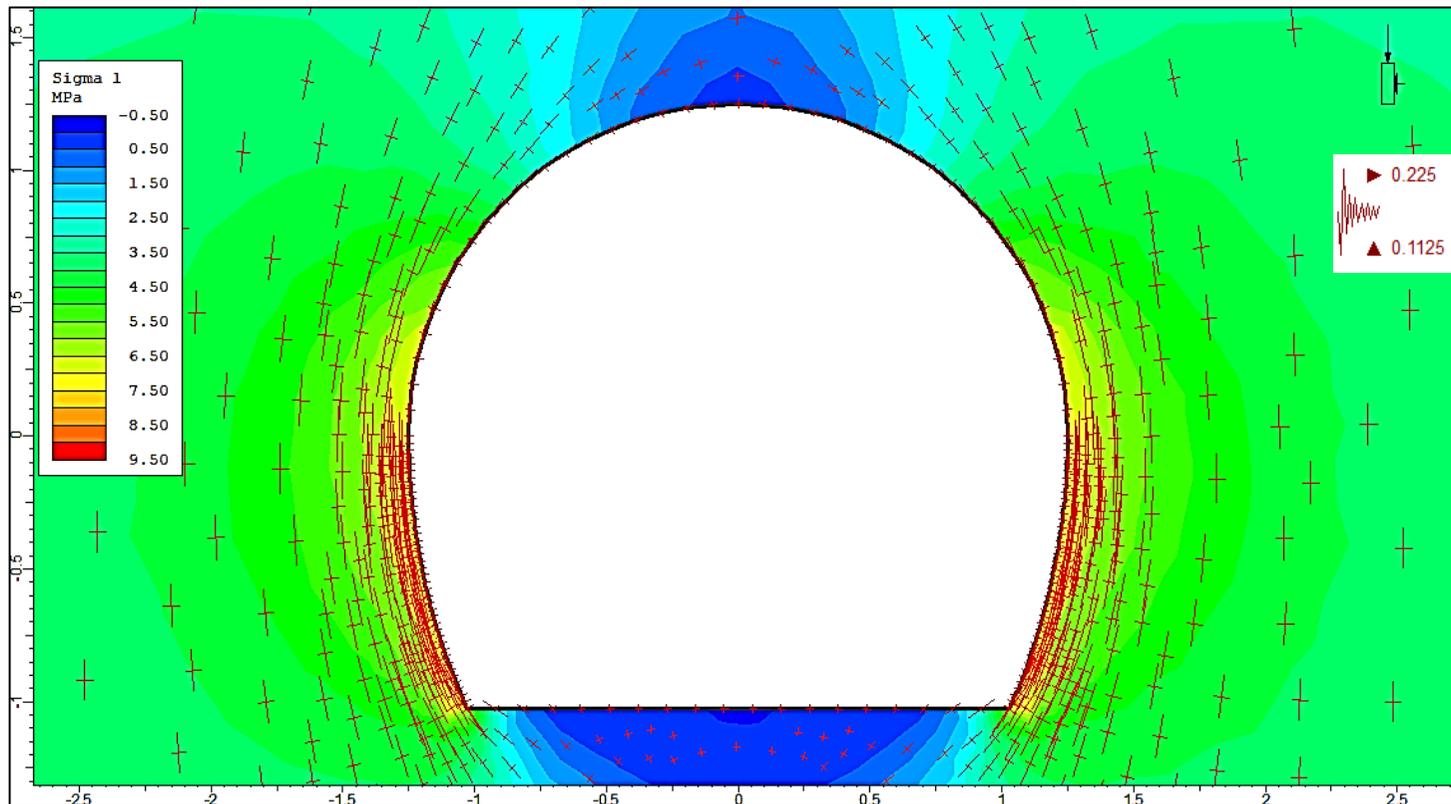


Figura 32.EG 07. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 32 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 9 mm.

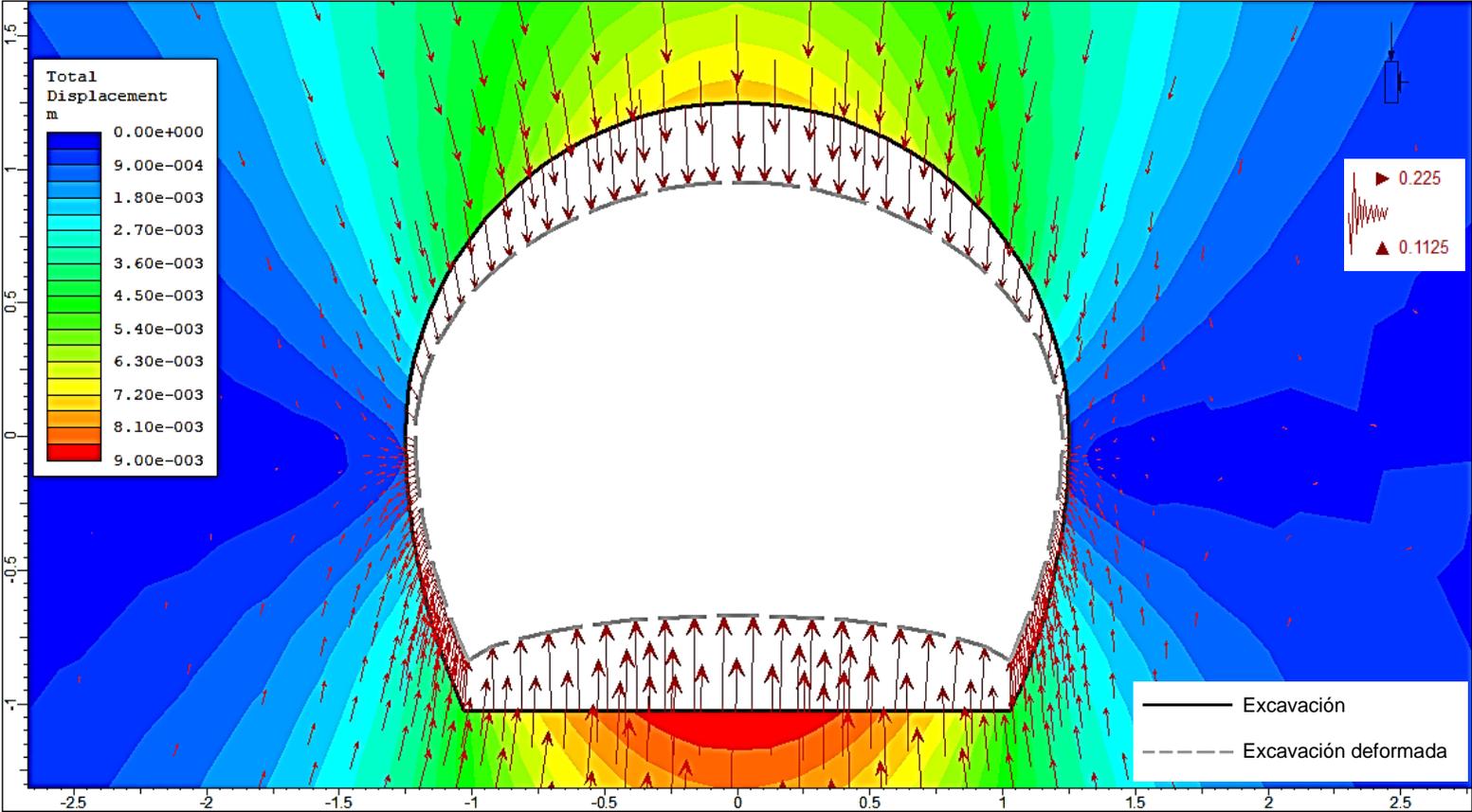


Figura 33. EG 07. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 08

La Figura 33 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valores entre 0.9 MPa y 18.1 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

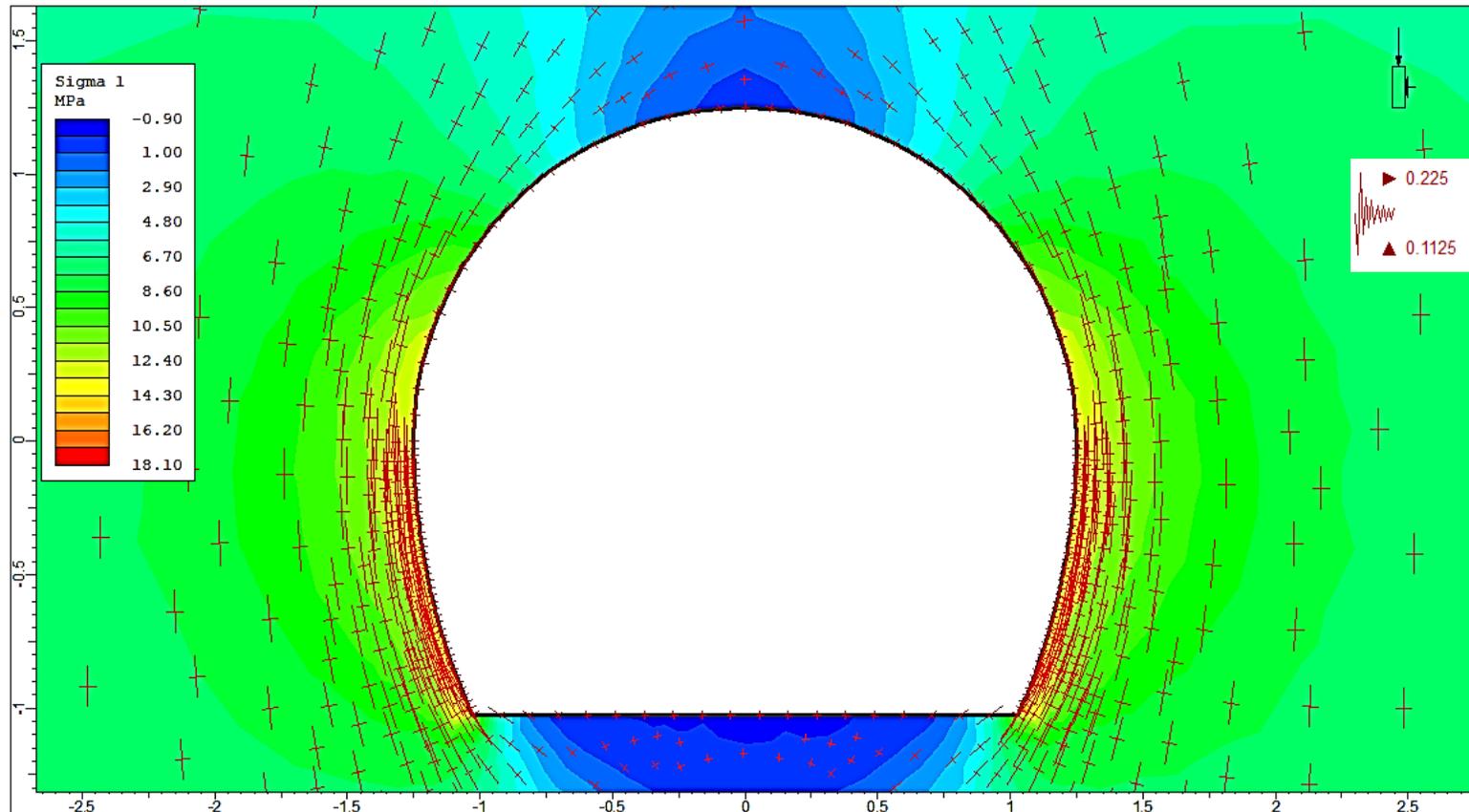


Figura 34.EG 08. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 34 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 1 cm.

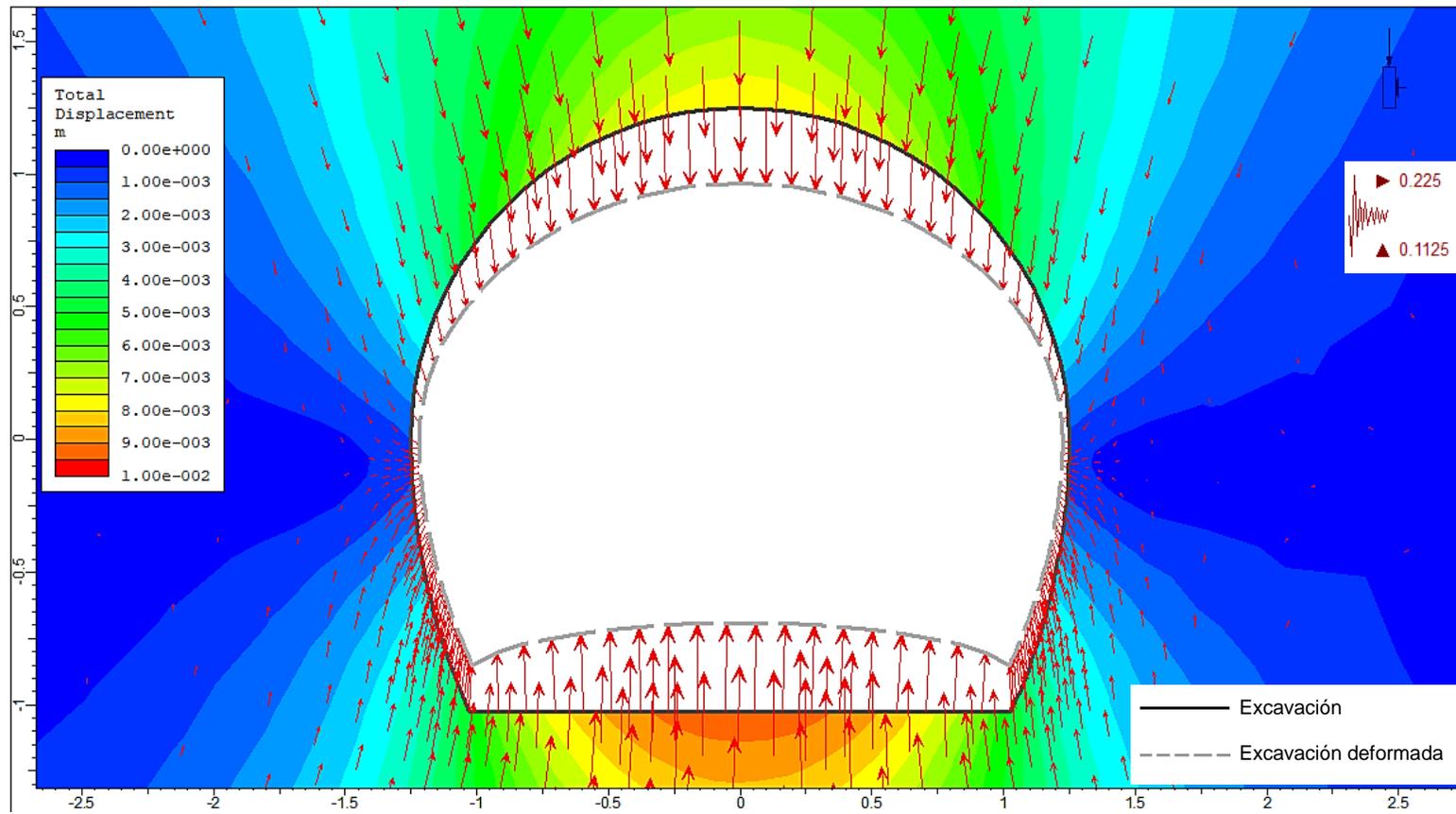


Figura 35. EG 08. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 09

La Figura 35 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo de 1.6 MPa y máximo de 28.50 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

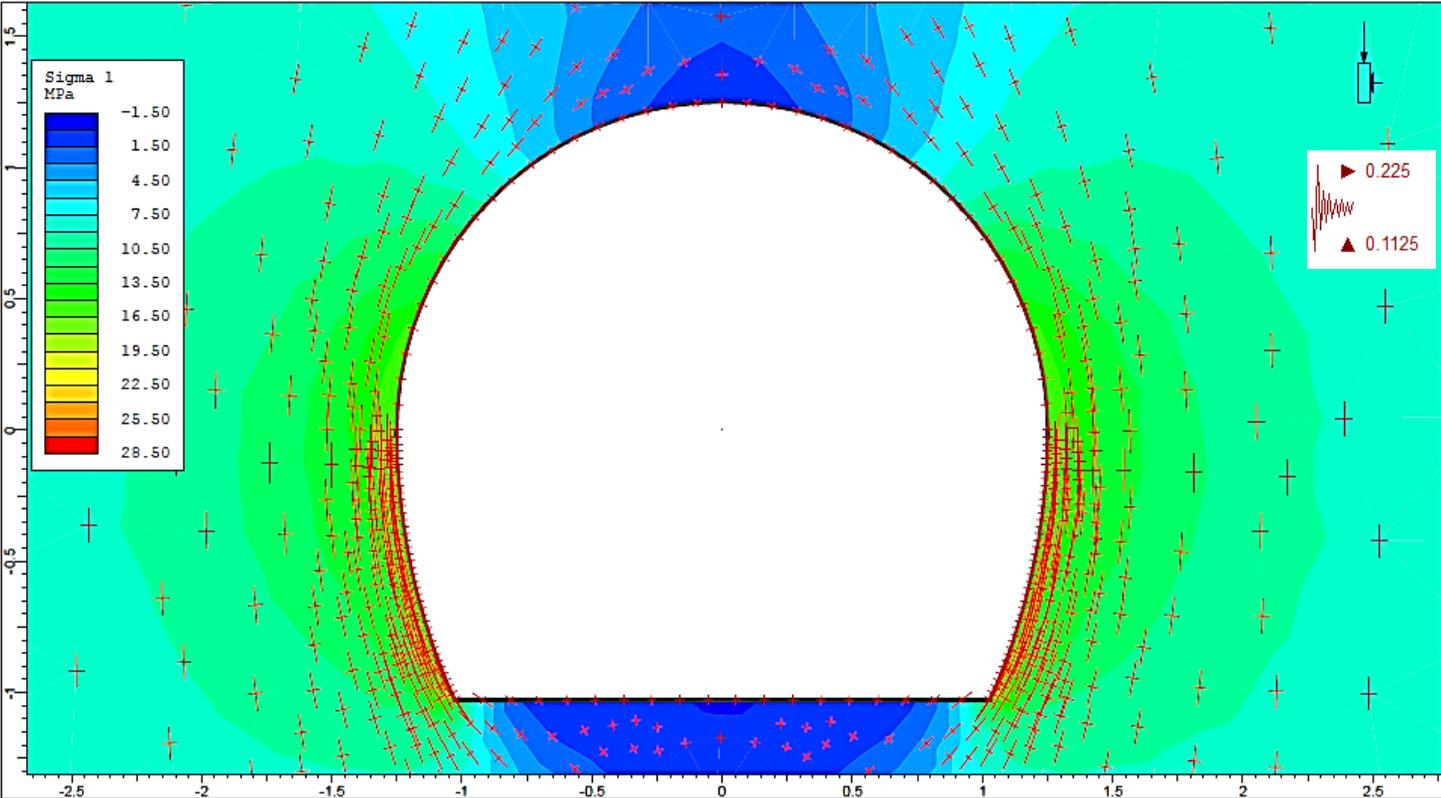


Figura 36.EG 09. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 36 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 12mm.

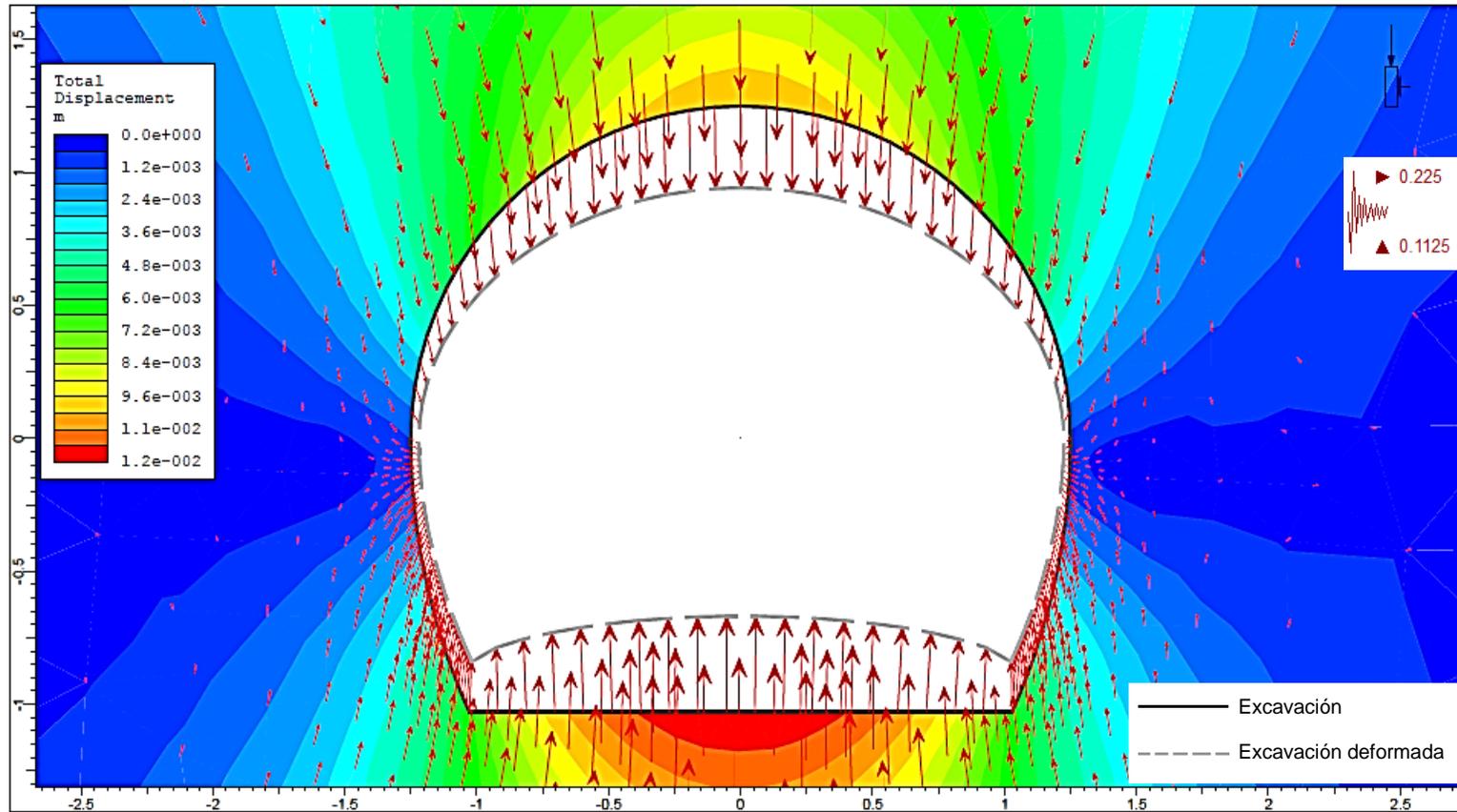


Figura 37. EG 09. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 10

La Figura 37 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con un valor mínimo de 0.8 MPa y máximo de 16.20 MPa; además se observa que la concentración es mayor en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

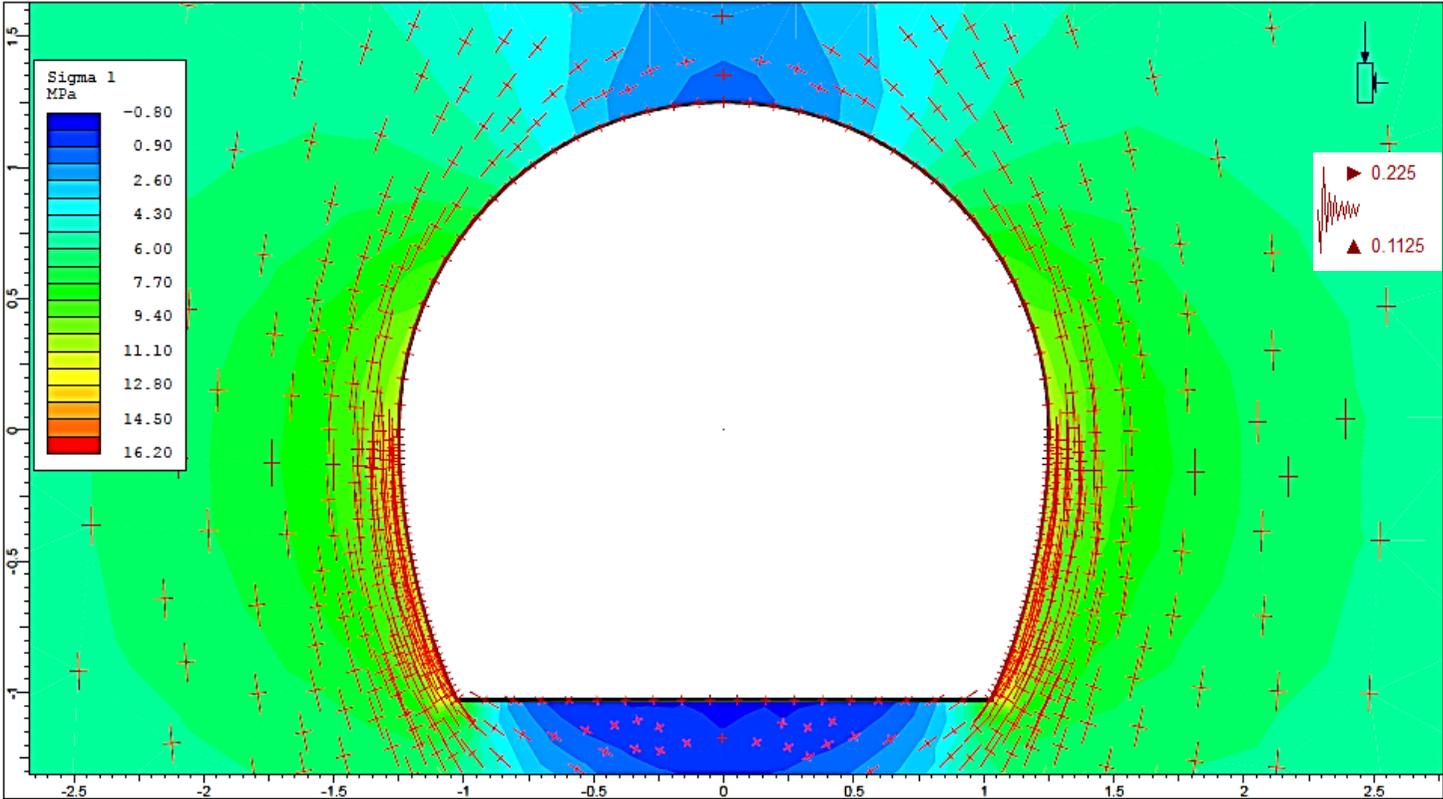


Figura 38.EG 10. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 38 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 4 mm.

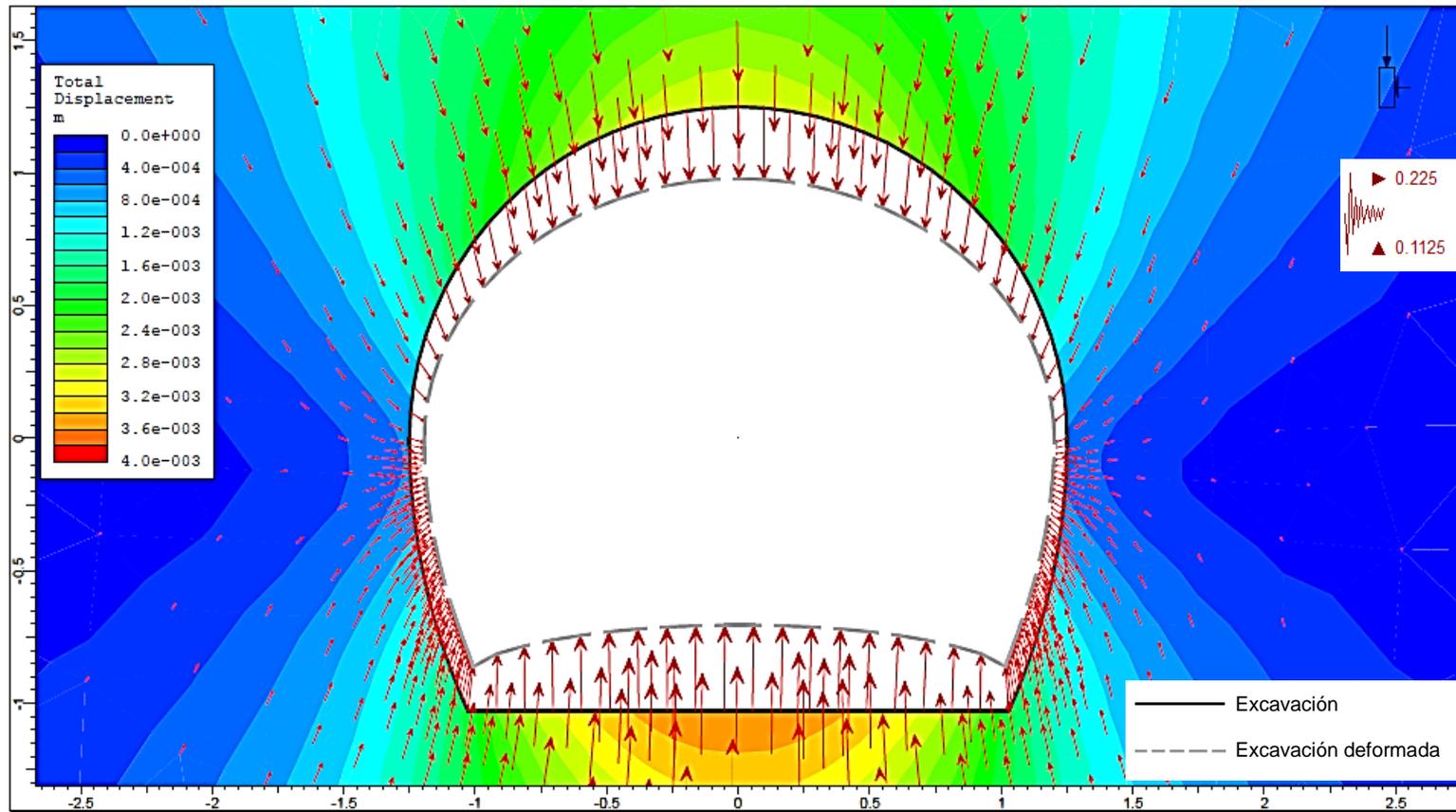


Figura 39. EG 10. Trayectoria de los desplazamientos totales.

Estación Geomecánica 11

La Figura 39 muestra la distribución del esfuerzo principal mayor, con valor mínimo es de 0.25 MPa y máximo de 4.75 MPa; además se observa que la mayor concentración es en los hastiales por lo que se podría generar zonas inestables y producir caída de bloques.

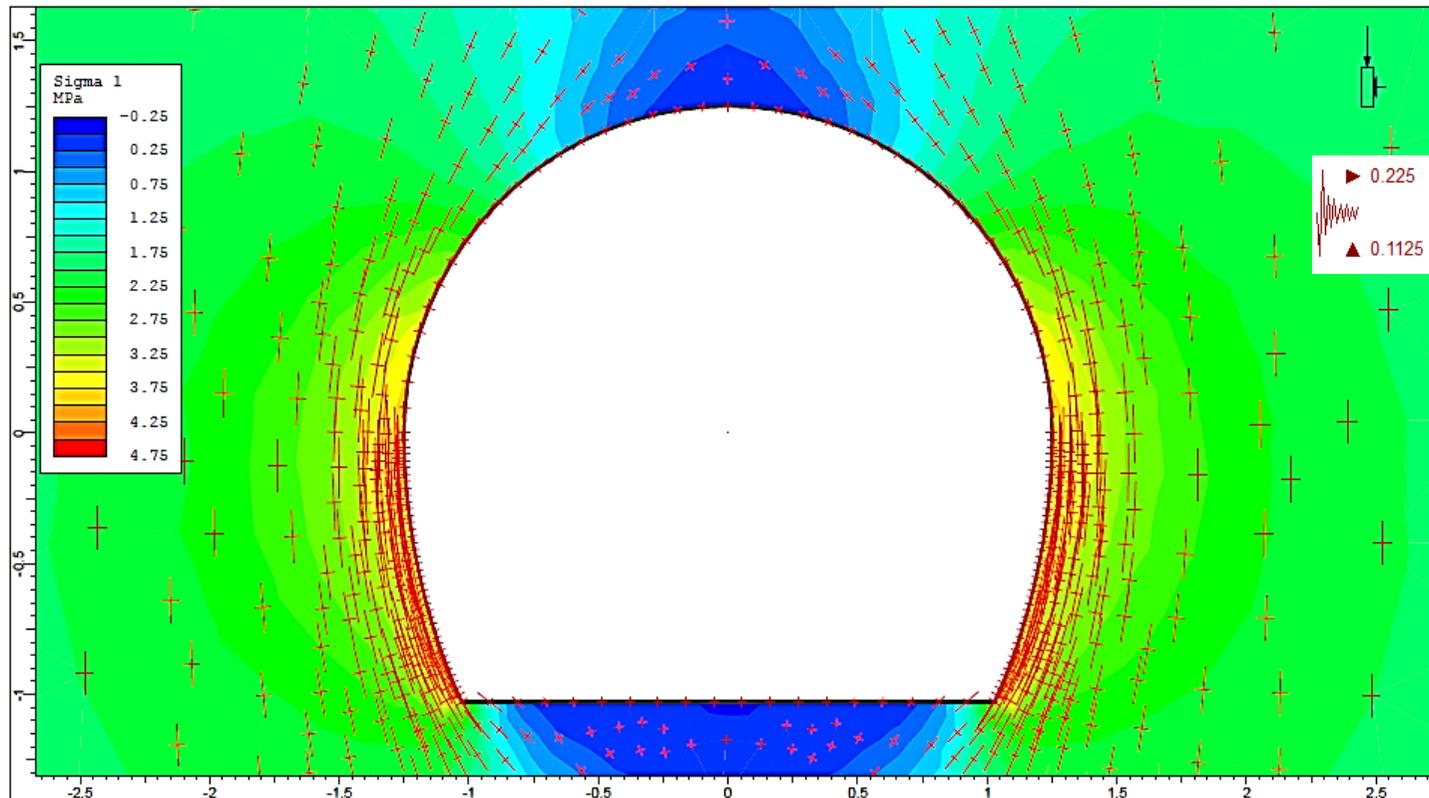


Figura 40. EG 11. Distribución del esfuerzo principal mayor.

La Figura 40 muestra la trayectoria de los desplazamientos totales en el perímetro del túnel, con un valor máximo de 30 cm.

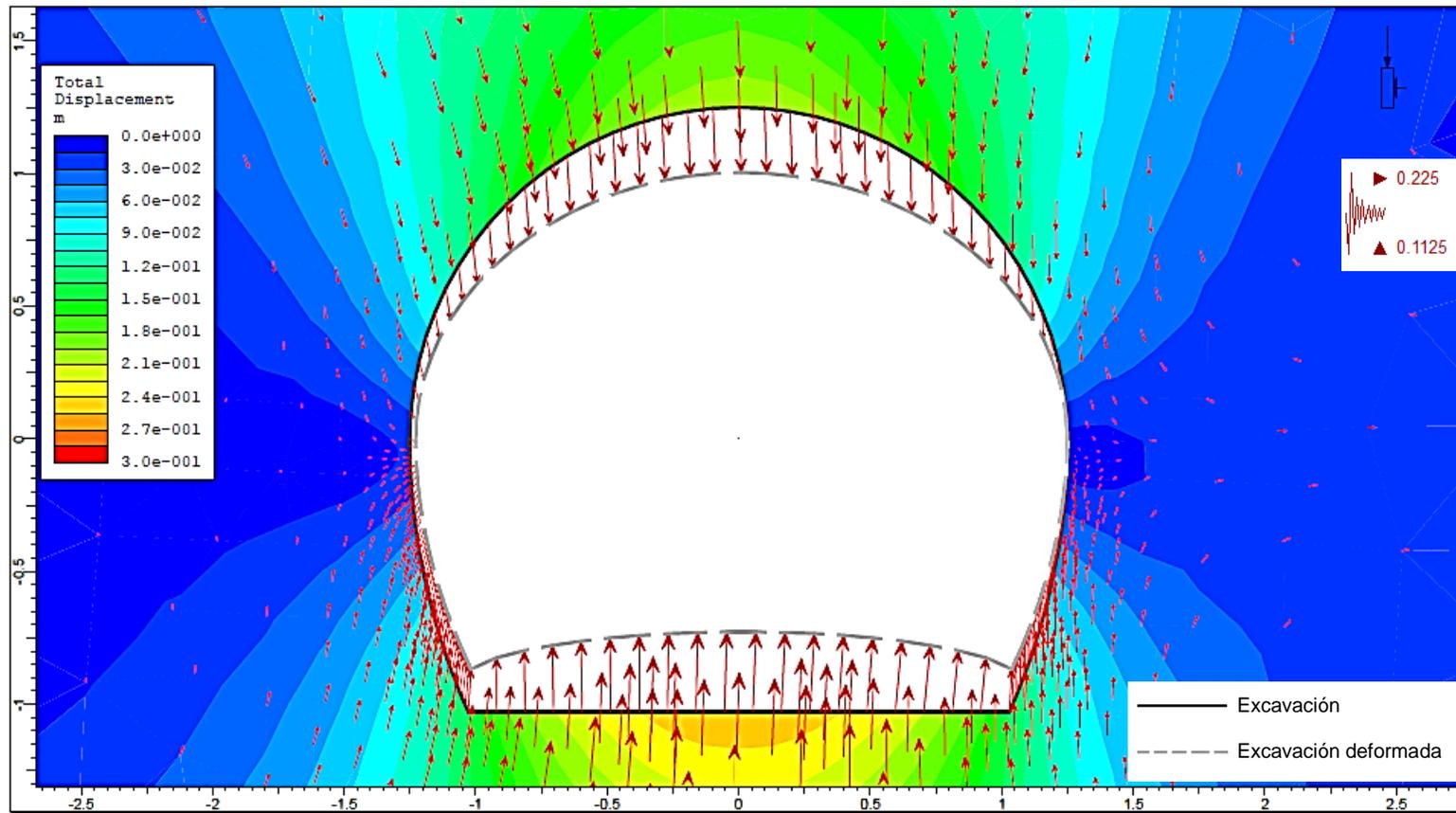


Figura 41. EG 11. Trayectoria de los desplazamientos totales.

4.2. PROPUESTA DE SOSTENIMIENTO

Para determinar el sostenimiento en las estaciones geomecánicas se usó la Tabla de Soporte Práctico Minero (SPM), considerando los parámetros de diámetro equivalente y valoración según Q de Barton.

Tabla 17. Parámetros para sostenimiento

Concepto	Valoración Q	Altura (m)	ESR	Dimensión equivalente
EG 01	10.00	2.28	1.6	1.43
EG 02	20.00	2.28	1.6	1.43
EG 03	2.95	2.28	1.6	1.43
EG 04	4.93	2.28	1.6	1.43
EG 05	16.67	2.28	1.6	1.43
EG 06	3.17	2.28	1.6	1.43
EG 07	1.31	2.28	1.6	1.43
EG 08	1.46	2.28	1.6	1.43
EG 09	3.85	2.28	1.6	1.43
EG 10	3.71	2.28	1.6	1.43
EG 11	0.89	2.28	1.6	1.43

Para obtener el diámetro equivalente se dividió la luz máxima de la sección entre el ESR igual a 1.6 por ser el tipo de excavación tunelería, dando como valor para todas las estaciones 1.43 e interpolando con el valor de Q se ubicó en la gráfica SPM y se obtuvo el sostenimiento estimado, el mismo que se aprecia en las Figuras 41-51.

Estación Geomecánica 01

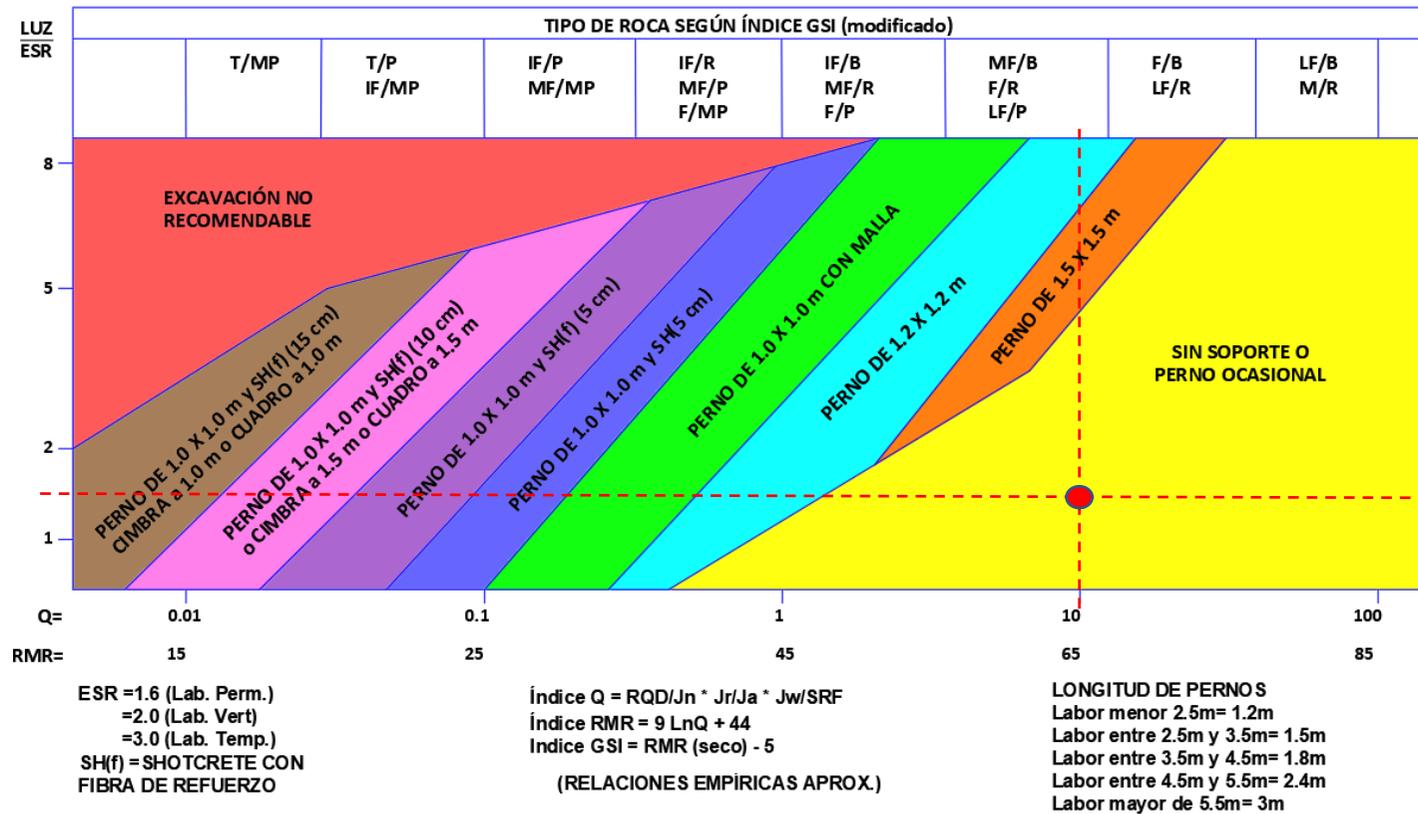


Figura 42. Sostenimiento en la EG 01.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 02

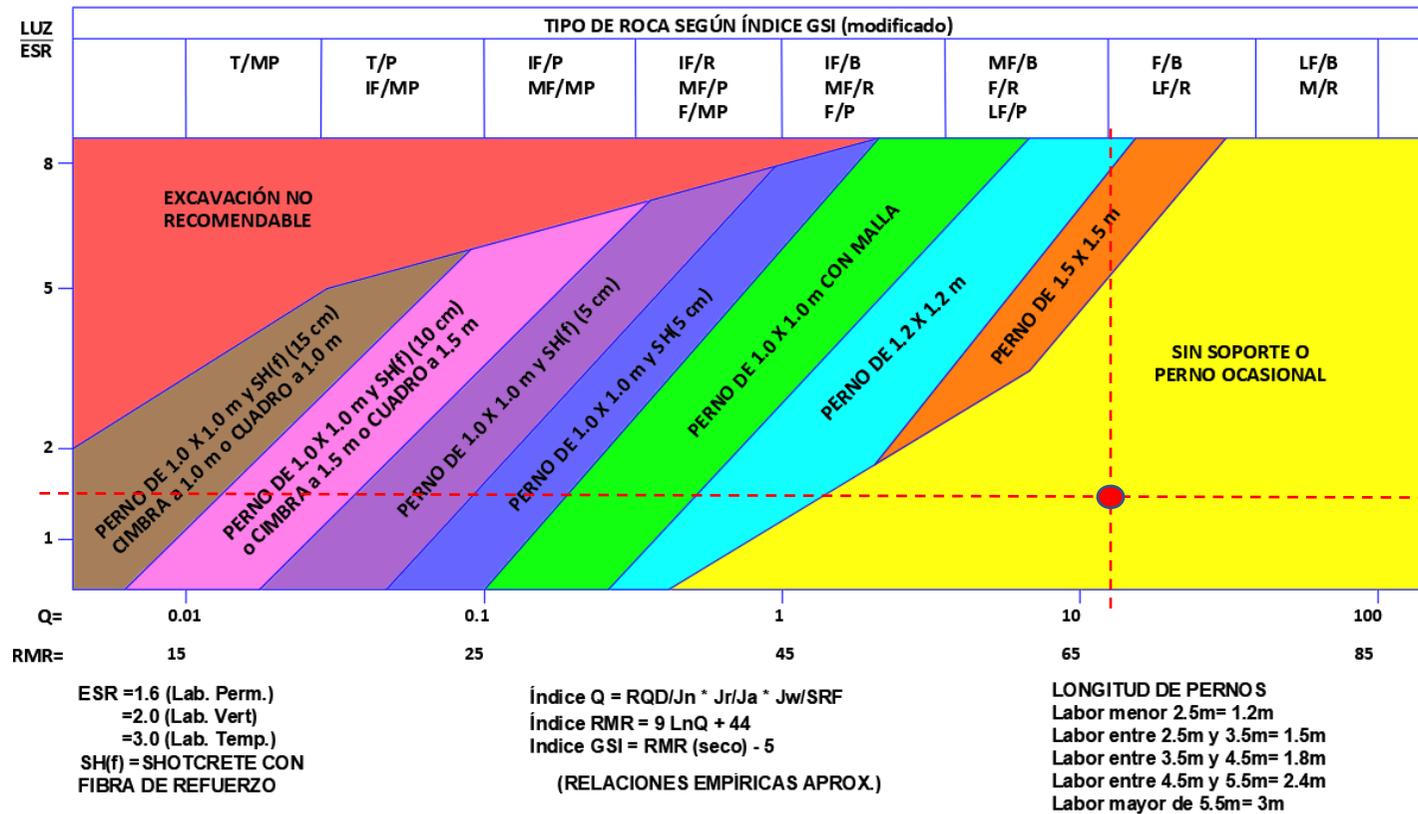


Figura 43. Sostenimiento en la EG 02.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 03

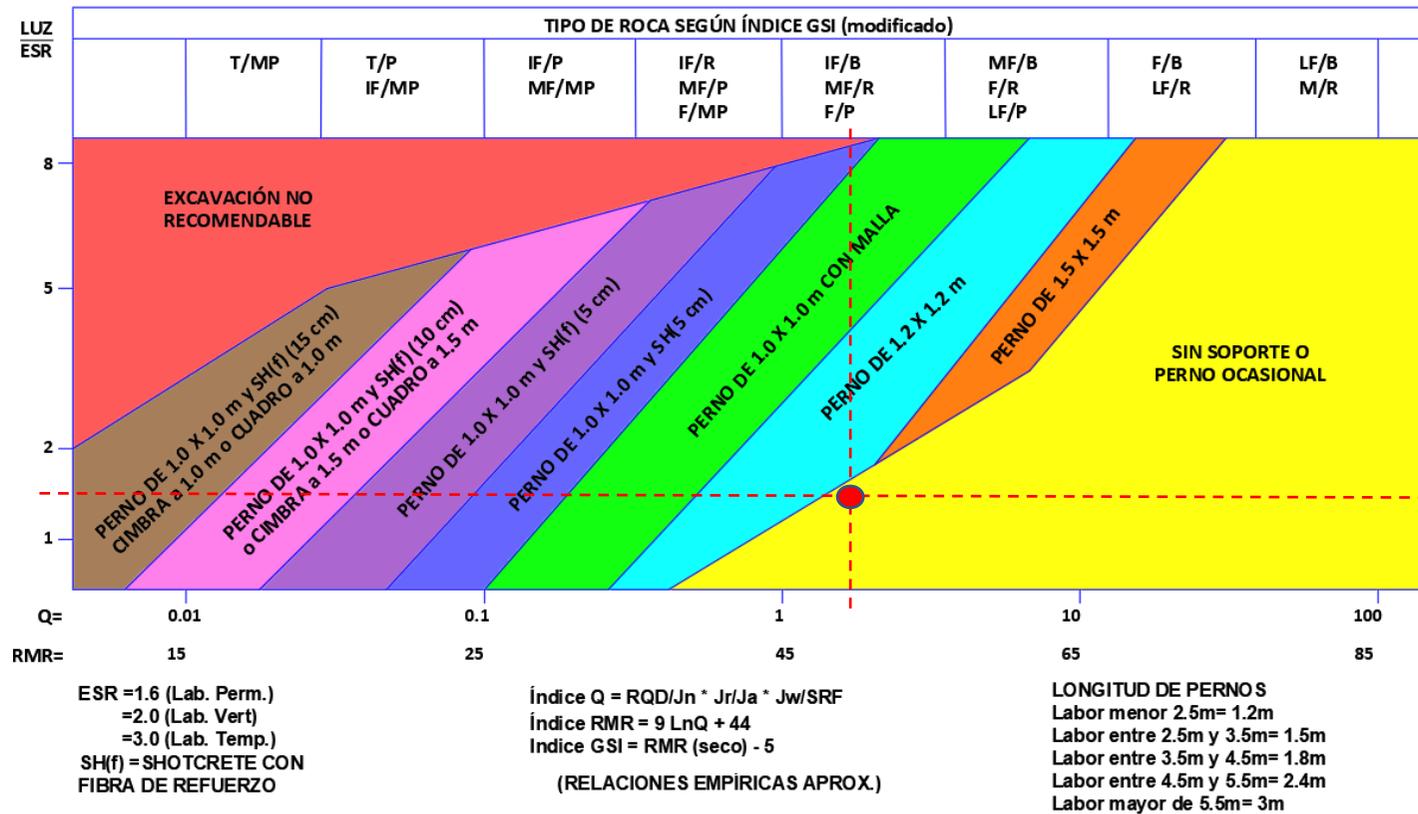


Figura 44. Sostenimiento en la EG 03.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 04

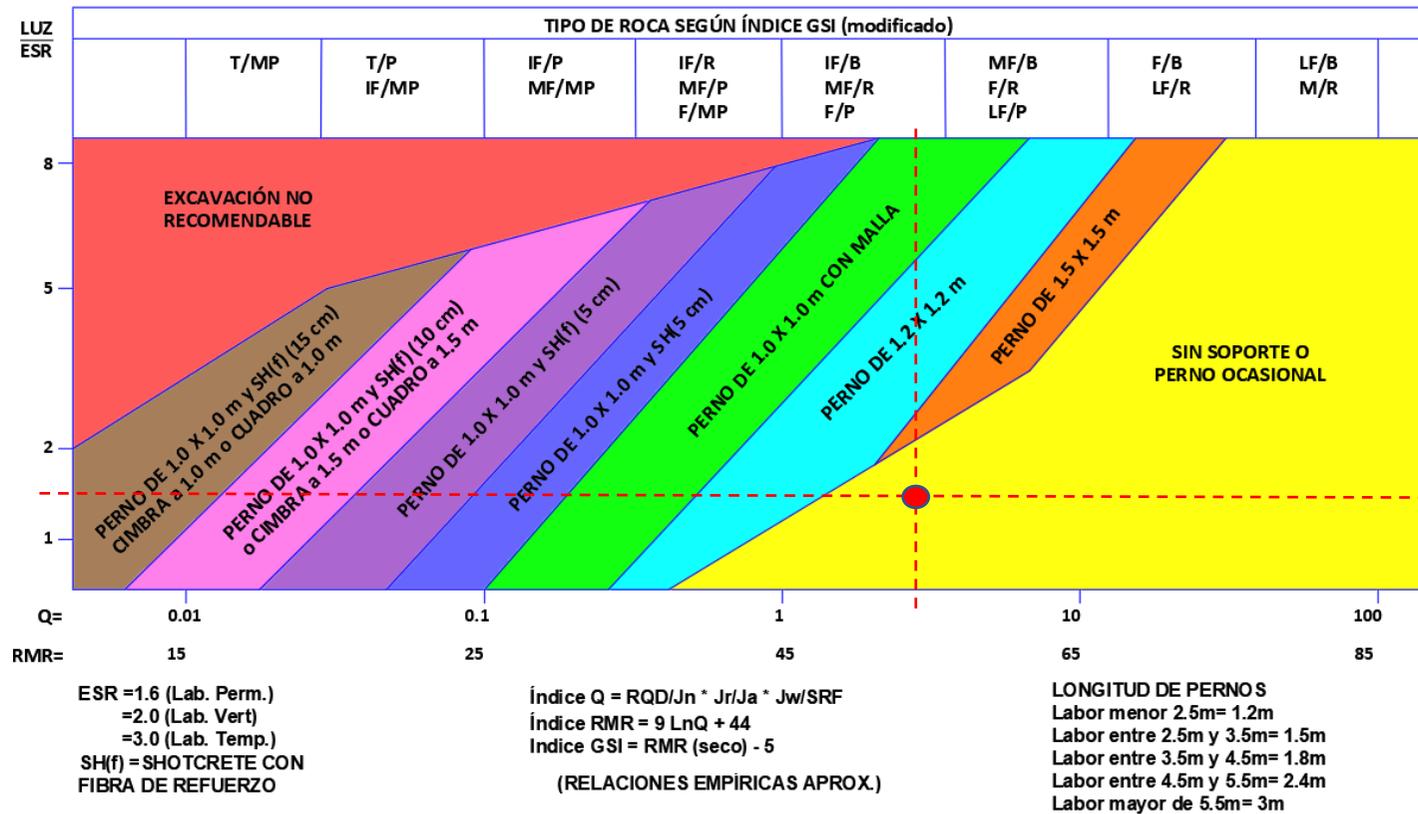


Figura 45. Sostenimiento en la EG 04.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 05

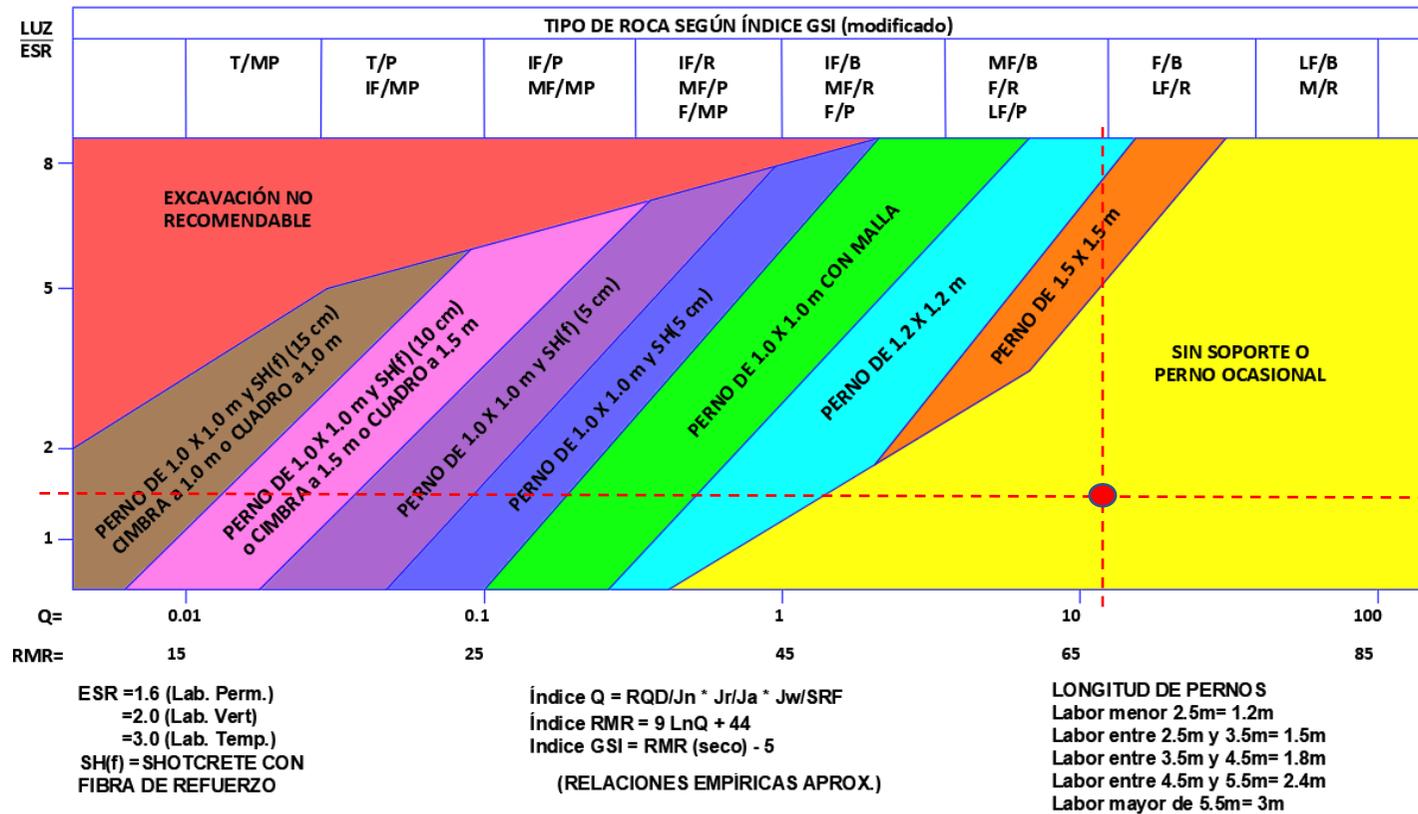


Figura 46. Sostenimiento en la EG 05.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 06

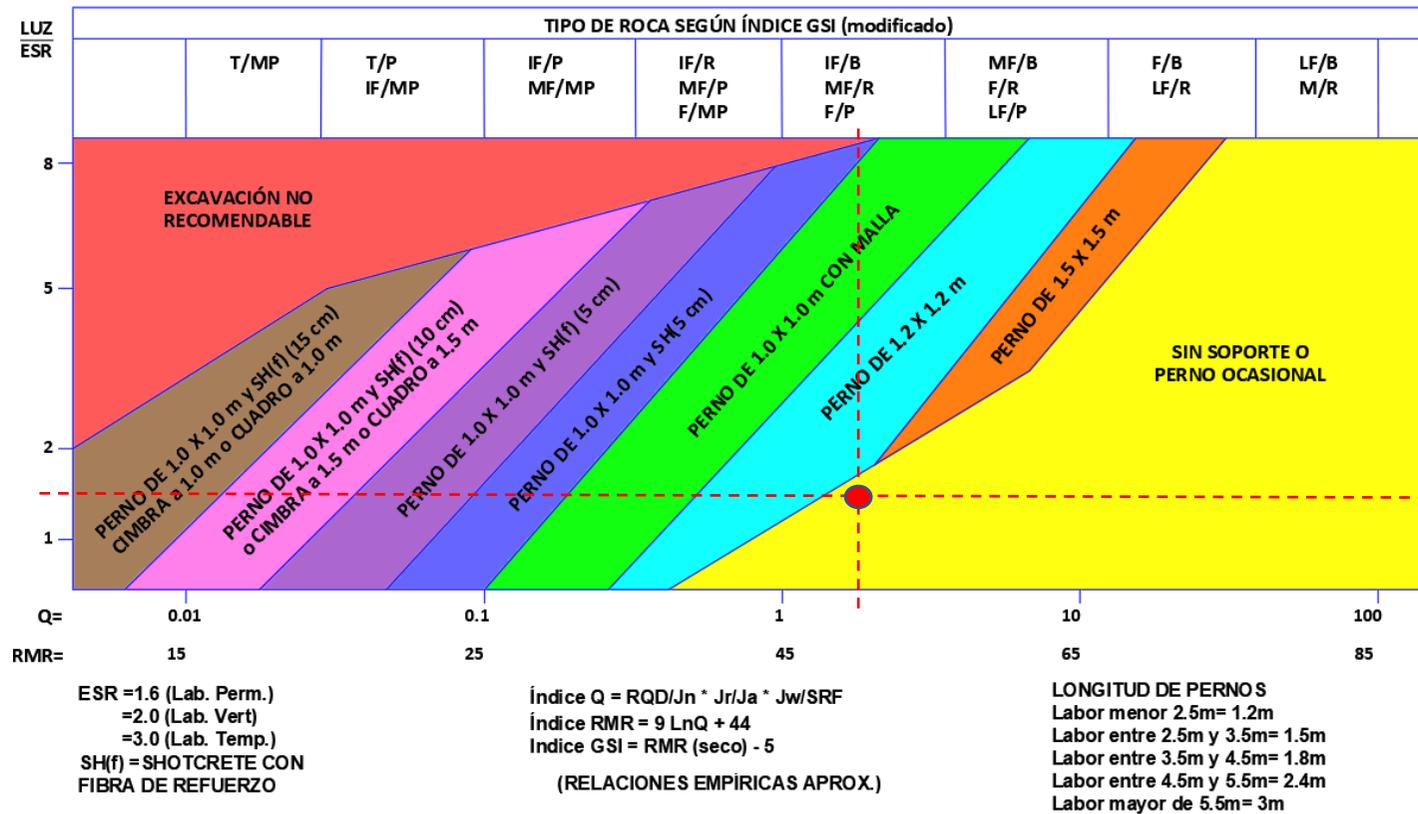


Figura 47. Sostenimiento en la EG 06.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 07

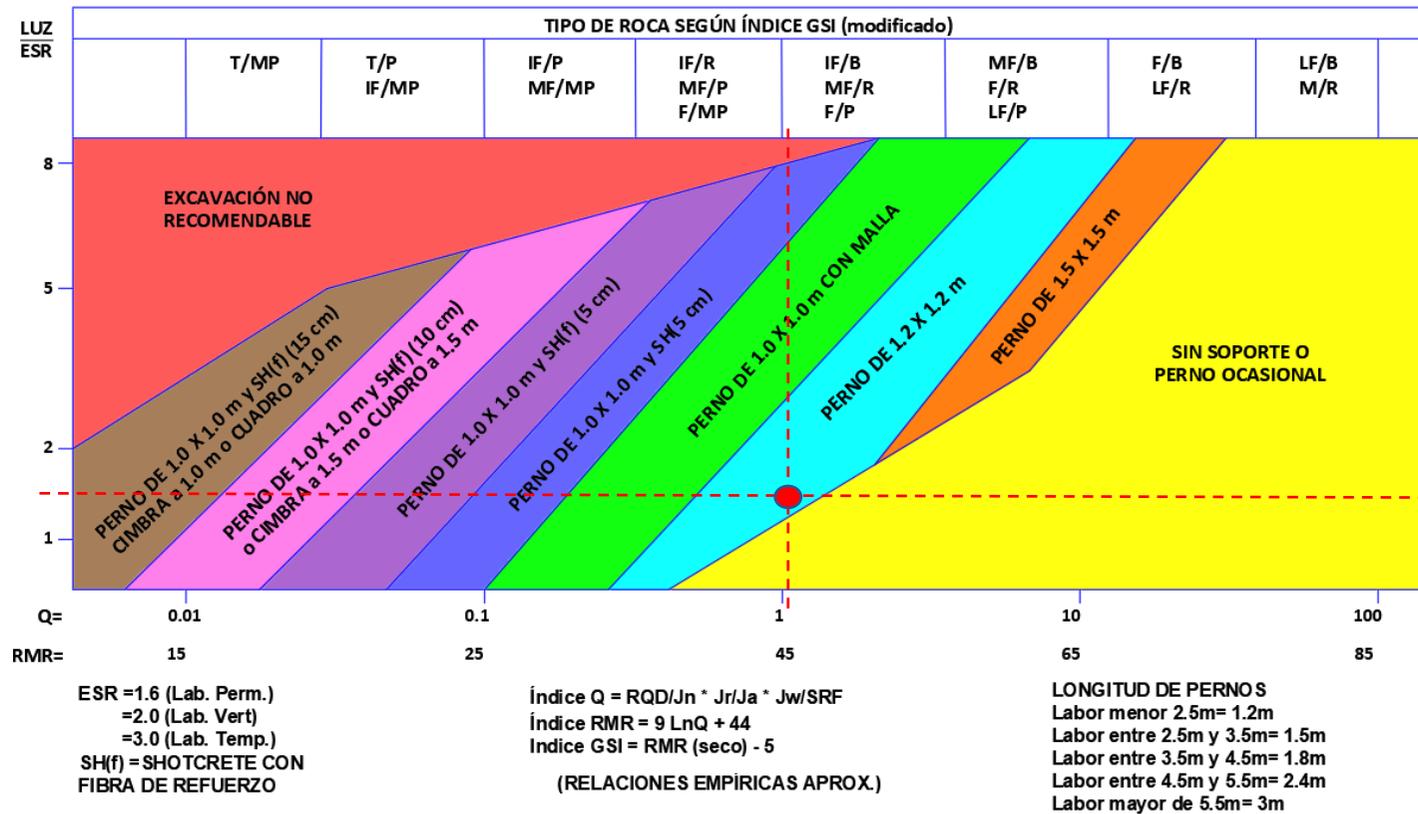


Figura 48. Sostenimiento en la EG 07.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje de 1.2 m. de longitud, espaciados sistemáticamente 1.2 x 1.2 m.

Estación Geomecánica 08

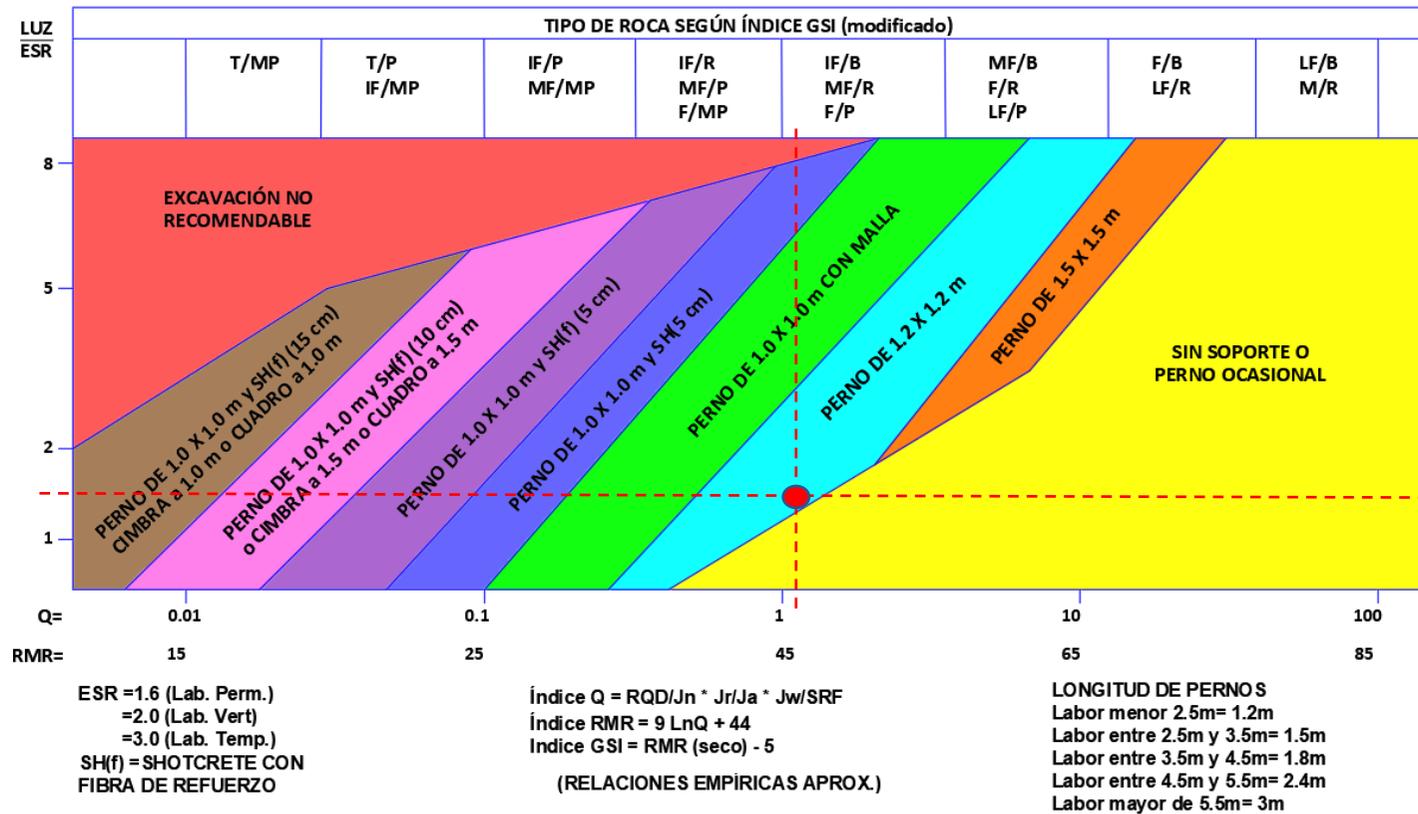


Figura 49. Sostenimiento en la EG 08.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje de 1.2 m. de longitud, espaciados sistemáticamente 1.2 x 1.2 m.

Estación Geomecánica 09

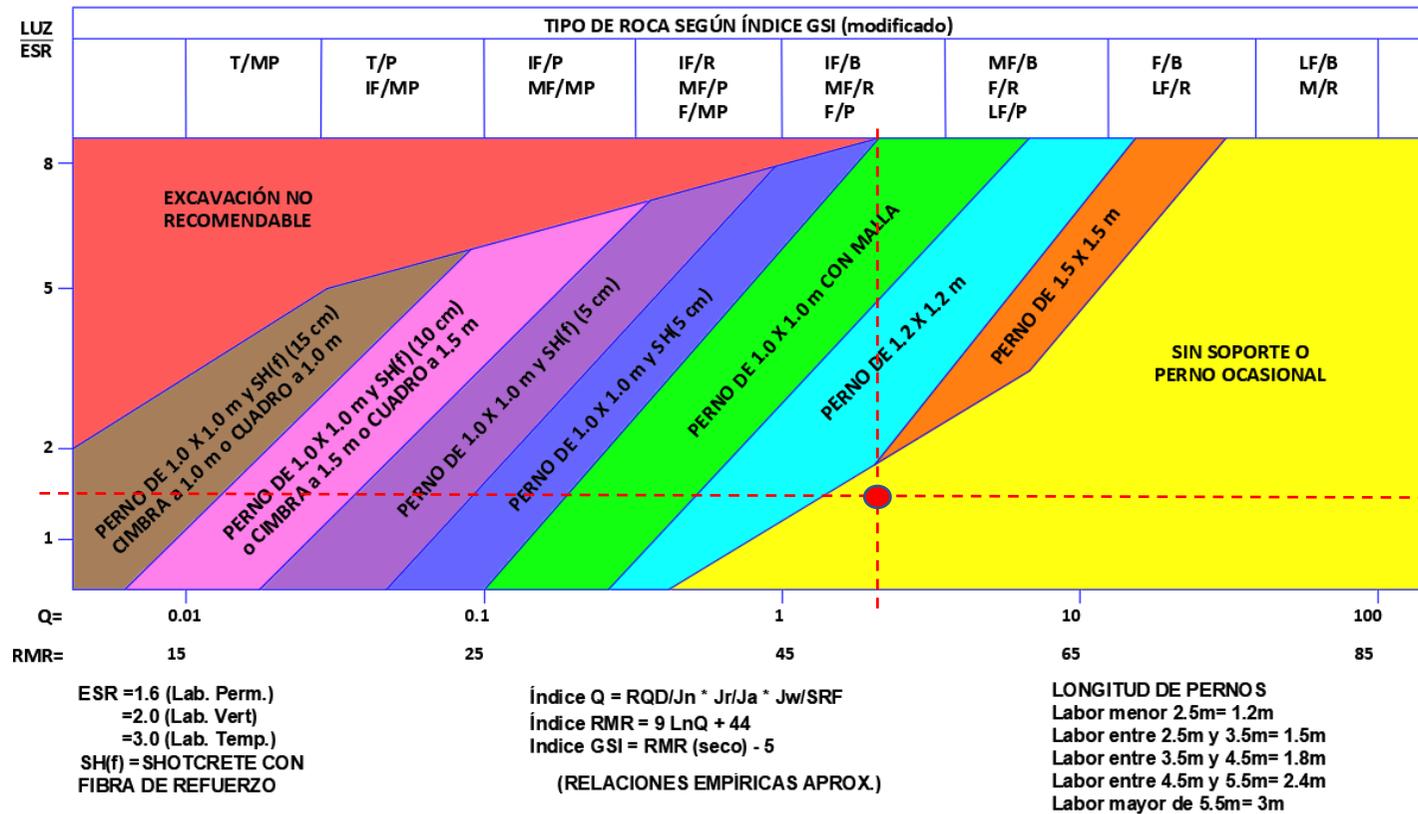


Figura 50. Sostenimiento en la EG 09.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 10

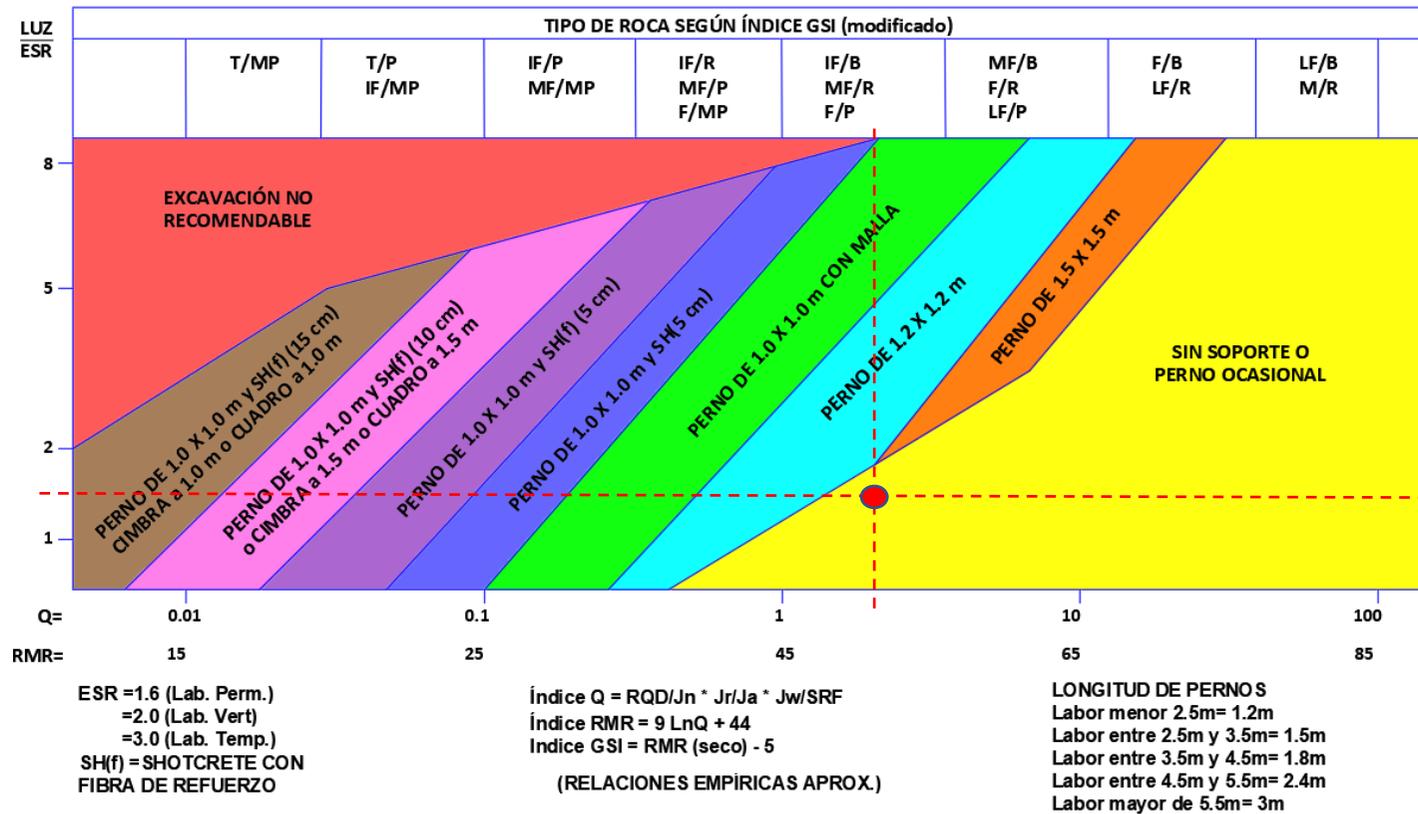


Figura 51. Sostenimiento en la EG 10.

El sostenimiento propuesto consistirá en pernos de anclaje ocasionales de 1.2 m. de longitud.

Estación Geomecánica 11

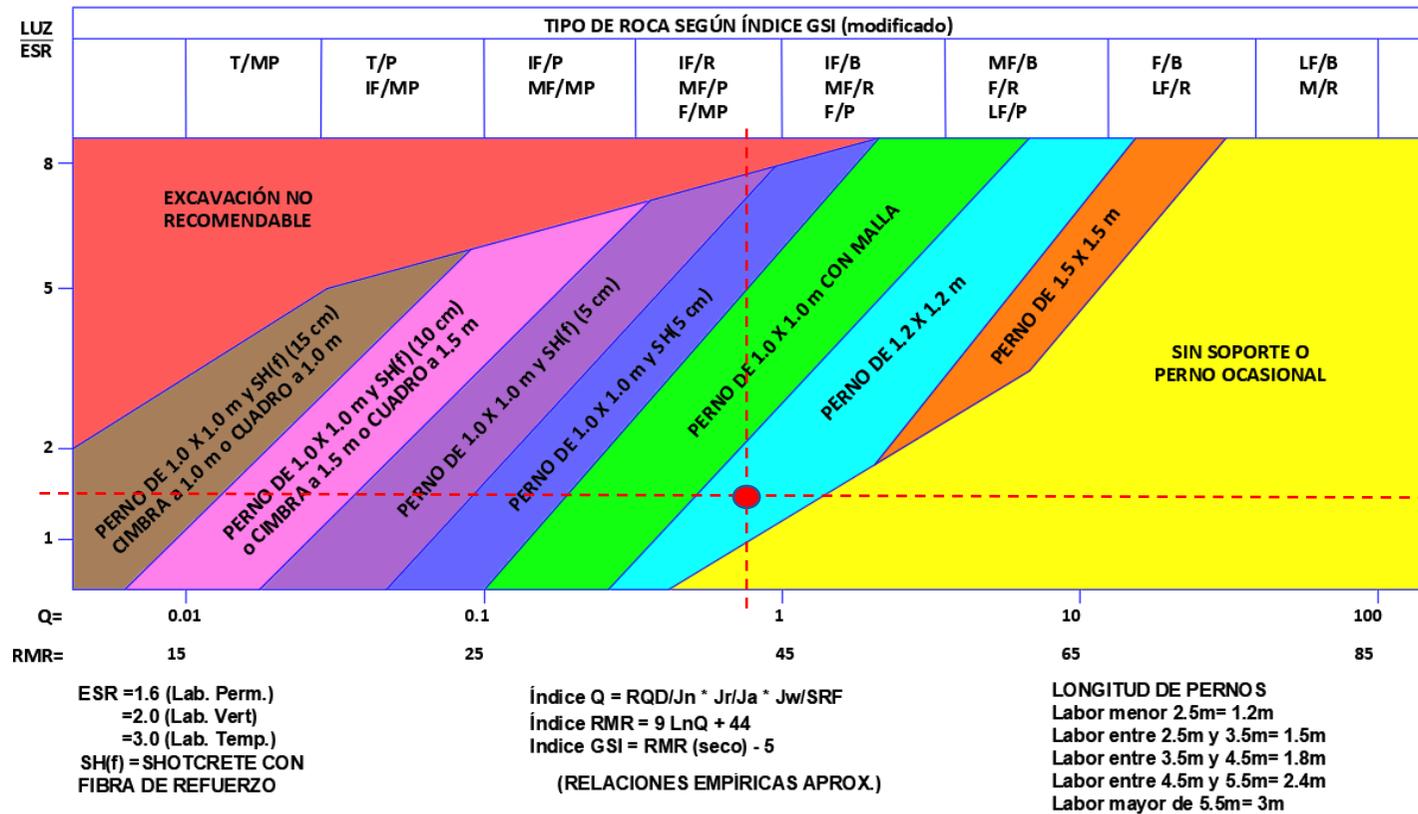


Figura 52. Sostenimiento en la EG 11.

El sostenimiento propuesto es pernos de anclaje de 1.2 m. de longitud, espaciados sistemáticamente 1.2 x 1.2 m.

Los resultados para el sostenimiento según la tabla SPM quedan representados de la siguiente manera:

Tabla 18. Sostenimiento

Estación Geomecánica	Clase de sostenimiento	Longitud del perno (m)	Espaciamiento (m)
EG 01	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 02	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 03	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 04	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 05	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 06	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 07	Pernos sistemáticos	1.2	1.2 x 1.2
EG 08	Pernos sistemáticos	1.2	1.2 x 1.2
EG 09	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 10	Pernos ocasionales	1.2	-
EG 11	Pernos sistemáticos	1.2	1.2 x 1.2

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La investigación contrastó la hipótesis, afirmando que el comportamiento geotécnico del macizo rocoso en la franja superficial del túnel proyectado se encuentra afectado por el fracturamiento evidenciado en las discontinuidades, los mismos que posibilitan la infiltración y generan disminución de la resistencia en las discontinuidades creando zonas de inestabilidad geotécnica; por ello, es necesario brindar el sostenimiento adecuado oportuno al túnel mediante pernos ocasionales y sistemáticos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El cartografiado geológico-geotécnico muestra que la zona de estudio está constituida por intrusivos granodioríticos y rocas extrusivas como lavas andesíticas, diques dacíticos, tufo dacítico y flujo lávico.

El comportamiento geomecánico se determinó en base al RMR de Bieniawski y Q de Barton, siendo la roca predominante de calidad Media a Buena.

Según las curvas de precipitación anual las temporadas de mayor precipitación son entre los meses de noviembre y mayo; además los coeficientes sísmicos horizontal (K_v) y vertical (K_v) son 0.225 y 0.1125 respectivamente.

Los macizos rocosos según el RMR están constituidos por roca buena (EG 01, 02, 04, 05 y 06), roca media (EG 03, 07, 08 y 10) y roca mala (EG 09 y 11), y según el Q de Barton por roca buena (EG 02 y 05), roca media (EG 01 y 04), roca mala (EG 03, 06, 07, 08, 09 y 10) y roca muy mala (EG 11).

El análisis geotécnico en las diferentes estaciones se evidencia mayores deformaciones en el techo del túnel debido al peso propio del material de la columna estratigráfica y a los esfuerzos inducidos.

El sostenimiento para las estaciones 01, 02, 03, 04, 05, 06, 09 y 10 es pernos ocasionales de 1.2 m de longitud y para el caso de las estaciones 07, 08 y 11 pernos sistemáticos de 1.2 m de longitud, con espaciamiento de 1.2 x 1.2 m.

5.2. RECOMENDACIONES

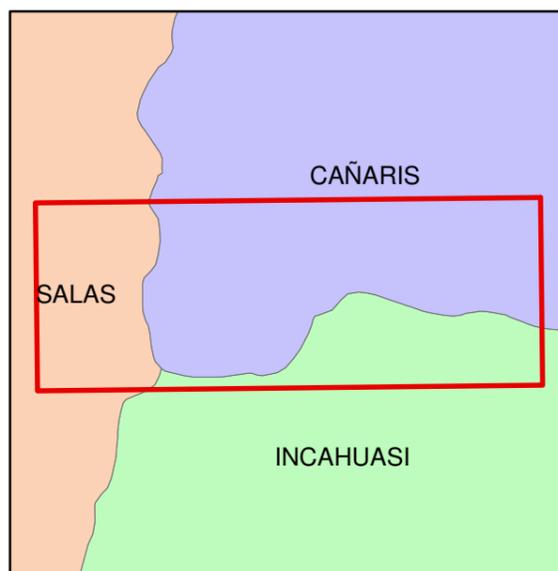
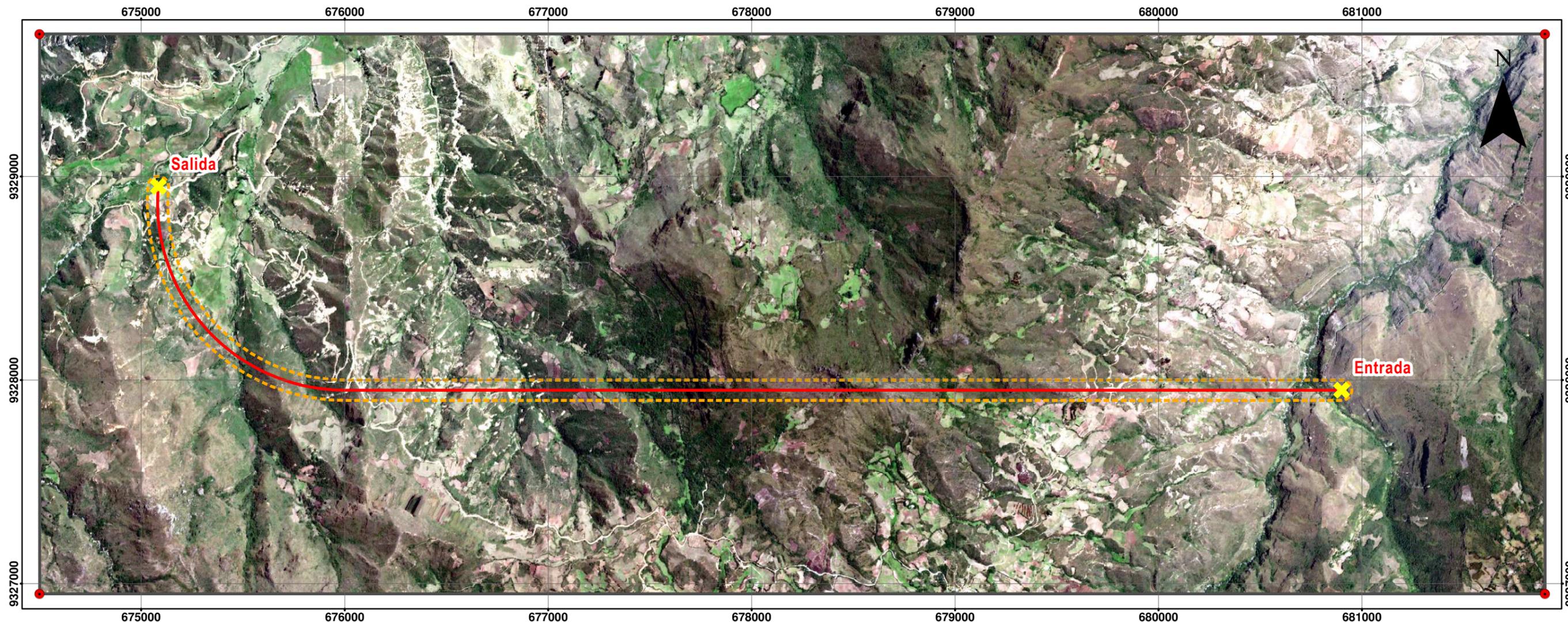
A la empresa que ejecutará el túnel:

- Realizar análisis geotécnicos en otros puntos sobre la proyección superficial del eje del túnel, a fin obtener data más precisa para el modelo geológico – geotécnico.
- Analizar durante y después de la ejecución del túnel el comportamiento del macizo rocoso a través de instrumentación para el monitoreo de convergencia en las zonas donde el macizo rocoso es de mala calidad; para así, garantizar la estabilidad geomecánica y prevenir cualquier eventualidad en contra de la seguridad del personal.
- Realizar ensayos triaxiales para determinar los parámetros de resistencia y esfuerzos de confinamiento de la roca, para calibrar el modelo geológico – geotécnico.
- Realizar perforaciones de investigación geotécnica para caracterización del macizo rocoso y lograr mayor certeza en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranzamendi Paredes, AL. 2019. Estudio Geológico-Geotécnico para la construcción y soporte del túnel de conducción F03-Central Hidroeléctrica Hidromanta I - Perú. Tesis Ing, Arequipa, Perú, UNSA.
- Bazán Cruzado, MI. 2017. Estudio geomecánico del macizo rocoso para la proyección del túnel de totoras (Huallabamba – Inkawasi y Kañaris). Tesis Ing, Chiclayo, Perú, UCV.
- Benel Rivera, BA. 2020. Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del nivel 3 de la mina Paredones San Pablo - Cajamarca. Tesis Ing, Cajamarca, Perú, UNC.
- Gavilanes, H; Andrade Haro, B. 2004. Introducción a la Ingeniería de Túneles. Quito, Ecuador, Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME).
- Gonzalez de Vallejo, L. 2002. Ingeniería Geológica. Madrid, España, Prentice Hall.
- 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 – Edición 2002. Toronto, Canadá.
- Jaimes, F; Navarro J; Santos, A. 2013. Geología del Cuadrángulo de Incahuasi, Hoja 13-e, escala 1:50,000. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 148, 114 p., 4 mapas. Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Perú. 2019. Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Lima, Perú.

- Montoya Toroverero, FR. 2018. Relación geotécnica y litomorfoestructural del túnel de la Mina Paredones Nivel 5 San Pablo – Cajamarca. Tesis M.Cs, Cajamarca, Perú, UNC.
- Oconitrillo Fuentes, AV. 2011. Análisis de soporte utilizado para el túnel de conducción del PH Paso Ancho, Volcán Panamá. Tesis Ing. San José, Costa Rica, UCR.
- OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, Perú). 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Lima, Perú, INVERSIONES IAKOB SAC.
- SNMPE (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, Perú). 2004. Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea. Lima, Perú.
- Suarez, L; Valencia, Y; Ordóñez, O; Navarro, A; Hidalgo, B. 2009. Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del Proyecto Hidroeléctrico Porce III. Medellín, Colombia.

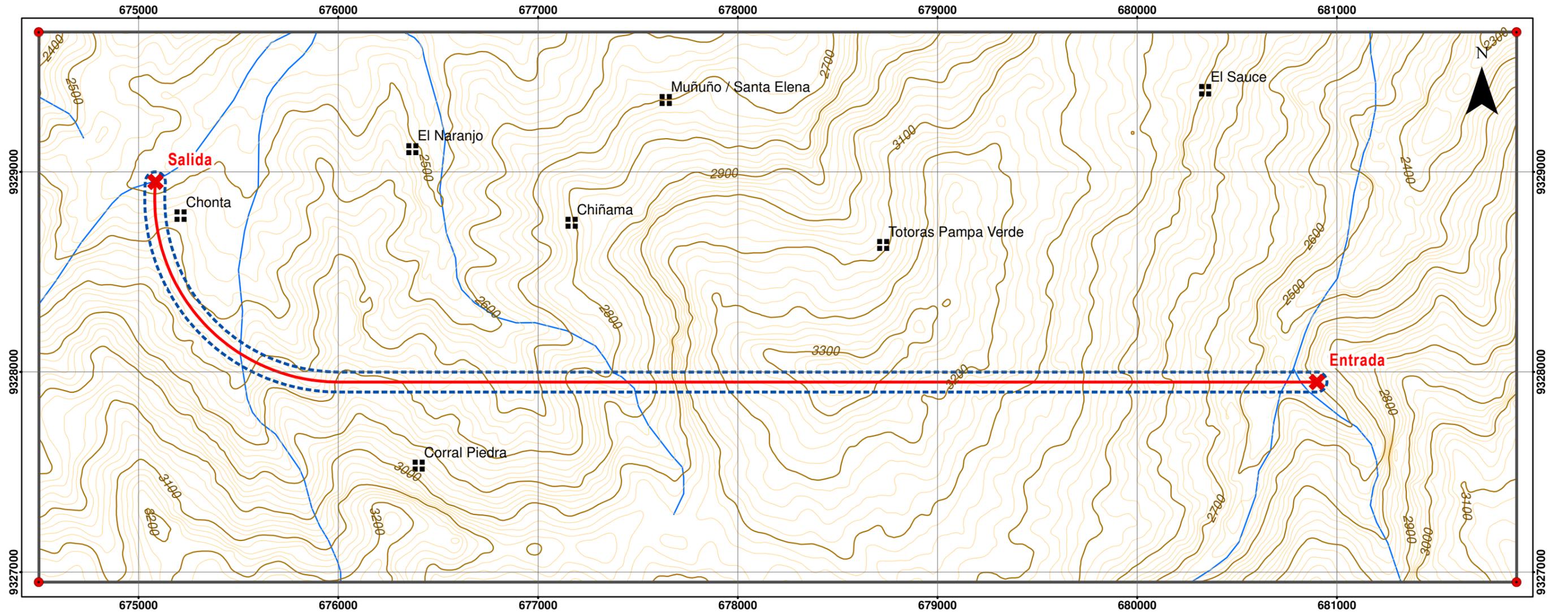


SIMBOLOGÍA

- Vértices
- ✕ Entrada y Salida de Tunel
- Eje de Tunel
- - - - - Tunel Proyectado
- Zona de Investigación

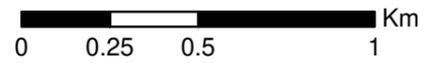
0 0.25 0.5 1 km
 Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		1
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
IMAGEN SATELITAL	PLANO N°	
TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO Cajamarca, Perú		Escala: 1 / 40 000



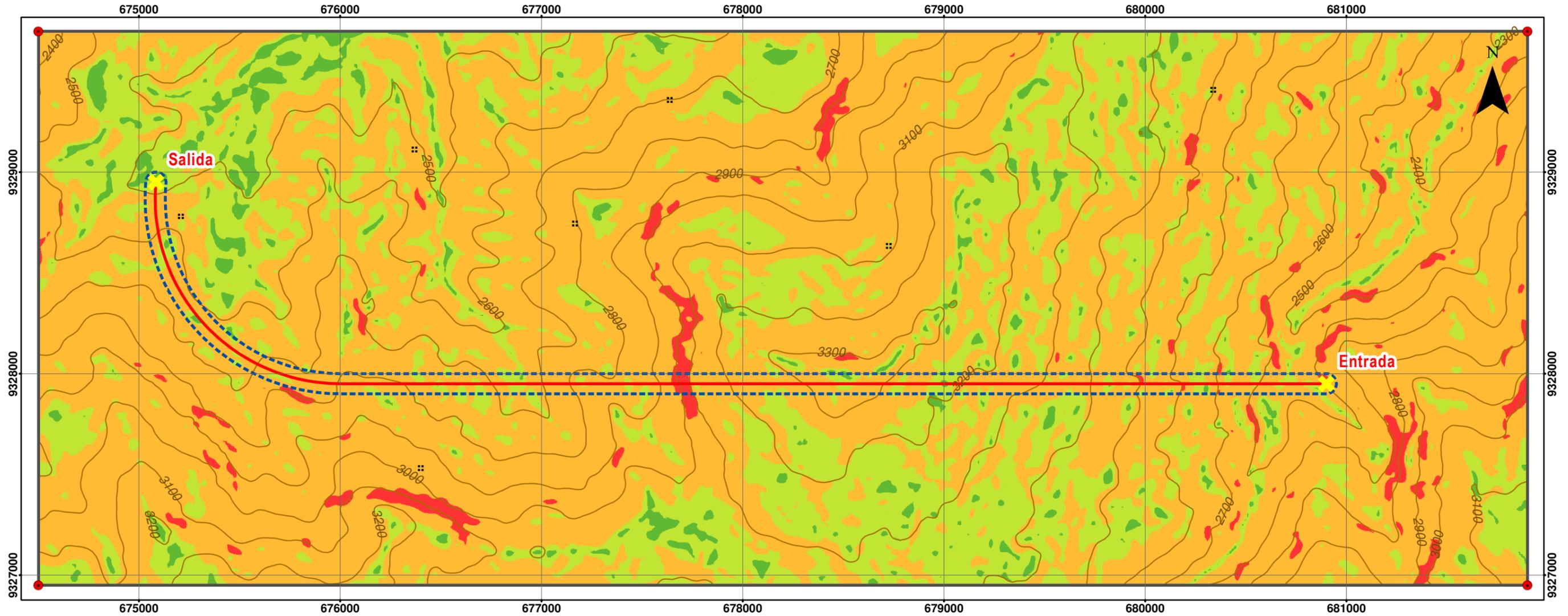
SIMBOLOGÍA

- Vértices
- ✕ Entrada y Salida de Tunel
- Centros Poblados
- Eje de Tunel
- Curvas menores (20m)
- Curvas mayores (100m)
- Drenaje
- Tunel Proyectado
- Zona de Investigación



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	2
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	

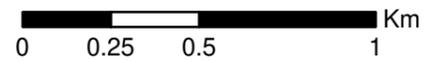


SIMBOLOGÍA

- Vértices
- ✕ Entrada y Salida de Tunel
- Eje de Tunel
- ~ Curvas mayores (100m)
- ⋯ Tunel Proyectado
- Zona de Investigación

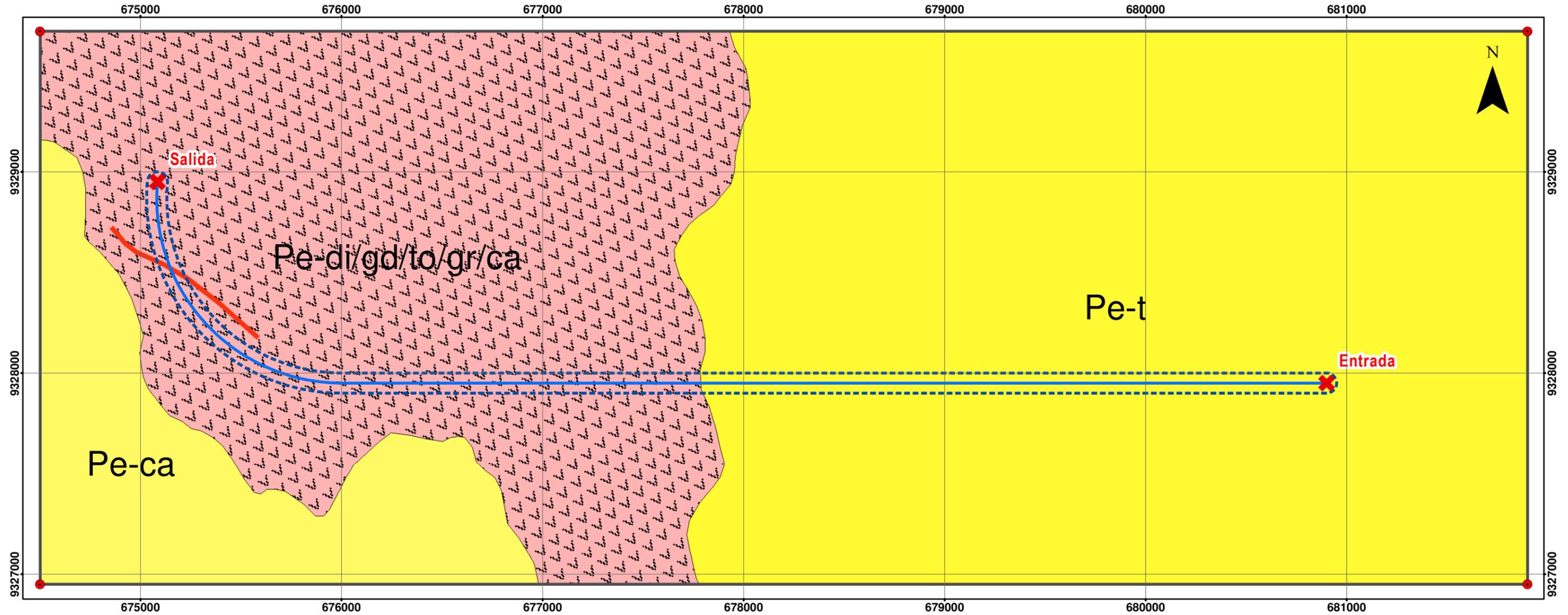
UNIDADES MORFOGENÉTICAS

- 0 - 8° Planicies
- 8° - 20° Lomadas
- 20° - 50° Laderas
- > 50° Escarpes



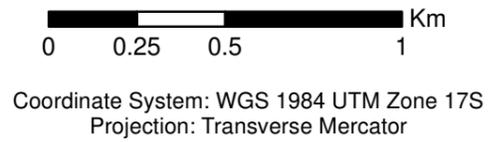
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	UNIDADES MORFOGENÉTICAS	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	3
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	

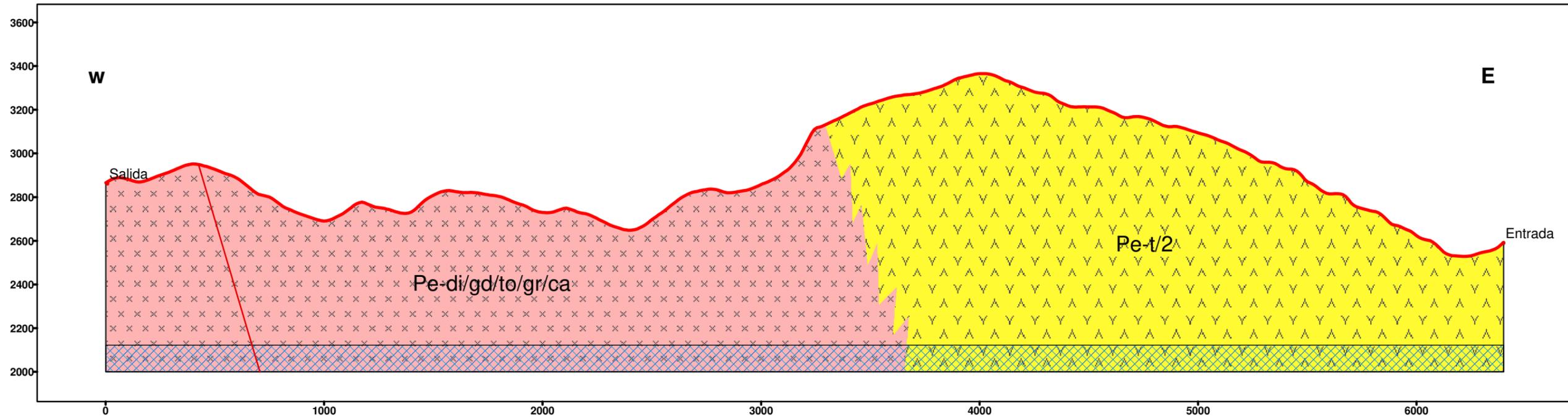


SIMBOLOGÍA	
●	Vértices
✕	Entrada y Salida de Tunnel
—	Eje de Tunnel
—	Dique
 	Tunnel Projectado
 	Zona de Investigación

UNIDADES GEOLÓGICAS		
	Pe-ca	- Volcánico
	Pe-di/gd/to/gr/ca	- Intrusivo
	Pe-t	- Volcánico



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	GEOLÓGICO ESTRUCTURAL	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	4
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	

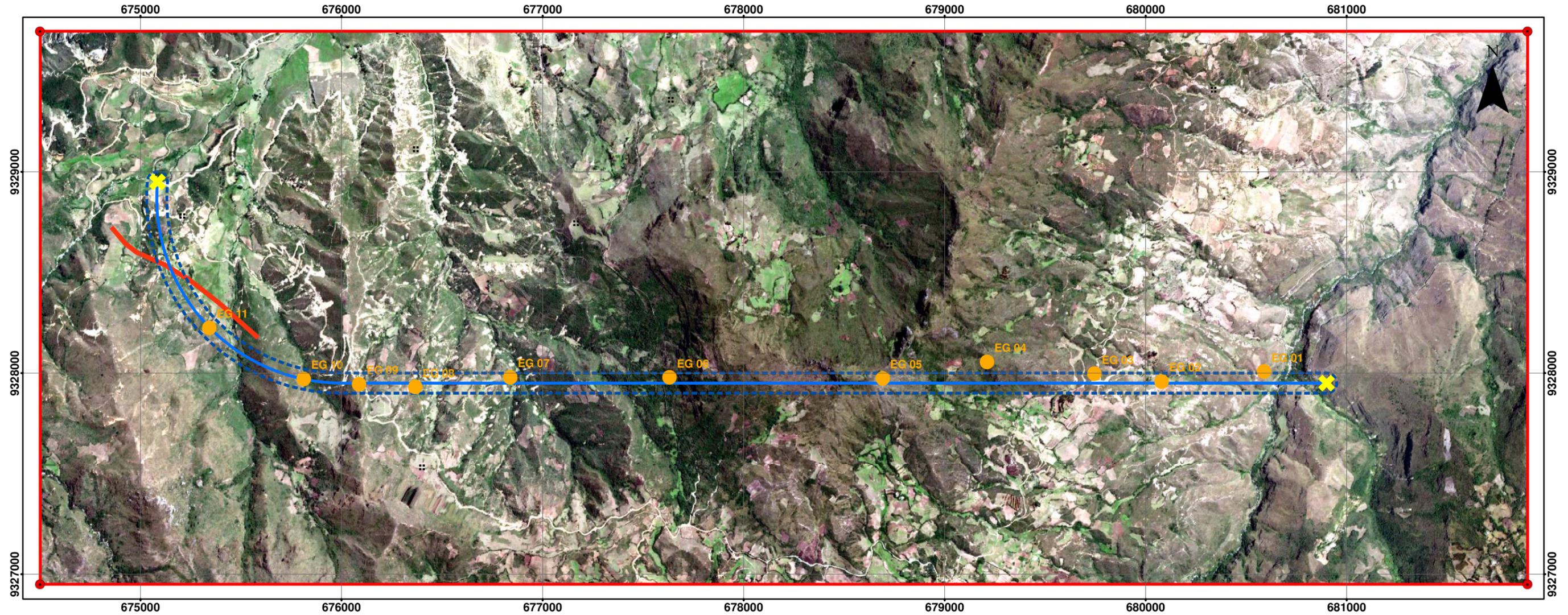


Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator



UNIDADES GEOLÓGICAS	
	Pe-ca
	Pe-di/gd/to/gr/ca
	Pe-t

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	SECCIÓN GEOLÓGICA ESTRUCTURAL	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	<div style="font-size: 2em; font-weight: bold;">5</div>
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	

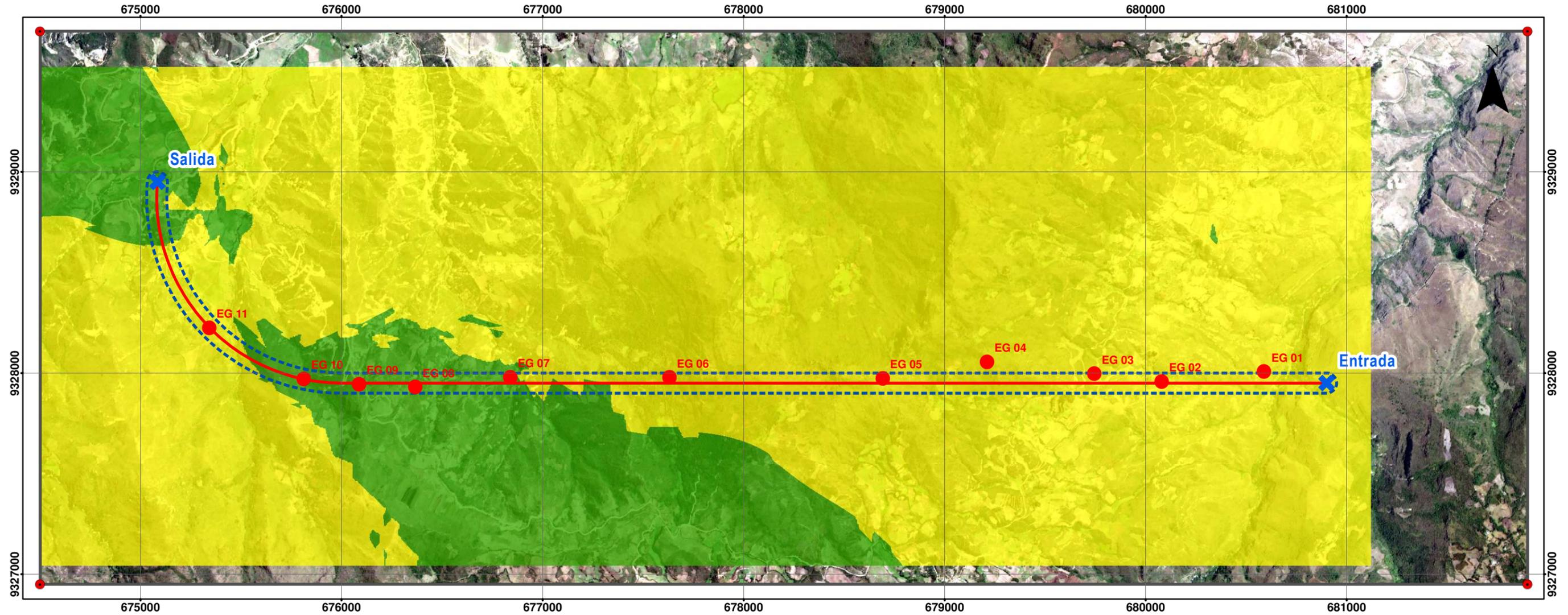


SIMBOLOGÍA	
	Estaciones Geomecánicas
	Vértices
	Entrada y Salida de Túnel
	Eje de Túnel
	Dique
	Túnel Proyectado
	Zona

Nº	ESTACIÓN GEOMECÁNICA	PROGRESIVA
1	EG 01	Km 0+000 - Km 0+316
2	EG 02	Km 0+316 - Km 0+739
3	EG 03	Km 0+739 - Km 1+173
4	EG 04	Km 1+173 - Km 1+699
5	EG 05	Km 1+699 - Km 2+489
6	EG 06	Km 2+489 - Km 3+452
7	EG 07	Km 3+452 - Km 4+041
8	EG 08	Km 4+041 - Km 4+425
9	EG 09	Km 4+425 - Km 5+700
10	EG 10	Km 4+700 - Km 5+092
11	EG 11	Km 5+092 - Km 5+982

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	GEOMECÁNICO Y PUNTOS DE CONTROL RMR	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	6
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	



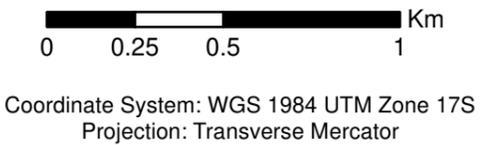
SIMBOLOGÍA

- Estaciones Geomecánicas
- Vértices
- ✕ Entrada y Salida de Túnel
- Eje de Túnel
- Túnel Proyectado
- Zona de Investigación

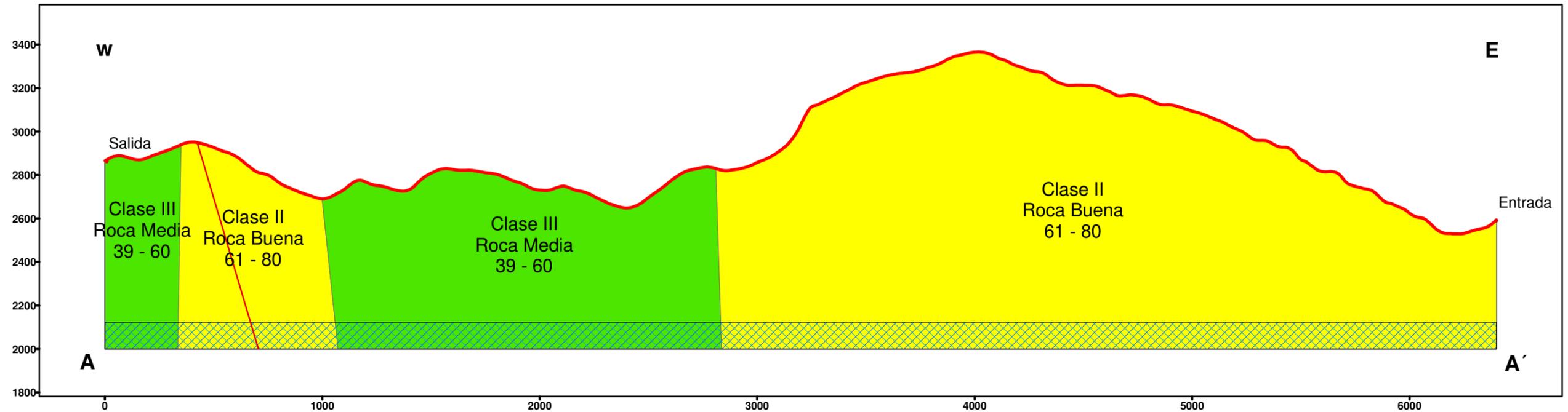
ZONIFICACIÓN RMR

Valores

- 39 - 60 - Roca Media
- 61 - 80 - Roca Buena



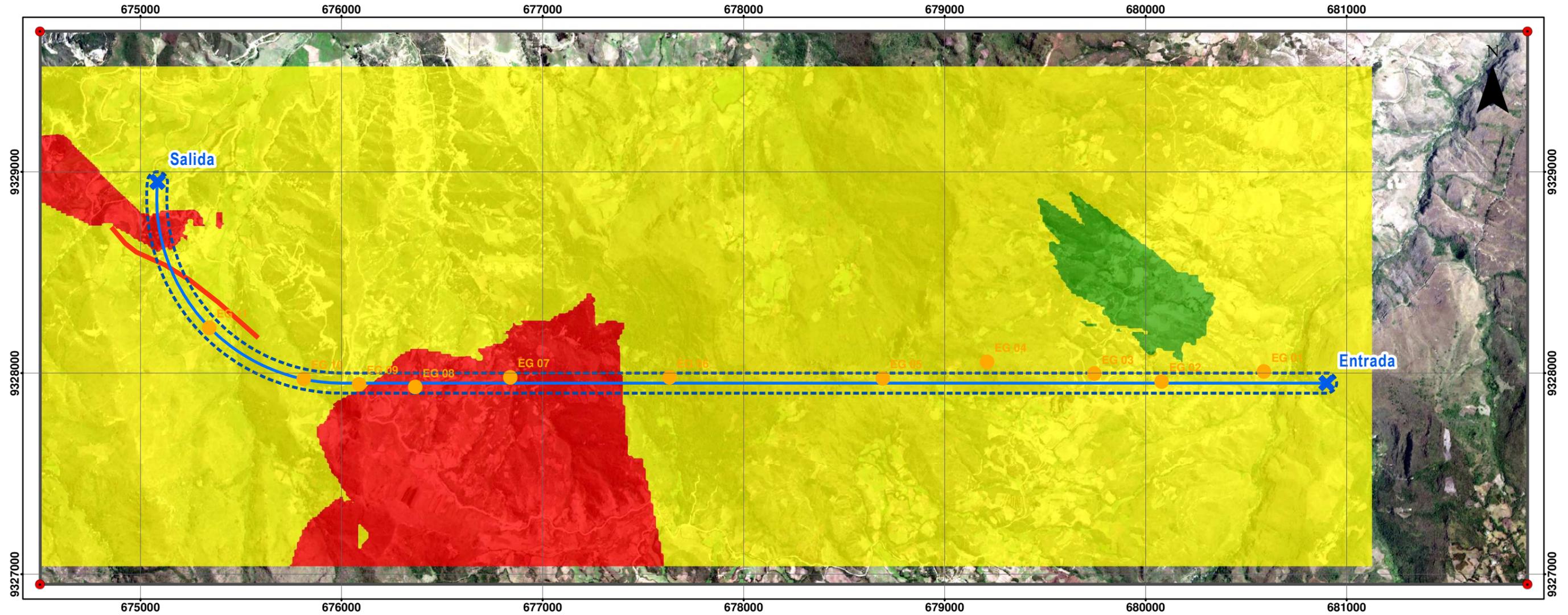
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	ZONIFICACIÓN GEOMECAÍNICA RMR	PLANO N°
	TESISISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	7
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	PROYECCIÓN DE RMR EN EL TÚNEL	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	8
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	



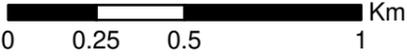
SIMBOLOGÍA

- Estaciones Geomecánicas
- Vértices
- ✕ Entrada y Salida de Túnel
- Eje de Túnel
- ~ Dique
- - - Túnel Proyectoado
- Zona de Investigación

ZONIFICACIÓN Q de BARTON

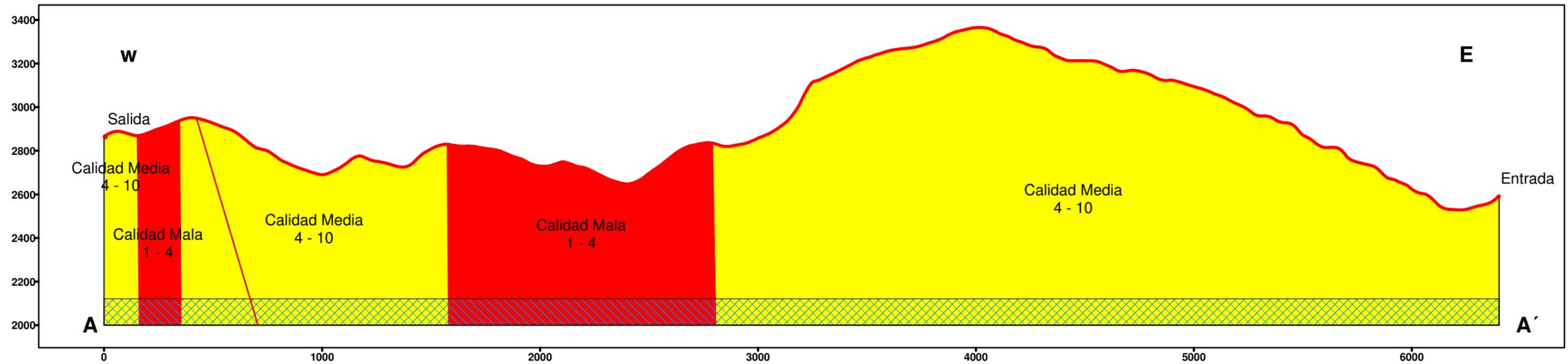
Valores

	1 - 4	- Calidad Mala
	4 - 10	- Calidad Media
	10 - 40	- Calidad Buena



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	ZONIFICACIÓN Q DE BARTON	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	9
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TUNEL DE TRASVASE DE AGUA DEL CANAL HUALLABAMBA DISTRITO DE MOTUPE REGIÓN LAMBAYEQUE		
	PROYECCIÓN DE Q DE BARTON EN EL TÚNEL	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN LUIS RONCAL BAZAN	10
	ASESOR: Dr. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
Cajamarca, Perú	Escala: 1 / 40 000	