

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Análisis de estabilidad del macizo rocoso en la carretera San Francisco-Santa Isabel combinando métodos de análisis cinemático, empíricos y métodos de equilibrio límite

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Geotecnia

Presentado por:

André Giovanni Carchi Bahamonde

Vanessa Liseth Luna Granda

Guayaquil - Ecuador

Año: 2026

Dedicatoria

A Dios, y a mis padres, Iván y Giomar, por su apoyo incondicional.

A mis amigos, en especial a José Luis, por alentarme e impulsarme a culminar con éxito esta tesis.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación profesional, permitiéndome aplicarlos en este importante trabajo.

A la Dra. Silvia Loaiza, al Dr. Maurizio Mulas y a Davide Besenzon, por su paciencia, guía y motivación durante el desarrollo de esta investigación.

A mi compañera de tesis, Vanessa Luna, por invitarme a formar parte de este trabajo, por el esfuerzo compartido y por el compromiso, nos sentimos muy orgullosos y que esperamos pueda servir de base para futuras investigaciones.

André Giovanni Carchi Bahamonde

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen del Cisne, a mi mamá América Granda por su apoyo incondicional. A mis sobrinos Santiago, Valentina, Abigail, Aitana y Víctor Jesús, a mi hna Juliana. A la PhD Silvia Loaiza, el PhD. Maurizio Mulas, y Davide Besenzon, por sus conocimientos brindados para culminar con éxito este proyecto. A mi compañero de tesis, André Carchi, por ser una persona motivadora y dedicada que puso el cien por ciento en este proyecto de titulación.

Vanessa Liseth Luna Granda

Declaración Expresa

Nosotros André Giovanni Carchi Bahamonde y Vanessa Liseth Luna Granda acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 27 de abril del 2026

André Giovanni Carchi
Bahamonde

Vanessa Liseth Luna
Granda

Evaluadores

Ph. D. Davide Besenzon Venegas

Profesor de Materia

Ph. D. Samantha Jiménez Oyola

Profesor de Materia

Ph. D. Silvia Loaiza Ambuludi

Tutor de proyecto

Resumen

El tramo comprendido entre el Túnel Minas de San Francisco y la Estación de Servicio San José presenta taludes rocosos con evidencias de inestabilidad asociadas al fracturamiento del macizo, la disposición estructural de las discontinuidades y la calidad geomecánica de las unidades presentes. En esta investigación se evaluó la estabilidad de un segmento de 12,9 km de la vía Cuenca–Girón–Pasaje mediante la integración de análisis cinemáticos, métodos empíricos y equilibrio límite. Los resultados muestran que, aunque algunas estaciones presentan roca intacta relativamente competente, la presencia de varias familias de discontinuidades, su orientación con respecto al talud y el grado de alteración del macizo favorecen principalmente mecanismos de falla planar y en cuña. Los índices SMR y Q/Q-slope evidencian condiciones geomecánicas desfavorables en la mayor parte de los taludes analizados, mientras que los factores de seguridad obtenidos mediante equilibrio límite confirman que varios sectores se encuentran en una condición cercana o inferior al umbral de estabilidad. Con base en estos resultados, se concluye que los sectores más críticos requieren medidas prioritarias de estabilización y un esquema de monitoreo geotécnico periódico que permita anticipar cambios en el comportamiento del macizo rocoso y reducir el riesgo asociado a deslizamientos y caída de material.

Palabras clave: estabilidad de taludes, discontinuidades, análisis cinemático, Q-slope, equilibrio límite.

Abstract

The road section between the Minas de San Francisco Tunnel and the San José Service Station includes rock slopes showing clear signs of instability related to rock-mass fracturing, structural discontinuity patterns, and the geomechanical quality of the geological units present in the area. This research evaluated the stability of a 12.9-km segment of the Cuenca–Girón–Pasaje road by integrating kinematic analysis, empirical methods, and limit equilibrium approaches. The results indicate that, although some stations are composed of relatively competent intact rock, the presence of several discontinuity sets, their orientation relative to the slope face, and the degree of rock-mass alteration mainly favor planar and wedge failure mechanisms. The SMR and Q/Q -slope indices show unfavorable geomechanical conditions in most of the analyzed slopes, while the factors of safety obtained from limit equilibrium analysis confirm that several sectors are close to or below acceptable stability conditions. Based on these findings, the most critical sectors require priority stabilization measures and a periodic geotechnical monitoring scheme to detect changes in rock-mass behavior and reduce the risk associated with landslides and rockfall.

Keywords: *slope stability, discontinuities, kinematic analysis, Q -slope, limit equilibrium.*

Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Capítulo 1.....	I
Introducción.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Ubicación del área de estudio.....	3
1.3. Planteamiento del problema.....	4
1.4. Justificación del problema.....	5
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo general.....	6
1.5.2. Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2.....	7
Marco Teórico.....	8
2.1. Macizo rocoso.....	8
2.2. Clasificaciones geomecánicas.....	9
2.2.1. Clasificación RMR.....	11
2.2.2. Índice Q de Barton.....	13
2.2.3. Criterios de rotura en material rocoso.....	14
2.3. Análisis de estabilidad de taludes rocosos.....	16
2.3.1. Análisis cinemático.....	17

2.3.2.	Métodos empíricos.....	20
2.3.3.	Análisis de Equilibrio Límite.....	21
2.4.	Geología Y MARCO GEOLÓGICO LOCAL.....	21
2.5.	Sistema de Fallas.....	22
2.6.	Estratigrafía.....	23
	Capítulo 3.....	24
	Metodología.....	25
3.1.	Introducción.....	25
3.2.	Definición de la zona de estudio.....	26
3.3.	Trabajo de Campo.....	27
3.3.1.	Levantamiento de información de campo.....	27
3.3.2.	Estaciones geomecánicas de estudio.....	31
3.3.3.	Caracterización geomecánica.....	31
3.3.4.	Análisis cinemático de los taludes.....	32
3.3.5.	Métodos empíricos.....	33
3.3.6.	Análisis de equilibrio límite.....	35
	Capítulo 4.....	36
	Resultados.....	37
4.1.	Análisis de estabilidad de los taludes rocosos.....	37
4.1.1.	Geometría y orientación de los taludes.....	37
4.1.2.	Parámetros geomecánicos del macizo rocoso (RocData).....	40
4.1.3.	Métodos empíricos.....	42
4.1.4.	Análisis cinemático.....	56
4.1.5.	Métodos de equilibrio límite.....	62
4.1.6.	Integración de resultados.....	74
	Capítulo 5.....	77

Conclusiones y recomendaciones	78
5.1. Conclusiones	78
5.2. Recomendaciones.....	80
Referencias	

Abreviaturas

SMR	Slope Mass Rating
Q-slope	Índice Q-slope de Barton
RMR	Rock Mass Rating
Q-system	Índice Q de Barton
JRC	Coefficiente de rugosidad de las juntas
JCS	Resistencia a compresión de las paredes de las juntas
UCS	Resistencia a compresión simple de la roca intacta
RQD	Índice de calidad de la roca (<i>Rock Quality Designation</i>)
SRF	Factor de reducción por esfuerzos
GSI	Índice de resistencia geológica (<i>Geological Strength Index</i>)
Jr	Índice de rugosidad de las discontinuidades
Jn	Número de familias de discontinuidades
Ja	Índice de alteración de las discontinuidades
Jw	Factor de reducción por agua
F1-F2-F3	Factores de ajuste del RMR en función de la orientación de las discontinuidades
F4	Factor de ajuste del RMR en función del método de excavación
β	Ángulo máximo de pendiente en Q-slope
ϕ_b	Ángulo de fricción básico
ϕ_r	Ángulo de fricción residual

ϕ_i	Ángulo de fricción instantáneo
σ_n	Esfuerzo normal
τ	Esfuerzo tangencial
γ	Peso específico
FS	Factor de seguridad

Simbología

ϕ_b : Ángulo de fricción básico.

ϕ_r : Ángulo de fricción residual.

σ_1 : Esfuerzo principal mayor.

σ_3 : Esfuerzo principal menor.

σ_n : Esfuerzo normal.

τ : Esfuerzo de corte.

a : Constante del macizo rocoso en el criterio generalizado de Hoek–Brown.

D : Factor de perturbación en el criterio generalizado de Hoek–Brown.

ε : Deformación axial.

E_i : Módulo de deformación de roca intacta.

E_m : Módulo de deformación de macizo rocoso.

GSI : Geological Strength Index. Índice Geológico de Resistencia.

JCS : Resistencia a compresión de las paredes de la discontinuidad.

JRC : Coeficiente de rugosidad de las juntas.

m_i : Constante de la roca intacta en el criterio generalizado de Hoek–Brown.

m_b : Constante del macizo rocoso en el criterio generalizado de Hoek–Brown.

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las estaciones geomecánicas de estudio	4
Figura 2. Principales tipos de discontinuidades según tamaño y origen	9
Figura 3. Relación entre la resistencia del martillo Schmidt, la resistencia uniaxial a compresión y la densidad de la roca	13
Figura 4. Factor JCS en función del peso unitario y dureza de Schmidt.....	16
Figura 5. Método de equilibrio limite (a) Criterio de falla (b) Descomposición de fuerzas .	17
Figura 6. Falla plana	18
Figura 7. Falla en cuña.....	19
Figura 9. Condiciones de deslizamiento falla por volcamiento.....	20
Figura 10. Mapa Geológico estructural del sur del Ecuador entre los 2°54'S hasta 4°25'S. Simplificado y modificado por Hungerbuhler (1997)	22
Figura 11. Inspección en campo caracterización del macizo rocoso	28
Figura 12. Vista general de las 10 estaciones de las Taludes geomecánicas.....	29
Figura 13. Diagrama de estabilidad Q-slope que relaciona Q_slope con el ángulo del talud β	54
Figura 14. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG1	56
Figura 15. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG2	57
Figura 16. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG3	57
Figura 17. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG4	57
Figura 18. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG5	58
Figura 19. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG6	58
Figura 20. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG7	58
Figura 21. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG8	59
Figura 22. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG9	59
Figura 23. Estereograma del análisis cinemático para la estación EG10	60

Figura 24. Análisis de Equilibrio Límite EG1: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	68
Figura 25. Análisis de Equilibrio Límite EG2: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	69
Figura 26. Análisis de Equilibrio Límite EG3: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	70
Figura 27. Análisis de Equilibrio Límite EG4: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	70
Figura 28. Análisis de Equilibrio Límite EG5: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	71
Figura 29. Análisis de Equilibrio Límite EG6: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	71
Figura 30. Análisis de Equilibrio Límite EG7-EG8: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	72
Figura 31. Análisis de Equilibrio Límite EG9: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	73
Figura 32. Análisis de Equilibrio Límite EG10: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar.....	73

Índice de tablas

Tabla 1. Primeras clasificaciones geomecánicas	10
Tabla 2. Sistema de valoración de la masa rocosa – RMR	11
Tabla 3. Guía para clasificar las condiciones de las discontinuidades (Bieniawski,1989).....	12
Tabla 4. Información general de la ubicación de cada talud rocoso	26
Tabla 5. Información general de la ubicación, geometría y orientación de los taludes de cada estación geomecánica.....	38
Tabla 6. Orientación de las discontinuidades obtenidas de las medidas con brújula en campo.	39
Tabla 7. Datos de martillo Schmidt tomados en campo de las estaciones geomecánicas.	40
Tabla 8. Parámetros geomecánicos del macizo rocoso obtenidos mediante RocData.....	41
Tabla 9. Parámetros geomecánicos base de las estaciones evaluadas	42
Tabla 10. Evaluación SMR – Estación EG1	43
Tabla 11. Evaluación SMR – Estación EG2	44
Tabla 12. Evaluación SMR – Estación EG3	45
Tabla 13. Evaluación SMR – Estación EG4	45
Tabla 14. Evaluación SMR – Estación EG5	47
Tabla 15. Evaluación SMR – Estación EG6	48
Tabla 16. Evaluación SMR – Estación EG7	49
Tabla 17. Evaluación SMR – Estación EG8	49
Tabla 18. Evaluación SMR – Estación EG9	51
Tabla 19. Evaluación SMR – Estación EG10	52
Tabla 20. Cálculo de los parámetros medios para identificar el Qslope de los taludes estudiados: U = inestable; S = estable. β_{max} calculado con $\beta = 20 \cdot \log_{10}(Qslope) + 65^\circ$ (Bar & Barton, 2017).	54
Tabla 21. Análisis cinemático: parámetros y resultados para determinar la estabilidad de los taludes estudiados: P = plana; W = cuña; T = Volcamiento; U = inestable; S = estable.....	60

Tabla 22. Análisis de Equilibrio Límite: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar	63
Tabla 23. Integración de resultados	74
Tabla 24. Recomendaciones para estaciones geomecánicas (EG1-EG10).....	80

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La vía Cuenca–Girón–Pasaje, correspondiente al eje vial Cumbe–Y de Corralitos (E59), constituye uno de los corredores más importantes del sur del Ecuador, ya que conecta la Sierra con la Costa y facilita la movilidad entre zonas productivas, comerciales y turísticas. Dentro de este corredor, el tramo comprendido entre el Túnel Minas de San Francisco y Santa Isabel presenta una problemática recurrente asociada a la inestabilidad de taludes rocosos, la cual afecta de manera directa la seguridad vial y la continuidad del tránsito.

En esta carretera son frecuentes los desprendimientos de roca, la caída de bloques y los deslizamientos, especialmente durante la temporada invernal. Estas inestabilidades están relacionadas con el fracturamiento del macizo rocoso, la presencia de discontinuidades y la influencia de factores hidrológicos y geomorfológicos que favorecen la pérdida de estabilidad en distintos sectores del trazado. De acuerdo con información oficial, la vía soporta un flujo vehicular importante y, pese a las intervenciones ejecutadas, mantiene varios puntos críticos con problemas de deslizamientos, asentamientos, socavones y deterioro de la calzada (Ministerio de Transporte y Obras Públicas [MTO], 2016).

Además, en años recientes se han reportado afectaciones relevantes a lo largo de la vía Cuenca–Girón–Pasaje, incluyendo deslizamientos recurrentes, grietas, hundimientos y colapsos localizados de la plataforma vial. Estas condiciones reflejan que la problemática no se limita al deterioro superficial de la carretera, sino que responde a una combinación de factores geológicos, geotécnicos e hidráulicos que requieren evaluación específica para cada sector intervenido (Primicias, 2023).

En el ámbito técnico, estudios recientes han demostrado la utilidad de integrar análisis cinemáticos, métodos empíricos y procedimientos de equilibrio límite para valorar la

estabilidad de taludes rocosos en la vía Cuenca–Girón–Pasaje. Delgado-Reivan et al. (2022) señalan que la combinación de estos enfoques permite mejorar la interpretación del comportamiento del macizo rocoso y reconocer con mayor claridad los mecanismos potenciales de rotura en sectores críticos de esta carretera.

En consecuencia, aunque existen antecedentes de mantenimiento, limpieza y estabilización en distintos tramos del corredor vial, todavía resulta necesario contar con evaluaciones específicas que permitan caracterizar el comportamiento geomecánico de los taludes rocosos y sustentar técnicamente futuras medidas de intervención.

1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el sur del Ecuador, entre las provincias de Azuay, El Oro y Loja, sobre la carretera Cuenca–Girón–Pasaje. El tramo analizado comprende el sector entre el Túnel Minas de San Francisco y la estación de servicio San José, en Santa Isabel, con una longitud aproximada de 12,9 km.

Desde el punto de vista estructural, este tramo se sitúa dentro del área de influencia de la falla de Girón, estructura geológica que se extiende hacia el sur del cantón Girón y que condiciona, en parte, el fracturamiento del macizo rocoso presente en la zona. Esta condición hace que el sector tenga especial interés geotécnico, debido a la relación existente entre estructura geológica, discontinuidades y estabilidad de taludes.

Las coordenadas UTM WGS84-17S del Túnel Minas de San Francisco son N 9633448 y E 669012, mientras que las de la estación de servicio San José corresponden a N 9630356 y E 679616.

Figura 1

Ubicación de las estaciones geomecánicas de estudio



1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tramo vial entre el Túnel Minas de San Francisco y Santa Isabel presenta condiciones recurrentes de inestabilidad en sus taludes rocosos, lo que constituye un riesgo permanente para la circulación vehicular y para la conservación de la infraestructura vial. A lo largo del año, y con mayor frecuencia durante la época lluviosa, se registran desprendimientos de roca, caída de bloques y deslizamientos de distinta magnitud que afectan la calzada e interrumpen parcialmente el tránsito.

La problemática se asocia al intenso fracturamiento del macizo rocoso, a la presencia de discontinuidades estructurales con orientaciones desfavorables y a factores adicionales como infiltración de agua, drenaje insuficiente y deterioro progresivo de algunos elementos de la vía. En distintos tramos del corredor Cuenca–Girón–Pasaje se han reportado también asentamientos, socavones y grietas, lo que evidencia que la estabilidad de la carretera depende no solo del estado del pavimento, sino también del comportamiento geotécnico del entorno rocoso y del sistema de drenaje (MTOPE, 2016; Primicias, 2023).

A pesar de que en esta vía se han realizado trabajos de atención y mantenimiento, no siempre se dispone de estudios geotécnicos específicos que permitan identificar con claridad los mecanismos de rotura en cada sector crítico, estimar la estabilidad de los taludes y

sustentar técnicamente medidas correctivas permanentes. Esta limitación dificulta la toma de decisiones orientadas a la prevención, estabilización y gestión del riesgo en el tramo estudiado.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de evaluar geotécnicamente los taludes rocosos localizados entre el Túnel Minas de San Francisco y Santa Isabel, mediante herramientas que permitan identificar los mecanismos potenciales de falla y valorar su estabilidad.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El estudio de estabilidad de los taludes rocosos en el tramo comprendido entre el Túnel Minas de San Francisco y la estación de servicio San José es necesario debido a la recurrencia de desprendimientos y deslizamientos que comprometen la seguridad de los usuarios y la operatividad de la vía. La inestabilidad del macizo rocoso genera condiciones de riesgo que pueden provocar accidentes, interrupciones del tránsito y afectaciones a la infraestructura vial.

Esta carretera cumple además una función estratégica en la conectividad del sur del país, al vincular zonas urbanas, sectores productivos y actividades comerciales con rutas de salida hacia la Costa. Por ello, cualquier afectación prolongada en su operación repercute en la movilidad regional y en el transporte de personas y mercancías.

Desde el punto de vista técnico, el desarrollo de un estudio geotécnico permitirá caracterizar el macizo rocoso, identificar los mecanismos de rotura más probables y evaluar la estabilidad de los taludes analizados. Esta información constituye una base importante para proponer criterios de intervención y para orientar futuras acciones de estabilización, mantenimiento y control de riesgos.

Asimismo, una evaluación adecuada contribuye a evitar soluciones empíricas o intervenciones insuficientemente fundamentadas, favoreciendo decisiones más consistentes con las condiciones geológicas y geomecánicas del sector. En este sentido, la presente

investigación aporta información útil para fortalecer la gestión técnica de la vía y mejorar la seguridad de su operación.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Analizar la estabilidad de los taludes rocosos mediante la obtención de parámetros geomecánicos y la aplicación de métodos cinemáticos, empíricos y de equilibrio límite, con el fin de identificar los principales mecanismos de rotura y evaluar la estabilidad de los taludes analizados.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Determinar los potenciales mecanismos de rotura en los taludes mediante la aplicación del análisis cinemático.
2. Evaluar las probabilidades de rotura de los taludes mediante la aplicación de métodos empíricos para taludes en roca.
3. Analizar la estabilidad de los taludes rocosos, mediante la aplicación de métodos de equilibrio límite.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso es un medio natural constituido por roca intacta, discontinuidades y, en muchos casos, agua. A diferencia del suelo, suele presentar menor deformabilidad y mayor resistencia a compresión. Sin embargo, su comportamiento no depende solo de la matriz rocosa, sino también de la presencia, orientación y condición de las discontinuidades (Hoek & Bray, 1981).

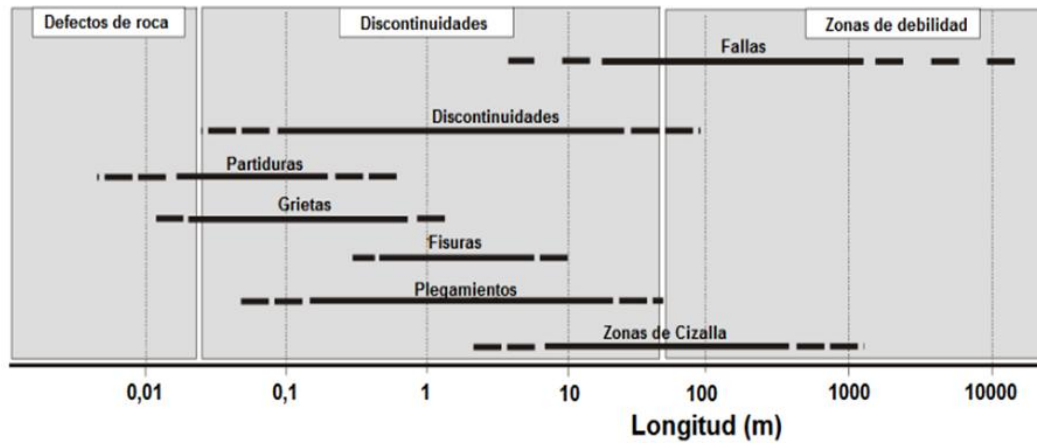
Cuando se analiza únicamente la porción de roca comprendida entre fracturas, resulta más preciso utilizar el término roca intacta o matriz rocosa. Singh (2010) indica que esta distinción es importante porque la respuesta del macizo no puede definirse únicamente a partir de muestras intactas de laboratorio, ya que en campo intervienen juntas, diaclasas, fallas y otros planos de debilidad que controlan su comportamiento mecánico.

Las discontinuidades constituyen superficies con resistencia a tracción mucho menor que la de la roca intacta. Por ello, la estabilidad de un macizo rocoso está fuertemente condicionada por parámetros como buzamiento, dirección, espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad, relleno y grado de alteración. En términos prácticos, el análisis del macizo implica estudiar conjuntamente la matriz rocosa y su red de discontinuidades.

Hoek (2007) advierte que los ensayos de laboratorio representan una porción muy pequeña del volumen real del macizo, por lo que la caracterización de campo es indispensable para interpretar el comportamiento in situ. En consecuencia, la descripción geomecánica del medio rocoso resulta fundamental para evaluar estabilidad y establecer criterios de diseño en taludes, excavaciones y obras subterráneas.

Figura 2

Principales tipos de discontinuidades según tamaño y origen



Nota. Adaptado de Palmström (1996).

La figura muestra cómo defectos de pequeña escala pueden evolucionar hacia estructuras mayores capaces de controlar la resistencia y estabilidad del macizo rocoso.

2.2. CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

Las clasificaciones geomecánicas se desarrollaron para sintetizar las condiciones del macizo rocoso mediante índices que integran observaciones geológicas, estructurales y mecánicas. Su utilidad radica en que permiten transformar datos de campo y laboratorio en criterios prácticos para el diseño y la evaluación de estabilidad.

Entre los sistemas más empleados destacan el Rock Mass Rating (RMR), el índice Q y el Geological Strength Index (GSI). El RMR considera la resistencia de la roca intacta, el fracturamiento, el estado de las discontinuidades, la presencia de agua y la orientación estructural. El índice Q incorpora parámetros relacionados con el RQD, el número de familias de discontinuidades, la rugosidad, la alteración de las juntas, el agua y el estado de esfuerzos. El GSI, en cambio, permite estimar la calidad del macizo a partir de su estructura y de la

condición superficial de las discontinuidades (Barton et al., 1974; Bieniawski, 1989; Hoek et al., 1995).

Estas clasificaciones no reemplazan un análisis detallado, pero sí constituyen una base útil para comparar sectores, reconocer condiciones desfavorables y estimar parámetros preliminares de comportamiento. En taludes rocosos, su empleo facilita la identificación de zonas con mayor susceptibilidad a inestabilidad.

Tabla 1

Primeras clasificaciones geomecánicas

País de origen	Clasificación	Descripción	Aplicaciones
Sudáfrica	RMR (Rock Mass Rating)	Clasificación basada en resistencia, grado de fracturación y tipo de roca (Bieniawski, 1973)	Diseño de soporte en túneles y excavaciones subterráneas.
Noruega	Q Index	Sistema que evalúa la calidad de la roca y su comportamiento bajo carga (Barton et al., 1974).	Diseño de túneles y estructuras en roca.
Internacional	GSI (Geological Strength Index)	Clasificación que relaciona el comportamiento de la roca con su geometría y discontinuidades (Hoek et al., 1995)	Evaluación en minería, estabilidad de taludes y proyectos mineros.

Además de los parámetros clásicos, el grado de meteorización y la presencia de rellenos blandos en las discontinuidades influyen de manera importante en la respuesta del macizo, ya que reducen la resistencia al corte y favorecen el movimiento entre bloques.

2.2.1. Clasificación RMR

El sistema RMR, desarrollado por Bieniawski, es una de las metodologías más difundidas para clasificar la calidad del macizo rocoso. Su formulación integra parámetros geomecánicos que, una vez sumados, ubican al macizo en categorías que van desde excelente hasta muy pobre (Bieniawski, 1976, 1989).

Entre los factores considerados están la resistencia de la roca intacta, el RQD, el espaciamiento de discontinuidades, el estado de las juntas, la presencia de agua y la orientación de las discontinuidades con respecto a la obra. Esta combinación permite obtener una valoración global del macizo y constituye una herramienta muy útil en el análisis de excavaciones, túneles y taludes.

Tabla 2

Sistema de valoración de la masa rocosa – RMR

Parámetro	Valoración				
Persistencia	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Persistencia	6	4	2	1	0
Apertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm
Apertura	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
Rugosidad	6	5	3	1	0

Relleno	Ninguno	Relleno duro <5 mm	Relleno duro >5 mm	Relleno blando <5 mm	Relleno blando >5 mm
Relleno	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
Alteración	6	5	3	1	0

Nota. Adaptado de Bieniawski (1989).

Cada parámetro valorado en el RMR refleja una condición que influye en la estabilidad del macizo. La persistencia, apertura y rugosidad afectan directamente la resistencia al corte de las discontinuidades, mientras que el relleno, la alteración y el agua pueden disminuir de forma importante la capacidad resistente del sistema.

Tabla 3

Guía para clasificar las condiciones de las discontinuidades (Bieniawski, 1989)

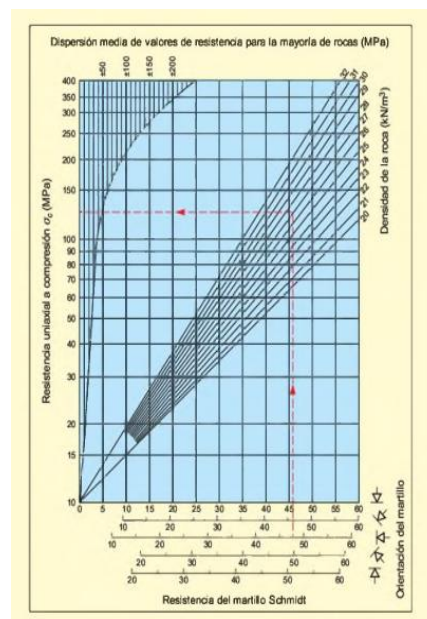
	Ensayo carga puntual	>10	4-oct	2-abr	1-feb	--	
1	Resistencia de la roca sana (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	may-25	1-may <1
	Compresión simple (MPa)						
	Valoración	15	12	7	4	2	1 0
2	RQD	90-100	75-90	50-75	25-50	<25	
	Valoración	20	17	13	8	3	
3	Separación juntas	>2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	<0.06 m	
	Valoración	20	15	10	5	0	

4	Estado diaclasas	Muy rugosas / Discontinuas / Borde sano y duro	Ligeram. rugosas <1 mm / Borde duro	Ligeram. rugosas <1 mm / Bordes blandos	Rellenos blandos <5 mm / Aberturas continuas	Rellenos blandos >5 mm / Continuas	
		Valoración	30	25	20	10	0
5	Presencia de agua	Caudal en 10m túnel: Nulo	Nulo	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
		σ_w/σ_3	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
		Estado	Seco	Ligeram. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
Valoración		15	10	7	4	0	

Nota. Adaptado de Bieniawski (1989).

Figura 3

Relación entre la resistencia del martillo Schmidt, la resistencia uniaxial a compresión y la densidad de la roca



Nota. Adaptado de Hoek y Bray (1981).

2.2.2. Índice Q de Barton

El índice Q fue propuesto por Barton, Lien y Lunde (1974) para clasificar macizos rocosos mediante una formulación que integra calidad del macizo, cantidad de

discontinuidades, rugosidad, alteración, agua y condiciones de esfuerzo. Debido a su escala exponencial, este sistema permite representar un amplio rango de condiciones geomecánicas.

Su aplicación fue inicialmente muy importante en ingeniería de túneles, pero posteriormente se extendió a otros problemas de geotecnia en roca. En la práctica, el índice Q facilita la identificación de sectores problemáticos y complementa otras clasificaciones utilizadas en estabilidad de taludes.

2.2.3. Criterios de rotura en material rocoso.

Los criterios de rotura permiten representar las condiciones a partir de las cuales la roca o el macizo alcanzan el fallo. En mecánica de rocas, estos enfoques son fundamentales porque relacionan el estado de esfuerzos con la resistencia disponible del material y ayudan a interpretar mecanismos de inestabilidad.

Entre los modelos más utilizados se encuentran el criterio generalizado de Hoek-Brown y el criterio de Barton-Bandis. El primero está orientado a la resistencia global del macizo rocoso; el segundo, a la resistencia al corte de las discontinuidades, aspecto especialmente relevante en taludes rocosos.

2.2.3.1. Criterio Generalizado de Hoek-Brown

El criterio de Hoek-Brown fue desarrollado para estimar la resistencia de macizos rocosos fracturados a partir de la resistencia de la roca intacta y de la calidad estructural del medio. La formulación de Hoek, Carranza-Torres y Corkum (2002) incorpora constantes que reflejan la condición del macizo y su grado de perturbación.

Este criterio reconoce que la resistencia del macizo es menor que la de la roca intacta debido a la influencia de fracturas, alteración y estructura interna. Por ello utiliza parámetros como m_b , s y a , que permiten ajustar la envolvente de falla al comportamiento real del medio rocoso.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + UCS \left(mb \frac{\sigma_3}{UCS} + s \right)^\alpha \quad (1.1)$$

Donde σ_1 y σ_3 representan los esfuerzos principales mayor y menor, respectivamente; UCS corresponde a la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta; y mb , s y α son constantes dependientes de la calidad del macizo.

$$mb = m \exp\left(\frac{GSI-100}{28-12B}\right) \quad (1.2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (1.3)$$

$$\alpha = 0,5 + \frac{1}{6} \left(\exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right) \quad (1.4)$$

2.2.3.2. Criterio de falla de Barton-Bandis

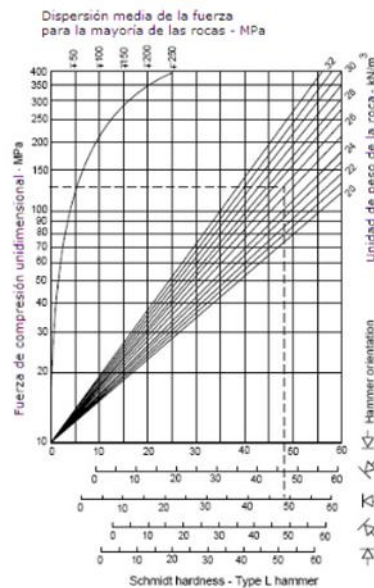
El criterio de Barton-Bandis se centra en la resistencia al corte de las discontinuidades. Barton y Bandis (1980) plantearon que esta resistencia no depende solo del esfuerzo normal, sino también de la rugosidad de la superficie y de la resistencia de sus paredes.

Este criterio resulta particularmente útil en estabilidad de taludes, ya que muchas fallas se desarrollan siguiendo planos estructurales persistentes. Barton (1976) propuso una relación empírica que incorpora parámetros como JRC y JCS, permitiendo representar de manera más realista el comportamiento de discontinuidades rugosas.

La resistencia a compresión de la pared de la discontinuidad (JCS) puede estimarse mediante correlaciones con la dureza Schmidt y el peso específico de la roca.

Figura 4

Factor JCS en función del peso unitario y dureza de Schmidt



Nota. Adaptado de Hoek y Bray (1981)

2.2.3.3. Métodos de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite permiten evaluar la estabilidad de taludes mediante la comparación entre fuerzas desestabilizadoras y resistentes. Su fundamento consiste en que el sistema permanece estable mientras la resistencia disponible supere la demanda de movimiento (Duncan & Wright, 2005).

En macizos rocosos, estos métodos se aplican con frecuencia para analizar bloques, cuñas o planos potencialmente inestables definidos por discontinuidades. A partir de ellos se obtiene el factor de seguridad, uno de los parámetros más utilizados en geotecnia para expresar el nivel de estabilidad del sistema.

2.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS

El análisis de estabilidad de taludes rocosos busca identificar los mecanismos de falla posibles y cuantificar la condición resistente del sistema. El parámetro más habitual para

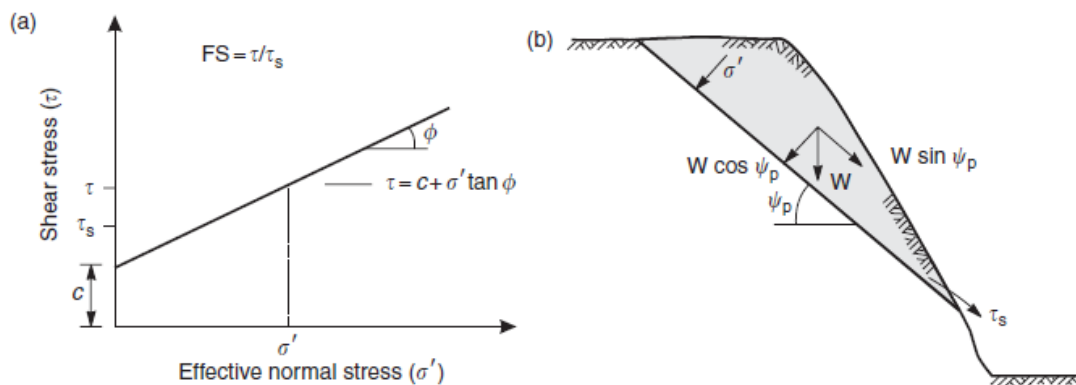
expresar esta condición es el factor de seguridad (FS), definido como la relación entre las fuerzas que resisten el movimiento y las que lo provocan.

Cuando el factor de seguridad es mayor que 1, el talud se considera estable; cuando es menor que 1, se interpreta que existe inestabilidad. Este enfoque constituye la base de numerosos procedimientos de análisis empleados en geotecnia.

$$FS = \frac{\Sigma \text{fuerzas de resistencia}}{\Sigma \text{Fuerzas deslizantes}} \quad (1.5)$$

Figura 5

Método de equilibrio límite (a) Criterio de falla (b) Descomposición de fuerzas



Nota. Adaptado de Wyllie y Mah (2004).

2.3.1. Análisis cinemático

El análisis cinemático es una herramienta fundamental en estabilidad de taludes rocosos, ya que permite establecer si la orientación de las discontinuidades es compatible con mecanismos de falla potenciales. Su función principal es reconocer condiciones geométricas favorables al movimiento, más que cuantificar directamente la estabilidad (Bishop, 1955).

A partir de la relación entre la orientación del talud y la de las discontinuidades, pueden identificarse mecanismos como falla plana, falla en cuña y falla por volcamiento.

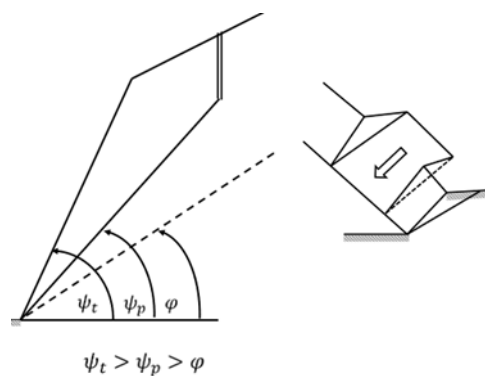
2.3.1.1. Análisis de falla plana

La falla plana se produce cuando una masa rocosa se desliza a lo largo de una discontinuidad cuya orientación es aproximadamente paralela a la cara del talud. Para que este mecanismo ocurra, el buzamiento del plano debe ser menor que el del talud, pero suficiente para superar el ángulo de fricción movilizado.

En su evaluación intervienen la orientación del plano, la geometría del talud, la cohesión, el ángulo de fricción y, en ciertos casos, la presencia de agua, que puede reducir la resistencia efectiva.

Figura 6

Falla plana



Nota. Adaptado de Wyllie y Mah (2004).

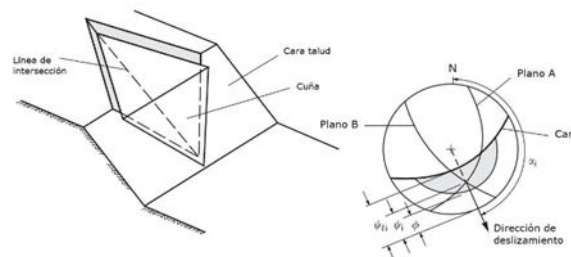
2.3.1.2. Análisis de falla en cuña

La falla en cuña ocurre cuando dos discontinuidades se intersectan y forman un bloque cuya línea de intersección tiene una orientación favorable para deslizarse hacia la cara del talud. Este mecanismo depende de la geometría de los planos y de la resistencia al corte movilizada a lo largo de ambas superficies.

Su análisis requiere considerar la inclinación de la línea de intersección, la orientación del talud y los parámetros resistentes del material, por lo que suele demandar una interpretación espacial más detallada.

Figura 7

Falla en cuña



Nota. Adaptado de Wyllie y Mah (2004).

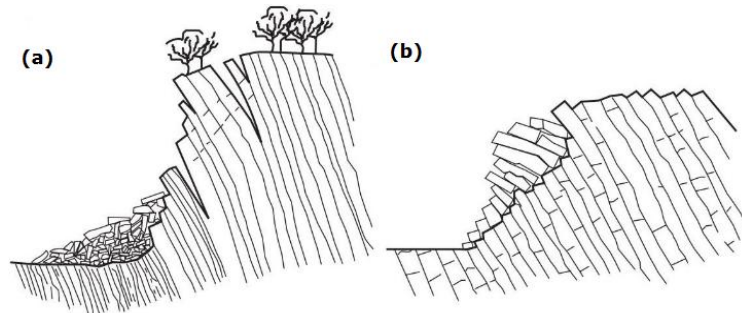
2.3.1.3. Análisis de falla por volcamiento

La falla por volcamiento se caracteriza por la rotación de bloques o columnas rocosas alrededor de una base o punto de apoyo. En este caso, el problema principal no es el deslizamiento sobre un plano continuo, sino el giro progresivo del material hacia el exterior del talud.

Este mecanismo está controlado por la geometría del talud, la orientación de las discontinuidades y las propiedades resistentes del macizo. Factores como la meteorización o el agua pueden favorecer la pérdida de estabilidad.

Figura 8

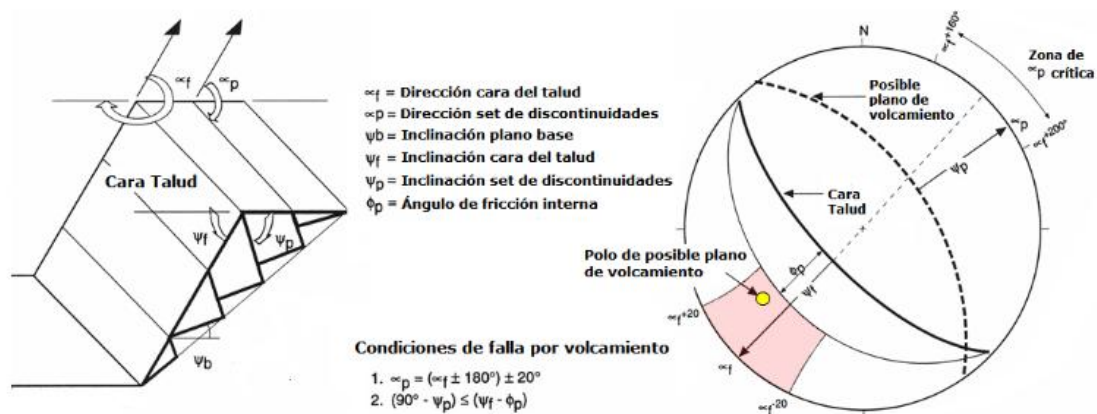
Falla por volcamiento



Nota. Adaptado de Wyllie y Mah (2004).

Figura 8

Condiciones de deslizamiento falla por volcamiento



Nota. Adaptado de Wyllie y Mah (2004).

2.3.2. Métodos empíricos

Los métodos empíricos se basan en la experiencia acumulada y en la correlación entre parámetros del macizo y el comportamiento observado en taludes rocosos. Su principal ventaja es que permiten obtener valoraciones preliminares de estabilidad de manera relativamente rápida.

Entre los más conocidos se encuentran el SMR, que adapta el RMR al caso de taludes, y el Q-slope, derivado del índice Q para estimar la inclinación máxima de una pendiente sin soporte. Estos enfoques se utilizan como complemento de los análisis cinemáticos y de equilibrio límite (Romana, 1985; Barton, 2002; Chung & Lee, 2000; Bar & Barton, 2017).

2.3.3. Análisis de Equilibrio Límite

El análisis de equilibrio límite es una de las metodologías más empleadas para cuantificar la estabilidad de un talud rocoso. Este enfoque permite modelar bloques o superficies potencialmente inestables y calcular el factor de seguridad considerando geometría, peso, cohesión, fricción y condiciones hidráulicas.

Su utilidad es mayor en problemas de falla plana y falla en cuña, donde las discontinuidades controlan claramente el mecanismo de inestabilidad. Por ello, suele usarse como complemento del análisis cinemático y de los métodos empíricos.

2.4. GEOLOGÍA Y MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La evolución geológica del sur del Ecuador está asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, proceso que ha generado deformación cortical, vulcanismo, acreción de terrenos y levantamiento andino. Como resultado, la región presenta una estructura compleja donde interactúan unidades metamórficas, volcánicas y sedimentarias de distintas edades.

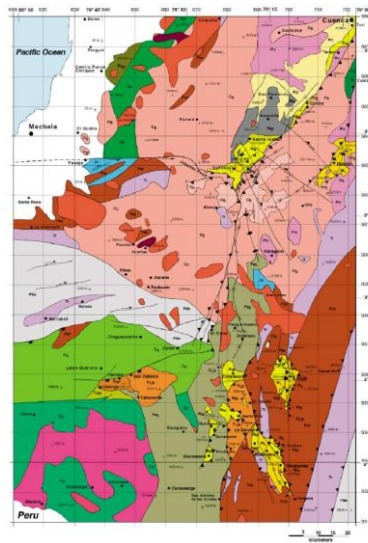
En el contexto austral andino, la dinámica tectónica favoreció el desarrollo de cuencas intramontanas rellenas por secuencias clásticas y volcano-sedimentarias. Dentro de este marco se reconocen depósitos vinculados al Grupo Saraguro y a las formaciones Jubones y Santa Isabel, que constituyen parte importante del contexto geológico del área de estudio (Hungerbühler, 1997; Hungerbühler et al., 2002; Pratt et al., 1997).

A escala local, el grado de fracturamiento del macizo está condicionado por sistemas de fallas con tendencias dominantes NE–SO y NO–SE. Estas estructuras controlan tanto la

disposición de las unidades litoestratigráficas como la orientación de discontinuidades que influyen sobre la estabilidad de los taludes.

Figura 9

*Mapa Geológico estructural del sur del Ecuador entre los 2°54'S hasta 4°25'S.
Simplificado y modificado por Hungerbuhler (1997).*



Nota. Adaptado de compilaciones geológicas regionales basadas en Hungerbühler (1997) y Pratt et al. (1997).

2.5. SISTEMA DE FALLAS

Los sistemas de fallas del sur del Ecuador constituyen elementos estructurales clave porque controlan el contacto entre unidades geológicas y condicionan el fracturamiento del macizo rocoso. En el área destacan especialmente los sistemas Bulubulú y Jubones.

El sistema Bulubulú ha sido interpretado como un límite tectónico regional entre distintos terrenos geológicos. Aunque su localización exacta puede ser difícil en sectores cubiertos por rocas volcánicas más jóvenes, su influencia se reconoce en la inclinación de estratos y en la separación entre dominios litoestratigráficos (Pratt et al., 1997; Dunkley & Gaibor, 1997).

La falla Jubones ha sido interpretada como una estructura con componentes tanto inversos como de transcurrencia siniestral. Su relevancia radica en que controla contactos entre unidades metamórficas, basaltos oceánicos y formaciones volcánicas más jóvenes, por lo que constituye uno de los principales elementos estructurales de la región (Pratt et al., 1997).

2.6. ESTRATIGRAFÍA

La estratigrafía regional evidencia una evolución geológica compleja en la que intervienen unidades metamórficas antiguas, secuencias oceánicas acrecionadas y una importante cobertura volcánica y volcano-sedimentaria del Cenozoico.

Las ignimbritas corresponden a depósitos piroclásticos generados por corrientes de densidad asociadas a erupciones explosivas. Sus propiedades texturales, mineralógicas y estructurales permiten reconstruir eventos eruptivos y, además, influyen en la respuesta geotécnica del macizo rocoso (Branney & Kokelaar, 2002).

Las rocas metamórficas de la región se asocian al Complejo Metamórfico El Oro, mientras que el contexto geológico local también incluye unidades de origen oceánico acrecionado y una importante cobertura volcánica y volcano-sedimentaria. Por su parte, el Grupo Saraguro reúne materiales volcánicos y volcanoclásticos de composición andesítica a dacítica, con presencia de ignimbritas riolíticas en niveles superiores. En este marco, las formaciones Jubones y Santa Isabel constituyen unidades relevantes para comprender la evolución volcánica y sedimentaria del área de estudio (Aspden et al., 1995; Hungerbühler, 1997; Hungerbühler et al., 2002).

Finalmente, el Q-slope puede considerarse una adaptación del índice Q orientada al análisis preliminar de estabilidad en pendientes rocosas, útil como complemento de los métodos cinemáticos y de equilibrio límite (Bar & Barton, 2015, 2017).

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

La caracterización geomecánica y el análisis de estabilidad de taludes rocosos constituyen etapas fundamentales en la evaluación de infraestructura vial desarrollada en zonas de relieve accidentado, ya que permiten identificar condiciones de inestabilidad y reconocer mecanismos potenciales de falla que pueden afectar la seguridad de los usuarios y la operatividad de la vía. En taludes excavados en roca, la estabilidad depende en gran medida de la geometría del talud, de la disposición de las discontinuidades y de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso.

La evaluación de este tipo de taludes requiere observaciones directas en campo, orientadas a describir la matriz rocosa y las discontinuidades que controlan el comportamiento del macizo. Para ello, es necesario registrar parámetros como orientación, espaciamiento, apertura, rugosidad, persistencia, grado de meteorización y resistencia superficial de la roca. Estos datos permiten establecer la calidad del macizo y constituyen la base para la aplicación de análisis estructurales, empíricos y analíticos.

En la presente investigación, la estabilidad de los taludes rocosos se evaluó mediante una metodología integrada. En primer lugar, se realizó el levantamiento geomecánico en campo para caracterizar las condiciones estructurales y resistentes del macizo rocoso. Posteriormente, se aplicó el análisis cinemático para identificar mecanismos potenciales de rotura. Finalmente, se utilizaron métodos empíricos y procedimientos de equilibrio límite para estimar la susceptibilidad a la inestabilidad y cuantificar la estabilidad de los taludes estudiados.

3.2. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para el levantamiento de información se seleccionaron diez taludes rocosos distribuidos a lo largo del tramo vial analizado. Cada talud fue representado mediante una estación geomecánica, elegida con base en la presencia de evidencias de caída de material rocoso, desprendimientos o condiciones geométricas desfavorables que representaban riesgo para los usuarios de la vía.

La selección de estas estaciones permitió incluir sectores con variaciones litológicas, diferencias en el grado de meteorización, cambios en la geometría del talud y distintos arreglos estructurales del macizo rocoso. De esta manera, fue posible obtener información representativa de las condiciones geomecánicas presentes en el corredor vial estudiado.

En cada estación se registraron las propiedades estructurales y geomecánicas del macizo rocoso. Se midieron las principales familias de discontinuidades, considerando su buzamiento y dirección de buzamiento mediante brújula geológica. Además, se evaluaron parámetros como rugosidad, grado de meteorización, resistencia superficial de la roca, calidad del macizo, altura del talud, orientación y litología.

La información recopilada permitió construir la base de datos utilizada posteriormente en los análisis cinemáticos, empíricos y de equilibrio límite. Las coordenadas de ubicación de cada estación se presentan en el sistema UTM, datum WGS 84, zona 17S.

Tabla 4

Información general de la ubicación de cada talud rocoso

Estación geomecánica	COORDENADAS		Altura talud (m)
	ESTE	OESTE	
EG1	679649	9630441	9.73
EG2	678782	9630188	21.64

EG3	677994	9630082	12.11
EG4	674946	9630562	8.70
EG5	672880	9631312	14.15
EG6	672114	9631753	16.43
EG7	671596	9631939	13.53
EG8	669629	9632973	13.21
EG9	669269	9633333	10.13
EG10	669107	9633491	13.92

Nota. La tabla presenta las coordenadas UTM (Este y Oeste) y la altura de los diez taludes evaluados mediante estaciones geomecánicas. Las alturas oscilan entre 8,70 m y 21,64 m.

3.3. TRABAJO DE CAMPO

3.3.1. Levantamiento de información de campo

El levantamiento de información se realizó mediante la instalación de estaciones geomecánicas en los diez taludes seleccionados, con el propósito de caracterizar detalladamente las condiciones del macizo rocoso. Para ello se emplearon herramientas y equipos de uso geotécnico, entre ellos martillo de geólogo, martillo Schmidt, flexómetro de 10 m, regla milimetrada, peine de Barton, cámara fotográfica digital, receptor GPS y brújula geológica.

Las mediciones de buzamiento y dirección de buzamiento, tanto del talud como de las discontinuidades, se efectuaron con brújula geológica. La ubicación de cada estación fue registrada con GPS. Además, se tomaron fotografías de detalle y de contexto general de cada talud, con el fin de respaldar la descripción geomecánica y documentar visualmente las condiciones observadas en campo.

Las actividades de campo se desarrollaron durante los meses de enero y febrero de 2024. Para sistematizar la información obtenida se utilizó una hoja de mapeo geomecánico, en la cual se registraron de manera ordenada las observaciones realizadas en cada estación.

Figura 10

Inspección en campo caracterización del macizo rocoso



Figura 112

Vista general de las 10 estaciones de las Taludes geomecánicas

a. *Vista general de Talud Estación*

Geomecánica 1



b. *Vista general de Talud Estación*

Geomecánica 2



c. *Vista general de Talud Estación*

Geomecánica 3



d. *Vista general de Talud Estación*

Geomecánica 4



e. *Vista general de Talud Estación*

Geomecánica 5

f. *Vista general de Talud Estación*

Geomecánica 6





g. Vista general de Talud Estación

Geomecánica 7



i. Vista general de Talud Estación

Geomecánica 9



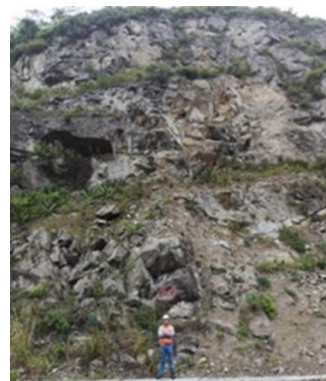
h. Vista general de Talud Estación

Geomecánica 8



j. Vista general de Talud Estación

Geomecánica 10



3.3.2. Estaciones geomecánicas de estudio

La caracterización de los taludes se efectuó mediante diez estaciones geomecánicas, cada una asociada a un talud representativo dentro del tramo evaluado. En estas estaciones se analizaron las propiedades estructurales del macizo rocoso y se obtuvieron parámetros útiles para valorar su calidad geomecánica.

Como parte del levantamiento, se estimó la resistencia de la matriz rocosa mediante el uso del martillo Schmidt, instrumento ampliamente utilizado para inferir la resistencia superficial de rocas intactas a partir del índice de rebote. Este equipo permitió realizar lecturas rápidas en campo sobre superficies frescas, íntegras y libres de discontinuidades visibles.

Para evitar resultados no representativos, se seleccionaron zonas de medición sin alteración marcada, sin fracturas abiertas y con adecuada exposición de roca sana. En cada punto se realizaron múltiples lecturas y se descartaron aquellos valores asociados a superficies irregulares, meteorizadas o claramente influenciadas por discontinuidades. Los valores válidos fueron promediados para obtener un resultado representativo de la resistencia superficial de la roca en cada estación.

3.3.3. Caracterización geomecánica

La caracterización geomecánica del macizo rocoso se realizó a partir de la información obtenida en cada estación. Para ello se describieron las principales familias de discontinuidades y se registraron sus orientaciones estructurales mediante mediciones de buzamiento y dirección de buzamiento.

Adicionalmente, se evaluaron parámetros relevantes para la clasificación del macizo y para el análisis de estabilidad, entre ellos:

- rugosidad superficial de las discontinuidades mediante peine de Barton;
- grado de meteorización de la roca;

- resistencia superficial estimada con martillo Schmidt;
- características geométricas del talud, como altura, buzamiento y orientación;
- litología y rasgos generales del macizo rocoso.

La información obtenida constituyó la base para la aplicación de los métodos empíricos, el análisis cinemático y el análisis por equilibrio límite.

3.3.4. Análisis cinemático de los taludes

El análisis cinemático se desarrolló con el objetivo de identificar los posibles mecanismos de falla en los taludes estudiados, considerando los modos de rotura más frecuentes en macizos rocosos: falla plana, falla en cuña y falla por volcamiento. Este tipo de análisis permite evaluar la compatibilidad geométrica entre la orientación del talud y la disposición de las discontinuidades.

Para este propósito se empleó el software Dips, que permite representar las discontinuidades mediante proyecciones estereográficas y analizar la relación entre los planos estructurales y la geometría del talud. Cada familia de discontinuidades fue tratada como un conjunto de planos con orientación similar, susceptibles de comportarse como superficies de debilidad dentro del macizo.

Con el fin de incorporar la variabilidad natural de la orientación de las discontinuidades, se consideró una tolerancia angular de 20° en los límites laterales del análisis. Este criterio permitió evaluar de manera más realista la dispersión de las fracturas dentro de cada familia estructural.

El análisis se orientó a identificar las combinaciones geométricas capaces de favorecer distintos mecanismos de rotura. En el caso de la falla en cuña, se evaluó la intersección entre dos discontinuidades capaces de generar una línea de salida compatible con la orientación del talud. Para la falla por volcamiento, se analizaron sectores con discontinuidades subverticales y geometrías que pudieran inducir el giro de bloques o

columnas rocosas. En cuanto a la falla plana, se revisó la presencia de discontinuidades con buzamientos cercanos y desfavorables respecto a la inclinación del talud.

Los resultados del análisis cinemático constituyeron una base importante para la interpretación estructural de los taludes y para la aplicación posterior de los métodos empíricos y de equilibrio límite.

3.3.5. Métodos empíricos

3.3.5.1. Clasificación SMR

Para la evaluación empírica de la estabilidad de los taludes se aplicó el sistema Slope Mass Rating (SMR), propuesto por Romana (1985). Este método corresponde a una adaptación del índice RMR orientada específicamente al análisis de taludes en roca, e incorpora la influencia de la orientación estructural de las discontinuidades respecto de la cara del talud.

La aplicación del SMR en las diez estaciones se basó en el cálculo del **RMR básico** a partir de los parámetros geomecánicos observados en campo, y en la posterior aplicación de factores de corrección asociados a la relación geométrica entre el talud y las discontinuidades, al mecanismo potencial de rotura y al método de excavación.

Los factores de corrección permiten reflejar la influencia estructural de las discontinuidades sobre la estabilidad del talud, aspecto especialmente importante en el corredor estudiado, donde la orientación de las juntas constituye uno de los principales condicionantes del comportamiento geomecánico.

Para cada estación se calcularon los valores de RMR básico, los factores de corrección y el valor final de SMR. Esto permitió establecer una clasificación empírica de la estabilidad de los taludes y reconocer aquellos sectores con condiciones geométricas más desfavorables.

3.3.5.2. Índice Q de Barton y Q-slope

El sistema de clasificación Q, desarrollado por Barton, Lien y Lunde (1974), es uno de los métodos más utilizados para evaluar la calidad del macizo rocoso. A partir de este sistema, Bar y Barton (2015, 2017) desarrollaron el índice Q-slope, orientado específicamente al análisis de estabilidad de taludes rocosos.

El índice Q-slope se fundamenta en parámetros del macizo rocoso relacionados con calidad estructural, rugosidad, alteración de juntas, condiciones de agua y factores de reducción por esfuerzos. Su aplicación permite obtener una referencia empírica del comportamiento esperado del talud y constituye un complemento útil del análisis cinemático y del equilibrio límite.

El índice Q-slope se calcula utilizando la siguiente ecuación general derivada del sistema Q:

$$Q_{\text{slope}} = \frac{\text{RQD}}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{\text{SRF}} \quad (2.1)$$

Donde:

RQD (Rock Quality Designation): Porcentaje de calidad del macizo rocoso.

J_n : Número de conjuntos de discontinuidades.

J_r : Rugosidad de las paredes de las discontinuidades.

J_a : Alteración de las paredes de las discontinuidades.

J_w : Reducción por condiciones de agua.

SRF (Stress Reduction Factor): Factor de reducción por esfuerzos.

Para su determinación se estimaron en campo los parámetros requeridos, entre ellos el grado de fracturamiento, el número de familias de discontinuidades, la rugosidad de las juntas, su alteración y las condiciones de humedad. Con base en esta información, se obtuvieron valores representativos para cada estación geomecánica.

La aplicación del sistema Q y de Q-slope permitió clasificar empíricamente la calidad del macizo rocoso y valorar la susceptibilidad de los taludes a presentar problemas de inestabilidad, integrando esta interpretación con los resultados cinemáticos y analíticos desarrollados posteriormente.

3.3.6. Análisis de equilibrio límite

El análisis de equilibrio límite se aplicó con el propósito de cuantificar la estabilidad de los taludes rocosos y estimar factores de seguridad asociados a los mecanismos de rotura identificados previamente. Este enfoque permitió complementar la interpretación cinemática y empírica mediante una valoración analítica del comportamiento potencial del macizo.

Para este análisis se emplearon los programas RocPlane y SWedge, herramientas especializadas para el estudio de falla plana y falla en cuña, respectivamente. En ambos casos se incorporaron parámetros geomecánicos obtenidos en campo, como orientación del talud, orientación de discontinuidades, cohesión, ángulo de fricción y geometría general del problema.

En el caso de RocPlane, se evaluó la estabilidad de bloques con potencial de deslizamiento sobre una sola discontinuidad. En SWedge, se analizaron bloques generados por la intersección de dos discontinuidades, con el fin de estimar el comportamiento de cuñas potencialmente inestables.

Los factores de seguridad obtenidos mediante estos modelos permitieron valorar cuantitativamente la estabilidad de los taludes estudiados y establecer una comparación con los resultados del análisis cinemático y de los métodos empíricos.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LOS TALUDES ROCOSOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de estabilidad aplicado a diez taludes rocosos localizados a lo largo del tramo comprendido entre el Túnel Minas de San Francisco y la estación de servicio San José, en la carretera Cuenca–Girón–Pasaje. El estudio se estructuró a partir de tres enfoques complementarios: análisis cinemático, métodos empíricos y métodos de equilibrio límite. Esta integración permitió valorar de forma conjunta la geometría del talud, las características estructurales del macizo rocoso y la resistencia disponible frente a distintos mecanismos de rotura.

Los resultados se presentan según la secuencia metodológica adoptada en la investigación. En primer lugar, se resume la geometría y orientación de los taludes, así como la disposición de las discontinuidades principales. Posteriormente, se exponen los parámetros geomecánicos obtenidos para cada estación y, con base en ellos, se presentan los resultados de los métodos empíricos, del análisis cinemático y del análisis por equilibrio límite. Finalmente, se integra la información para identificar los sectores más críticos y los mecanismos de falla predominantes.

4.1.1. Geometría y orientación de los taludes

La caracterización geométrica de los taludes incluyó la determinación de coordenadas UTM, altura del talud, buzamiento, dirección de buzamiento, peso unitario y formación geológica correspondiente a cada estación geomecánica. Esta información constituye la base para los análisis posteriores, ya que la geometría del talud condiciona la posible interacción entre la cara expuesta y las discontinuidades del macizo rocoso.

Tabla 5

Información general de la ubicación, geometría y orientación de los taludes de cada estación geomecánica.

Estación geomecánica	Coordenadas		Altura talud (m)	DIP TALUD (°)	DIP DIR TALUD (°)	Peso unitario (MN/m ³)	Formación geológica
	ESTE	OESTE					
EG1	679649	9630441	9.73	87	156	0.023	F. JUBONES
EG2	678782	9630188	21.64	81	161	0.023	F. JUBONES
EG3	677994	9630082	12.11	84	184	0.024	G. SARAGURO
EG4	674946	9630562	8.7	90	179	0.023	G. SARAGURO
EG5	672880	9631312	14.15	72	185	0.022	F. SANTA ISABEL
EG6	672114	9631753	16.43	82	215	0.023	G. SARAGURO
EG7	671596	9631939	13.53	83	173	0.025	F. JUBONES
EG8	669629	9632973	13.21	74	208	0.025	F. JUBONES
EG9	669269	9633333	10.13	58	176	0.025	G. SARAGURO
EG10	669107	9633491	13.92	64	131	0.023	F. JUBONES

A partir de los datos resumidos en la Tabla 5, se observa que los taludes presentan alturas comprendidas entre 8,70 m y 21,64 m, con buzamientos que oscilan entre 58° y 90°. En términos generales, los mayores valores de inclinación corresponden a los taludes EG1, EG3, EG4, EG6 y EG7, lo cual representa una condición geométrica más exigente desde el

punto de vista de estabilidad. Asimismo, las estaciones se distribuyen sobre tres unidades geológicas principales: Formación Jubones, Grupo Saraguro y Formación Santa Isabel, hecho que permite reconocer diferencias litológicas y geomecánicas a lo largo del tramo estudiado.

Posteriormente se determinaron las orientaciones de las discontinuidades principales. En todas las estaciones se identificaron cuatro familias dominantes, denominadas J1, J2, J3 y J4. Esta caracterización estructural permitió establecer las combinaciones geométricas susceptibles de generar fallas planares, fallas en cuña o volcamiento.

Tabla 6

Orientación de las discontinuidades obtenidas de las medidas con brújula en campo.

Estación geomecánica	J1		J2		J3		J4	
	DIP (°)	DIP DIR (°)	DIP (°)	DIP DIR (°)	DIP (°)	DIP DIR (°)	DIP (°)	DIP DIR (°)
EG1	88	50	21	61	35	135	16	175
EG2	90	254	33	112	1	251	28	180
EG3	79	267	66	320	21	226	23	135
EG4	90	114	15	151	37	231	12	169
EG5	86	114	21	193	28	208	33	62
EG6	76	306	47	291	38	208	15	291
EG7	8	268	88	153	48	254	50	121
EG8	59	109	56	340	86	300	40	244
EG9	55	176	61	324	78	141	38	186
EG10	67	238	7	84	74	105	32	27

La Tabla 6 muestra que el macizo rocoso presenta un patrón estructural complejo, con discontinuidades de buzamientos y direcciones variables. En varios taludes se observan combinaciones de familias con intersecciones potencialmente desfavorables respecto de la orientación del talud, condición que explica la recurrencia de mecanismos de falla en cuña y, en menor medida, de falla plana. Esta configuración estructural resulta especialmente relevante en estaciones como EG4, EG6, EG7, EG9 y EG10, donde ciertas familias de discontinuidades presentan orientaciones geoméricamente compatibles con inestabilidad.

4.1.2. Parámetros geomecánicos del macizo rocoso (RocData)

La determinación de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso constituyó una etapa fundamental del análisis, ya que permitió establecer valores de resistencia representativos para su posterior utilización en los métodos de equilibrio límite. Estos parámetros se estimaron mediante el software RocData 4.0, empleando el criterio generalizado de Hoek–Brown y su transformación a parámetros equivalentes de Mohr–Coulomb, concretamente cohesión y ángulo de fricción, requeridos para el modelamiento en RocPlane y SWedge.

La resistencia de la roca intacta se estimó a partir de los datos obtenidos con martillo Schmidt en cada estación. Los valores resultantes muestran una variación importante entre estaciones, con valores altos en sectores asociados a la Formación Jubones y valores bajos en estaciones correspondientes al Grupo Saraguro y a la Formación Santa Isabel. Esta diferencia sugiere contrastes significativos en la competencia del material rocoso a lo largo del tramo analizado.

Tabla 7. Datos de martillo Schmidt tomados en campo de las estaciones geomecánicas.

Estación geomecánica	MPA
1	55
2	55
3	45
4	44
5	10
6	10

7	65
8	70
9	14
10	41

Los resultados de la Tabla 7 indican que las estaciones EG7 y EG8 presentan los mayores valores de resistencia, con 65 MPa y 70 MPa, respectivamente, mientras que EG5 y EG6 registran los valores más bajos, ambos con 10 MPa. Esto evidencia que el macizo no presenta un comportamiento homogéneo y que existen sectores con mayor susceptibilidad a degradación mecánica y pérdida de resistencia.

A partir de estos datos, junto con el GSI, el parámetro m_i , el factor de disturbio y el peso unitario, se obtuvieron los parámetros del criterio de Hoek–Brown y su equivalente en Mohr–Coulomb. Los resultados muestran diferencias claras entre estaciones y permiten identificar cuáles presentan condiciones geomecánicas más desfavorables.

Tabla 8

Parámetros geomecánicos del macizo rocoso obtenidos mediante RocData

Estación geomecánica	sigci (Mpa)	GSI	m_i	D	m_b	s	a	sig3max (Mpa)	Peso unitario (MN/m ³)	Altura talud (m)	c (Mpa)	phi (deg)
EG1	55	29	13	1	0.08	7.26E-06	0.52	0.1941	0.023	9.73	0.051	37.95
EG2	55	30	13	1	0.09	8.57E-06	0.52	0.4035	0.023	21.64	0.084	32.9
EG3	45	24	13	1	0.06	3.15E-06	0.53	0.2363	0.024	12.11	0.042	30.49
EG4	44	23	13	1	0.05	2.67E-06	0.54	0.1671	0.023	8.7	0.032	32.07
EG5	10	28	13	1	0.08	6.14E-06	0.53	0.2239	0.022	14.15	0.029	22.95
EG6	10	19	25	1	0.08	1.37E-06	0.55	0.2635	0.023	16.43	0.027	20.31
EG7	65	29	13	1	0.08	7.26E-06	0.52	0.287	0.025	13.53	0.069	36.16

EG8	70	30	25	1	0.17	8.57E-06	0.52	0.2992	0.025	13.53	0.09	43.18
EG9	14	23	13	1	0.05	2.67E-06	0.54	0.1867	0.025	10.13	0.023	22.84
EG10	41	29	13	1	0.08	7.26E-06	0.52	0.2619	0.023	13.92	0.055	33.21

4.1.3. Métodos empíricos

4.1.3.1. Clasificación SMR (Slope Mass Rating)

En términos generales, las estaciones asociadas a la Formación Jubones, como EG1, EG2, EG7, EG8 y EG10, muestran valores más altos de resistencia de roca intacta, cohesión y ángulo de fricción. En contraste, las estaciones EG3, EG4, EG5, EG6 y EG9 presentan parámetros resistentes más bajos, lo cual es consistente con materiales más fracturados, alterados o menos competentes. El caso más favorable corresponde a EG8, con 70 MPa de resistencia de roca intacta, cohesión de 0,09 MPa y ángulo de fricción de 43,18°. Por el contrario, EG6 presenta uno de los escenarios más desfavorables, con solo 10 MPa de resistencia intacta, cohesión de 0,027 MPa y ángulo de fricción de 20,31°.

Estos resultados permiten inferir que la estabilidad del tramo no depende únicamente de la geometría de los taludes, sino también de la calidad del macizo rocoso en cada estación. En este sentido, la resistencia del material y la condición del macizo constituyen variables decisivas para interpretar los mecanismos de rotura y el nivel de estabilidad observado.

Tabla 9

Parámetros geomecánicos base de las estaciones evaluadas

Estación	GSI	RQD	UCS (MPa)	RMR
EG1	29	0.02	55	34
EG2	30	0.00	55	35

EG3	24	0.00	45	29
EG4	23	0.00	44	28
EG5	28	0.00	10	33
EG6	19	0.00	10	24
EG7	28	0.01	65	33
EG8	30	0.00	70	35
EG9	23	0.00	14	28
EG10	29	0.00	41	34

A partir de los valores de GSI, RQD, resistencia a compresión simple y RMR, se obtuvo el RMR básico de cada estación, el cual posteriormente fue corregido mediante los factores F1, F2, F3 y F4 para obtener el valor final de SMR. Los resultados de las Tablas 10 a 19 muestran el comportamiento de cada estación frente a fallas planares, por volcamiento y en cuña, considerando las familias de discontinuidades y sus intersecciones.

Tabla 10

Evaluación SMR – Estación EGI

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	-6	-8	25.1	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J2	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	22.4	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J3	0.4	0.9	$\frac{-}{60}$	-8	5.6	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J4	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	22.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

T	J2	0.2	1	0	-8	26	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J3	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	22.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J4	0.2	1	0	-8	26	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.7	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	-3.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	22.4	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	24.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J3-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	24.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

Tabla 11*Evaluación SMR – Estación EG2*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	-6	-8	26.1	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J2	0.2	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	20.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J3	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	25.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

P	J4	0.7	0.4	$\bar{-}$ 60	-8	10.2	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\bar{-}$ 25	-8	23.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J2	0.2	1	-6	-8	26.1	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J3	0.2	1	0	-8	27	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J4	0.2	1	0	-8	27	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	1	0.4	$\bar{-}$ 60	-8	3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	1	0.2	$\bar{-}$ 60	-8	18	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	1	0.4	$\bar{-}$ 60	-8	3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.2	0.2	$\bar{-}$ 60	-8	25.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J4	0.9	0.4	$\bar{-}$ 60	-8	6.6	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J3-J4	0.2	0.2	$\bar{-}$ 60	-8	25.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

Tabla 12*Evaluación SMR – Estación EG3*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	$\bar{-}$ 50	-8	13.5	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J2	0.2	1	$\bar{-}$ 60	-8	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J3	0.2	0.4	$\bar{-}$ 60	-8	17.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

P	J4	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	17.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	17.3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J2	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	17.3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J3	0.2	1	0	-8	21	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J4	0.2	1	0	-8	21	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	1	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	1	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	17.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J3-J4	1	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

Tabla 13*Evaluación SMR – Estación EG4*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	-6	-8	19.1	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J2	0.4	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J3	0.2	0.9	$\frac{-}{60}$	-8	12.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J4	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	13.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	16.3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

T	J2	0.2	1	0	-8	20	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J3	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	16.3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J4	0.2	1	0	-8	20	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J2	0.4	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.4	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	3.2	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	0.4	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	13.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J4	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	13.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J3-J4	0.4	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

Tabla 14*Evaluación SMR – Estación EG5*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	0	-8	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J2	0.9	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	4.6	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J3	0.4	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	15.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J4	0.2	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	18.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	21.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J2	0.2	1	0	-8	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

T	J3	0.2	1	0	-8	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J4	0.2	1	0	-8	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	0.7	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	8.2	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.7	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	8.2	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	21.4	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J3	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J3-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

Tabla 15*Evaluación SMR – Estación EG6*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	$\frac{-}{50}$	-8	8.5	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J2	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J3	0.9	0.9	$\frac{-}{60}$	-8	-27.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	14.65	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	12.25	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J2	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	12.25	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

T	J3	0.2	1	-6	-8	15.1	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J4	0.2	1	0	-8	16	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J2	0.9	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	-4.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.7	0.9	$\frac{-}{60}$	-8	-19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	1	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.4	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	-0.8	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	14.65	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J3-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	14.65	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

Tabla 16*Evaluación SMR – Estación EG7*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J2	0.4	1	-6	-8	22.6	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J3	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	16	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J4	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	16	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	0	-8	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J2	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	21.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J3	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	21.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

T	J4	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	21.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	0.7	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	8.2	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.2	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	18.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J3	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	16	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J3-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	23.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

Tabla 17*Evaluación SMR – Estación EG8*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	18	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J2	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	18	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J3	0.2	1	0	-8	27	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J4	0.2	0.9	$\frac{-}{60}$	-8	19.35	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	23.25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J2	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	23.25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

T	J3	0.2	1	$\bar{-}$ 25	-8	23.25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J4	0.2	1	-6	-8	26.1	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	0.2	0.7	$\bar{-}$ 60	-8	20.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J3	0.2	0.2	$\bar{-}$ 60	-8	25.65	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J4	0.4	0.4	$\bar{-}$ 60	-8	17.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.2	1	$\bar{-}$ 60	-8	18	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J4	0.2	0.7	$\bar{-}$ 60	-8	20.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J3-J4	0.9	0.9	$\bar{-}$ 60	-8	-16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

Tabla 18*Evaluación SMR – Estación EG9*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	1	1	$\bar{-}$ 50	-8	-30	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J2	0.2	1	-6	-8	19.1	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J3	0.2	1	0	-8	20	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
P	J4	0.7	0.9	$\bar{-}$ 60	-8	-15.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	-6	-8	19.1	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J2	0.2	1	-6	-8	19.1	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

T	J3	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	16.3	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J4	0.2	1	0	-8	20	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J2	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	11	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	18.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J3	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	18.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J2-J4	0.2	0.4	$\frac{-}{60}$	-8	16.4	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J3-J4	0.2	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	13.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

Tabla 19*Evaluación SMR – Estación EG10*

Rotura	Familia	F. de corrección				SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas
		F1	F2	F3	F4					
P	J1	0.2	1	-6	-8	25.1	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J2	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	24.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J3	0.4	1	-6	-8	23.6	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
P	J4	0.2	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
T	J1	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	22.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J2	0.2	1	0	-8	26	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas

T	J3	0.2	1	$\frac{-}{25}$	-8	22.3	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
T	J4	0.2	1	0	-8	26	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J1-J2	0.7	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J3	0.2	1	$\frac{-}{60}$	-8	17	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas
W	J1-J4	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	24.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J3	0.2	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	24.7	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J2-J4	0.4	0.2	$\frac{-}{60}$	-8	22.4	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas
W	J3-J4	0.2	0.7	$\frac{-}{60}$	-8	19.7	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas

En conjunto, los resultados evidencian que la mayoría de las estaciones se ubican dentro de clases IV y V del sistema SMR, correspondientes a condiciones malas o muy malas de estabilidad. Este patrón confirma que, desde el punto de vista empírico, el corredor presenta una susceptibilidad importante a la inestabilidad. Las estaciones más críticas corresponden a EG3, EG4, EG6 y EG9, todas ellas asociadas al Grupo Saraguro, donde predominan valores de SMR clase V y condiciones de estabilidad totalmente desfavorables. Estos resultados son consistentes con el elevado grado de fracturamiento, meteorización y baja resistencia observado en campo.

La estación EG5, correspondiente a la Formación Santa Isabel, presenta también condiciones desfavorables, con predominio de clases IV y V, lo que sugiere una estabilidad limitada asociada a un macizo alterado y de menor resistencia. Por otro lado, las estaciones ubicadas en la Formación Jubones, como EG1, EG2, EG7, EG8 y EG10, muestran en general

una calidad geomecánica relativamente mejor; sin embargo, varias de sus combinaciones estructurales continúan clasificándose en clase IV y, en algunos casos, clase V, debido a la orientación desfavorable de las discontinuidades respecto a la cara del talud.

En consecuencia, la clasificación SMR confirma que la estabilidad del tramo está fuertemente condicionada tanto por la calidad del macizo como por la relación geométrica entre discontinuidades y talud. La falla en cuña aparece como uno de los mecanismos más recurrentes, mientras que las condiciones más críticas se concentran en estaciones asociadas a litologías menos competentes o más intensamente fracturadas.

4.1.3.2. Índice Q-slope

El índice Q-slope se utilizó como herramienta empírica complementaria para valorar la estabilidad de los taludes y estimar el ángulo máximo permisible en condiciones naturales sin soporte. Para ello se determinaron los parámetros medios del sistema Q, incluyendo el número de familias de discontinuidades, la rugosidad relativa, la alteración de juntas, las condiciones de agua y el factor de reducción por esfuerzos, y posteriormente se obtuvo el valor de Q-slope correspondiente a cada estación.

Tabla 20

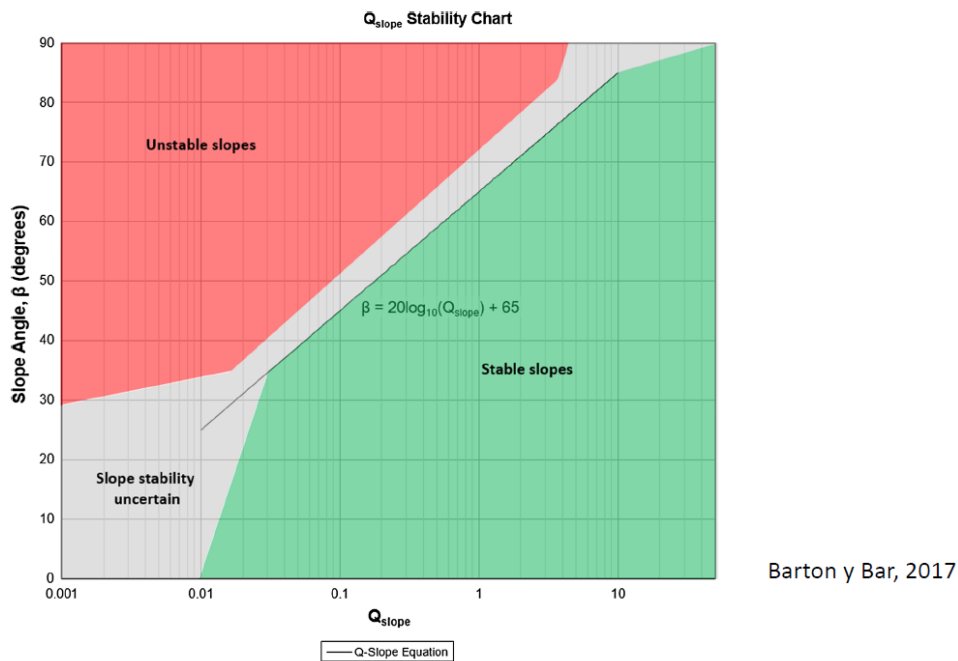
Cálculo de los parámetros medios para identificar el Qslope de los taludes estudiados: U = inestable; S = estable. β_{max} calculado con $\beta = 20 \cdot \log_{10}(Qslope) + 65^\circ$ (Bar & Barton, 2017).

Estación geomecánica	RQD	Jn	Jr/Ja	O	Q	Q-slope	β (°)	Estabilidad
EG1	1	9	1.7	1	0.189	0.189	50.53	U
EG2	1	9	1.4	0.75	0.156	0.143	48.11	U
EG3	1	9	1.1	0.75	0.122	0.119	46.51	U
EG4	1	9	1.1	0.75	0.122	0.119	46.51	U
EG5	1	9	1.1	1	0.122	0.122	46.73	U
EG6	1	9	0.8	1	0.089	0.089	43.99	U
EG7	1	9	1.7	1	0.189	0.189	50.53	U

EG8	1	9	2	0.75	0.222	0.187	50.44	U
EG9	1	9	0.9	1	0.1	0.1	45	U
EG10	1	9	1.4	1	0.156	0.156	48.86	U

Figura 123

Diagrama de estabilidad Q-slope que relaciona Q_{slope} con el ángulo del talud β



Los resultados del índice Q-slope muestran diferencias espaciales en la calidad del macizo rocoso y en la capacidad de los taludes para mantenerse estables sin soporte. En términos generales, los valores obtenidos indican que no todas las estaciones presentan el mismo comportamiento, y que la estabilidad potencial varía en función de la calidad estructural y resistente del macizo. Esta tendencia es coherente con lo observado en los resultados del SMR y con la variabilidad geomecánica previamente identificada mediante RocData.

Aunque la información resumida en la tabla evidencia sectores con mejor respuesta relativa, el conjunto de resultados confirma que varias estaciones presentan una estabilidad limitada, especialmente aquellas asociadas a macizos más alterados o intensamente

fracturados. En este sentido, el Q-slope refuerza la interpretación obtenida mediante SMR y constituye un respaldo adicional para reconocer los sectores más susceptibles a requerir medidas de estabilización.

4.1.4. Análisis cinemático

El análisis cinemático permitió evaluar la compatibilidad geométrica entre la orientación del talud y la disposición de las discontinuidades presentes en cada estación. Para ello se empleó el software DIPS, utilizando la proyección estereográfica de los polos de discontinuidad y la orientación de la cara del talud, incorporando además el ángulo de fricción instantáneo obtenido mediante RocData. Este procedimiento permitió identificar la posibilidad geométrica de tres mecanismos de rotura: falla plana, falla en cuña y volcamiento.

Figura 134

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG1.

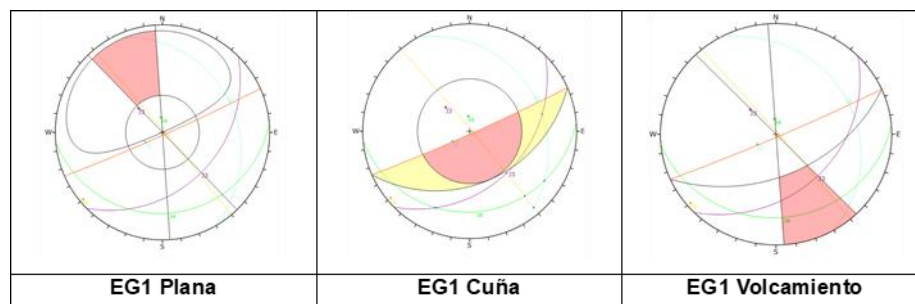
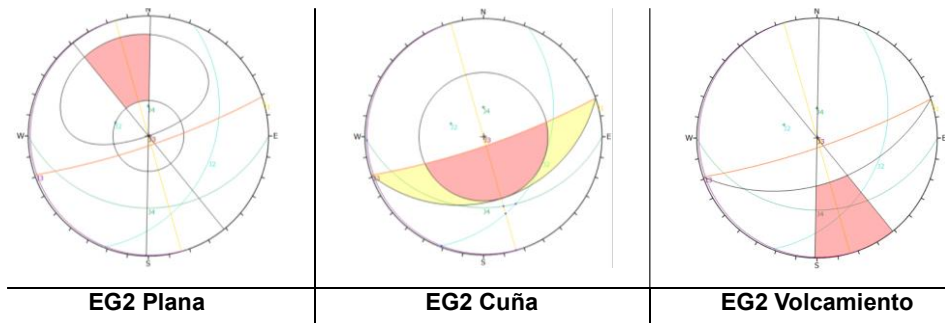
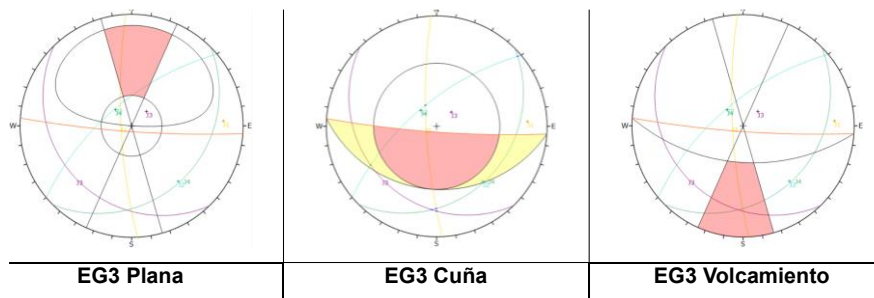


Figura 145

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG2.

**Figura 156**

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG3.

**Figura 167**

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG4.

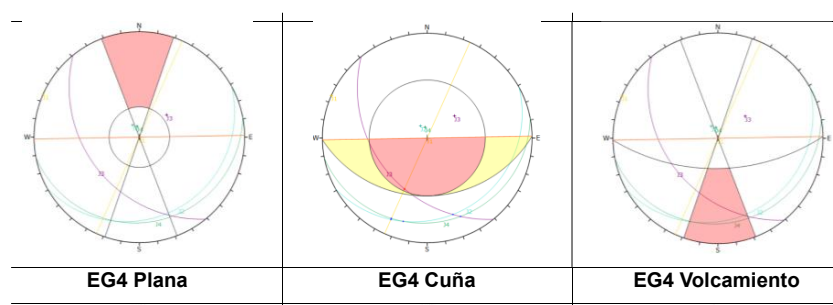
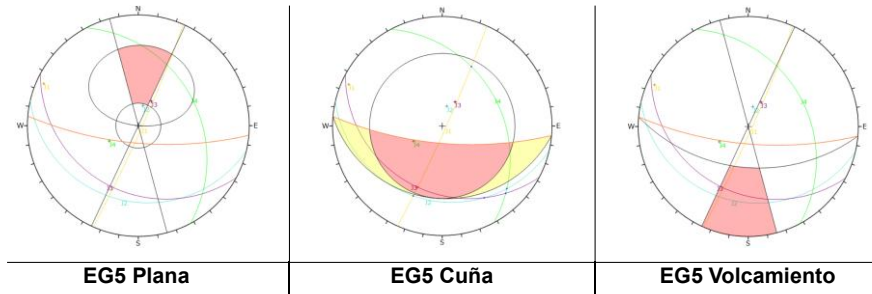
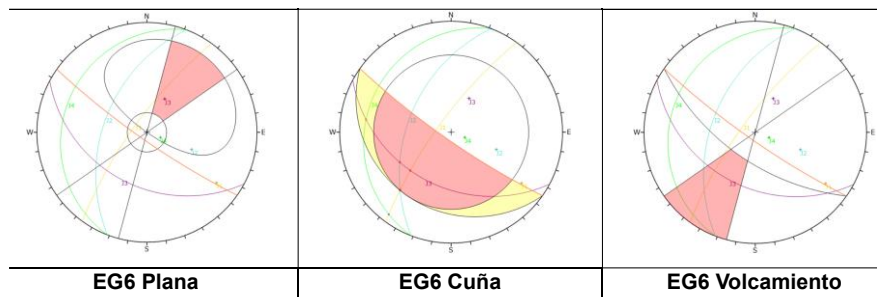


Figura 178

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG5.

**Figura 189**

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG6.

**Figura 19**

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG7.

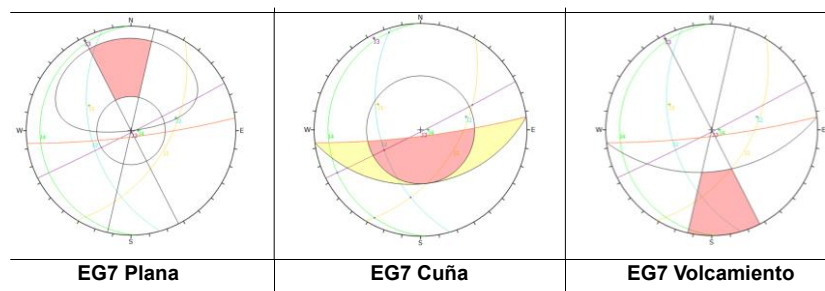
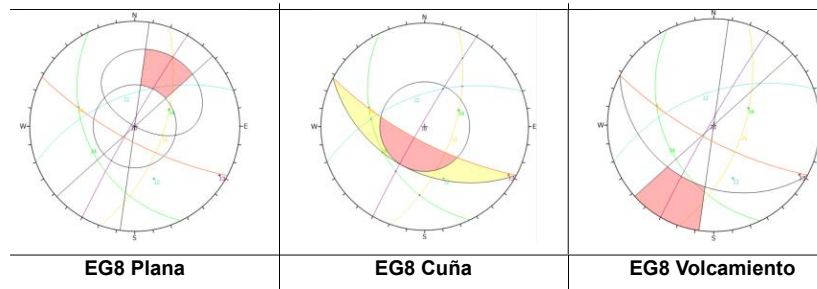


Figura 20

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG8.

**Figura 21**

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG9.

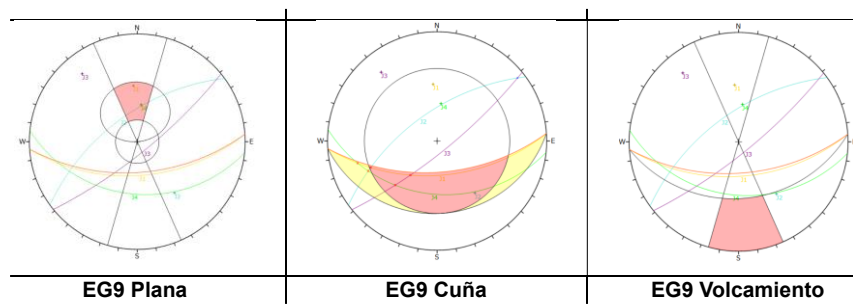
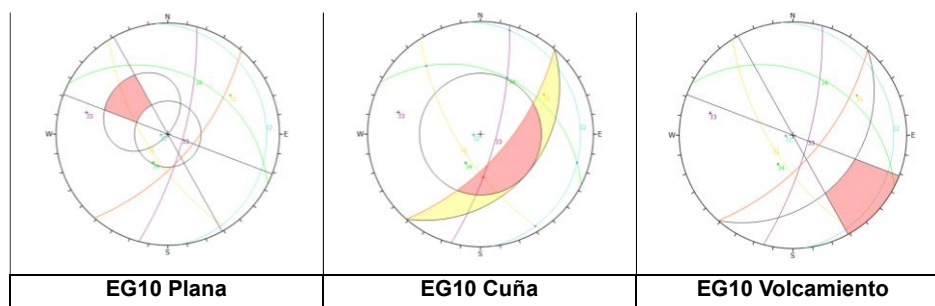


Figura 22

Estereograma del análisis cinemático para la estación EG10.



Los resultados específicos se resumen en la Tabla 21, donde se indica para cada estación el tipo de rotura evaluado, su condición de estabilidad y, en caso de inestabilidad, la discontinuidad o combinación de discontinuidades implicada.

Tabla 21

Análisis cinemático: parámetros y resultados para determinar la estabilidad de los taludes estudiados: P = plana; W = cuña; T = Volcamiento; U = inestable; S = estable

Estación geomecánica	Ángulo de fricción (°)	Tipo de rotura	Estabilidad	Discontinuidad
EG1	37.95	P	S	/
		W	S	/
		T	S	/
EG2	32.9	P	S	/
		W	S	/
		T	S	/
EG3	30.49	P	S	/
		W	S	/
		T	S	/
EG4	32.07	P	S	/
		W	U	J1-J3
		T	S	/
EG5	22.95	P	S	/
		W	U	J1-J3
		T	S	/

		P	U	J3
EG6	20.31	W	U	J1-J2, J1-J3, J2-J3, J3-J4
		T	S	/
EG7	36.16	W	U	J2-J3
		T	S	/
EG8	43.18	W	S	/
		T	S	/
		P	U	J1, J4
EG9	22.84	W	U	J1-J2, J1-J3, J1-J4, J2-J4, J3-J4
		T	S	/
EG10	33.21	W	U	J1-J3
		T	S	/

A partir de estos resultados, se observa que la falla en cuña es el mecanismo de rotura dominante a lo largo del tramo evaluado. Las estaciones EG4, EG5, EG6, EG7, EG9 y EG10 presentan inestabilidad asociada a cuñas formadas por la intersección de dos discontinuidades, siendo especialmente críticas EG6 y EG9, donde aparecen múltiples combinaciones geoméricamente inestables. En EG6, además, se identificó inestabilidad planar sobre la familia J3, mientras que en EG9 se observaron fallas planares potenciales asociadas a J1 y J4.

Por otro lado, las estaciones EG1, EG2, EG3 y EG8 resultaron estables en los tres mecanismos evaluados desde un punto de vista estrictamente cinemático. No obstante, esta condición no implica necesariamente que su estabilidad global sea favorable, sino únicamente que, con base en la geometría observada, no presentan configuraciones incompatibles con la estabilidad para los mecanismos analizados. Esto es importante, ya que el análisis cinemático

considera únicamente la posibilidad geométrica de falla y no incorpora de forma directa la resistencia del macizo ni las condiciones de esfuerzo.

En conjunto, el análisis cinemático confirma que la orientación estructural del macizo rocoso ejerce un papel decisivo en la estabilidad del tramo estudiado. La predominancia de fallas en cuña, especialmente en estaciones con macizos fracturados o desfavorablemente orientados, es coherente con los resultados empíricos y constituye un indicador clave para el análisis posterior mediante equilibrio límite.

4.1.5. Métodos de equilibrio límite

4.1.5.1. Falla plana – RocPlane

Se evaluó el factor de seguridad (FS) para las combinaciones de talud–discontinuidad que cumplieran geometría favorable para falla plana. Los análisis se realizaron con y sin presencia de agua, verificando la sensibilidad del FS frente a cambios en las condiciones del macizo rocoso.

Los resultados muestran que algunas estaciones presentan $FS < 1$, indicando riesgo de falla bajo condiciones actuales y necesidad de medidas de estabilización.

4.1.5.2. Falla en cuña – Swedge

El análisis de equilibrio límite permitió cuantificar la estabilidad de los taludes mediante el cálculo del factor de seguridad frente a las discontinuidades y combinaciones de cuñas más desfavorables en cada estación. Para ello se utilizaron los programas RocPlane, para fallas planares, y SWedge, para fallas en cuña, empleando los parámetros resistentes equivalentes obtenidos previamente a partir del criterio de Hoek–Brown.

Tabla 22

Análisis de Equilibrio Límite: factor de seguridad frente a discontinuidades más

desfavorables: W = Cuña; P = Planar

Estación geomecánica	Ángulo superior (°)	Altura del talud (m)	Tipo de rotura	Discontinuidad	Estabilidad
EG1	10	9.73	P	J1	No wedge formed
			P	J2	3.24965
			P	J3	1.9574
			P	J4	4.14293
			W	J1-J2	No wedge formed
			W	J1-J3	3.6998
			W	J1-J4	12.7855
			W	J2-J3	3.1661
			W	J2-J4	15.1203
			W	J3-J4	8.3316
EG2	19	21.64	P	J1	No wedge formed
			P	J2	1.62753
			P	J3	No wedge formed
			P	J4	1.86366
			W	J1-J2	9.2336
			W	J1-J3	No wedge formed
			W	J1-J4	3.9275
			W	J2-J3	No wedge formed
			W	J2-J4	4.5131
			W	J3-J4	No wedge formed
EG3	21	12.11	P	J1	0
			P	J2	0.542744
			P	J3	No wedge formed
			P	J4	1.17441

			W	J1-J2	No wedge formed
			W	J1-J3	No wedge formed
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	2.9246
			W	J2-J4	No wedge formed
			W	J3-J4	No wedge formed
			P	J1	No wedge formed
			P	J2	No wedge formed
			P	J3	1.35674
			P	J4	No wedge formed
			W	J1-J2	No wedge formed
EG4	18	8.7	W	J1-J3	2.3189
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	No wedge formed
			W	J2-J4	No wedge formed
			W	J3-J4	No wedge formed
			P	J1	No wedge formed
			P	J2	1.64076
			P	J3	1.33198
			P	J4	1.15166
			W	J1-J2	3.8627
EG5	18	14.15	W	J1-J3	3.13
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	16.76921
			W	J2-J4	No wedge formed

			W	J3-J4	No wedge formed
			P	J1	0
			P	J2	0
			P	J3	No wedge formed
			P	J4	No wedge formed
			W	J1-J2	No wedge formed
EG6	39	16.43	W	J1-J3	No wedge formed
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	No wedge formed
			W	J2-J4	No wedge formed
			W	J3-J4	No wedge formed
			P	J1	No wedge formed
			P	J2	No wedge formed
			P	J3	1.30514
			P	J4	No wedge formed
EG7	12	13.53	W	J1-J2	No wedge formed
			W	J1-J3	No wedge formed
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	1.1678
			W	J2-J4	No wedge formed
			W	J3-J4	3.4016
			P	J1	1.53395
EG8	12	13.21	P	J2	1.60538
			P	J3	No wedge formed

			P	J4	2.22045
			W	J1-J2	No wedge formed
			W	J1-J3	No wedge formed
			W	J1-J4	7.3297
			W	J2-J3	No wedge formed
			W	J2-J4	3.159
			W	J3-J4	4.6366
			P	J1	0.84853
			P	J2	No wedge formed
			P	J3	No wedge formed
			P	J4	1.11919
EG9	17	10.13	W	J1-J2	No wedge formed
			W	J1-J3	No wedge formed
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	No wedge formed
			W	J2-J4	3.4301
			W	J3-J4	3.4474
			P	J1	No wedge formed
			P	J2	No wedge formed
			P	J3	No wedge formed
EG10	23	13.92	P	J4	1.95212
			W	J1-J2	No wedge formed
			W	J1-J3	3.6274
			W	J1-J4	No wedge formed
			W	J2-J3	No wedge formed

W	J2–J4	No wedge formed
W	J3–J4	No wedge formed

Los resultados muestran una variabilidad importante entre estaciones. En EG1 se obtuvieron factores de seguridad superiores a 1 para todas las combinaciones modeladas, aunque algunas superficies y cuñas presentan valores relativamente cercanos al umbral crítico, como J3 en falla planar con $FS = 1,9574$ y J2–J3 en falla en cuña con $FS = 3,1661$. Esto indica que, aunque el talud no se encuentra en condición de falla inmediata, existen combinaciones estructurales que deben ser consideradas en la interpretación global.

En EG2 también se observan factores de seguridad mayores que 1, pero con planos relativamente ajustados, como J2 con $FS = 1,62753$ y J4 con $FS = 1,86366$. Del mismo modo, algunas cuñas presentan factores de seguridad moderados, lo que refleja una estabilidad condicionada por la geometría estructural. EG3 constituye uno de los casos más críticos, ya que presenta $FS = 0$ para J1 en falla planar y $FS = 0,542744$ para J2, lo cual indica una condición de inestabilidad o falla inminente en determinadas superficies. Este comportamiento es coherente con su baja calidad geomecánica y con la clasificación SMR desfavorable.

En EG4, los resultados muestran estabilidad limitada, con $FS = 1,35674$ para la discontinuidad J3 y $FS = 2,3189$ para la cuña J1–J3. Aunque ambos valores son mayores que 1, se trata de condiciones marginales frente a perturbaciones adicionales. En EG5, varios planos presentan factores de seguridad entre 1,15166 y 1,64076, mientras que las cuñas más desfavorables oscilan entre 3,13 y 3,8627, evidenciando una estabilidad moderada pero restringida por la baja resistencia del macizo.


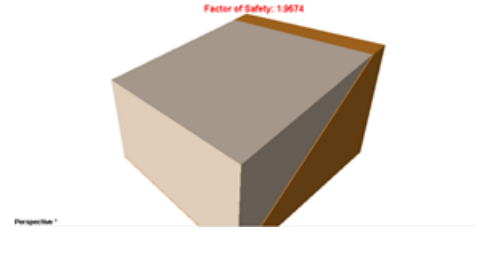

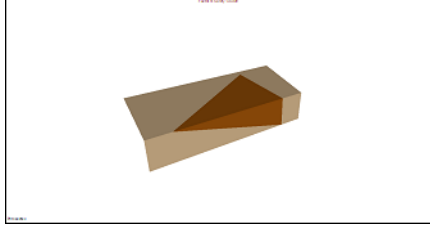
EG6 corresponde a otro de los sectores más críticos, con $FS = 0$ para J1 y J2 en fallas planares, lo que confirma una condición claramente inestable. Esta estación coincide con los

resultados más desfavorables del SMR y del análisis cinemático. En EG7 y EG8, ambos pertenecientes a la Formación Jubones, la mayoría de los factores de seguridad son superiores a 1, con condiciones relativamente más favorables; sin embargo, algunas superficies y cuñas presentan valores ajustados, como J2–J3 en EG7 con $FS = 1,1678$ y J1 en EG8 con $FS = 1,53395$.

En EG9 se observan valores bajos en falla planar, con $FS = 0,84853$ para J1 y $FS = 1,11919$ para J4, lo que indica una situación desfavorable y consistente con la alta susceptibilidad detectada en los análisis previos. Las cuñas en esta estación presentan valores mayores, pero no eliminan el riesgo asociado a superficies planares críticas. Finalmente, EG10 muestra un comportamiento relativamente más estable, con $FS = 1,95212$ para J4 y $FS = 3,6274$ para la cuña J1–J3, aunque la orientación estructural sigue siendo un factor de control importante.

Figura 23

Análisis de Equilibrio Límite EG1: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar

 <p>Factor of Safety: 3.24995</p> <p>Perspective *</p>	 <p>Factor of Safety: 1.9974</p> <p>Perspective *</p>
<p>EG1 – J2 (P)</p>	<p>EG1 – J3 (P)</p>
 <p>Factor of Safety: 4.14293</p> <p>Perspective *</p>	 <p>Factor of Safety: 3.6274</p> <p>Perspective *</p>
<p>EG1 – J4 (P)</p>	<p>EG1 – J1-J3 (W)</p>

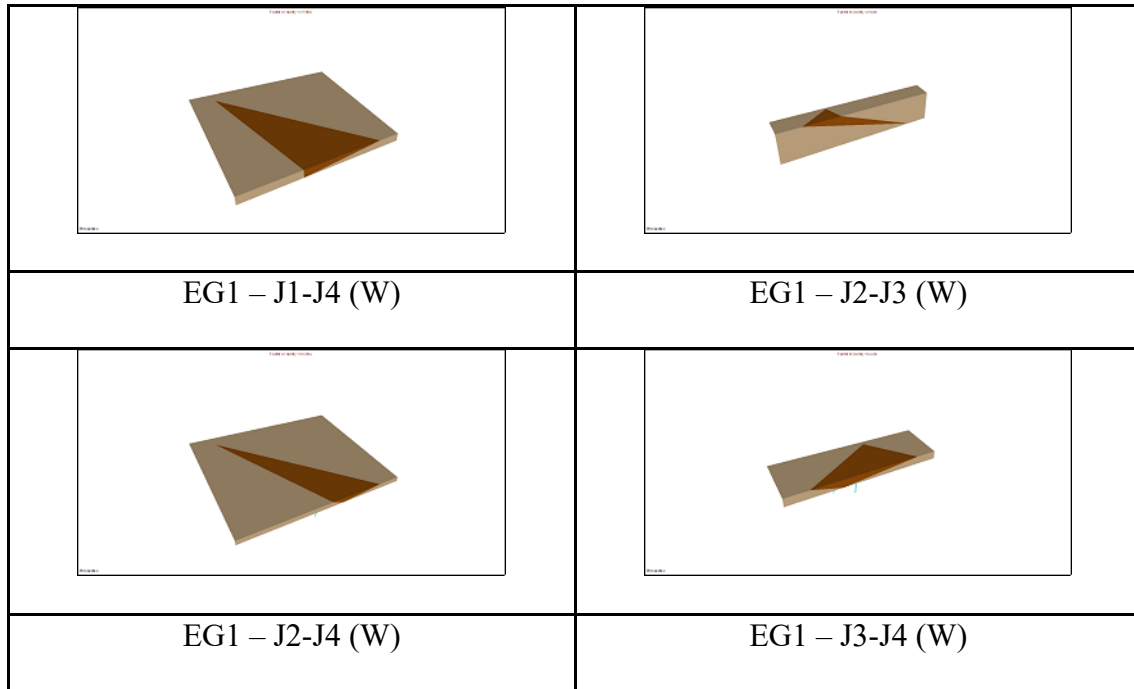


Figura 24

Análisis de Equilibrio Límite EG2: factor de seguridad frente a *discontinuidades más desfavorables*: $W = \text{Cuña}$; $P = \text{Planar}$

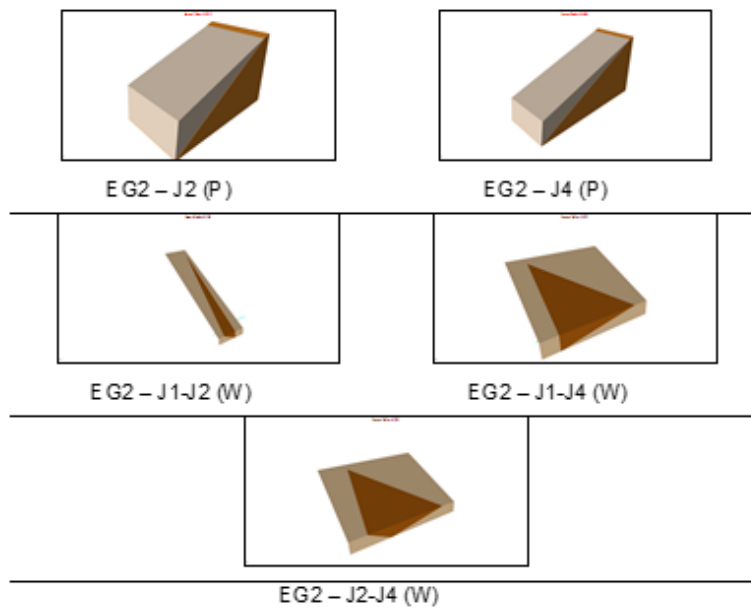
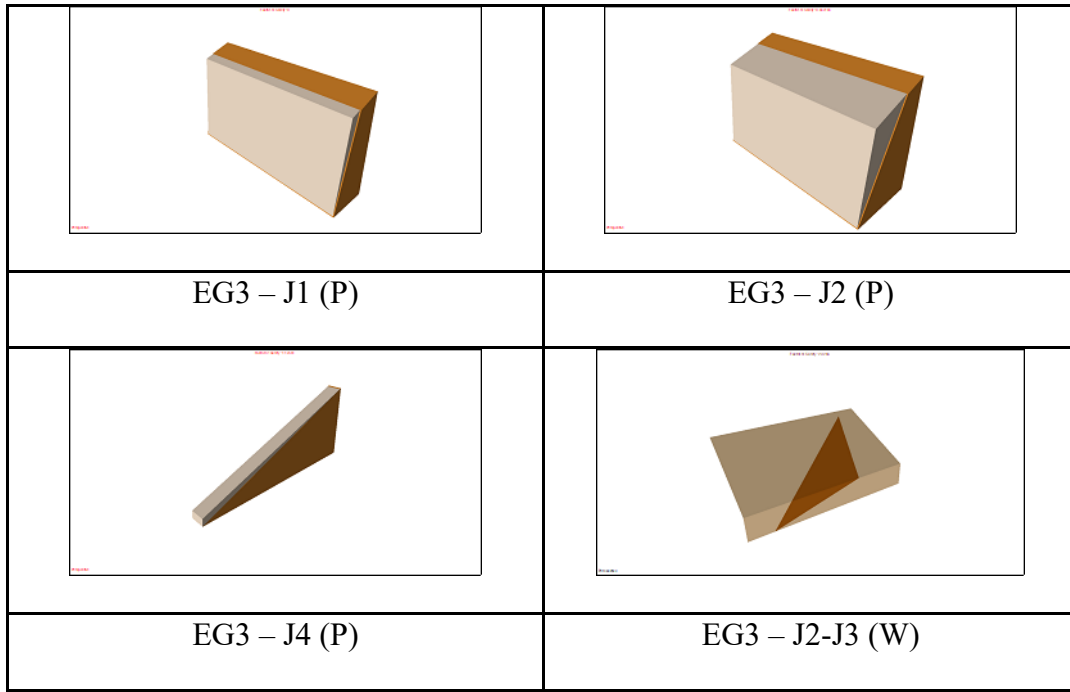


Figura 25

Análisis de Equilibrio Límite EG3: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: $W = \text{Cuña}$; $P = \text{Planar}$

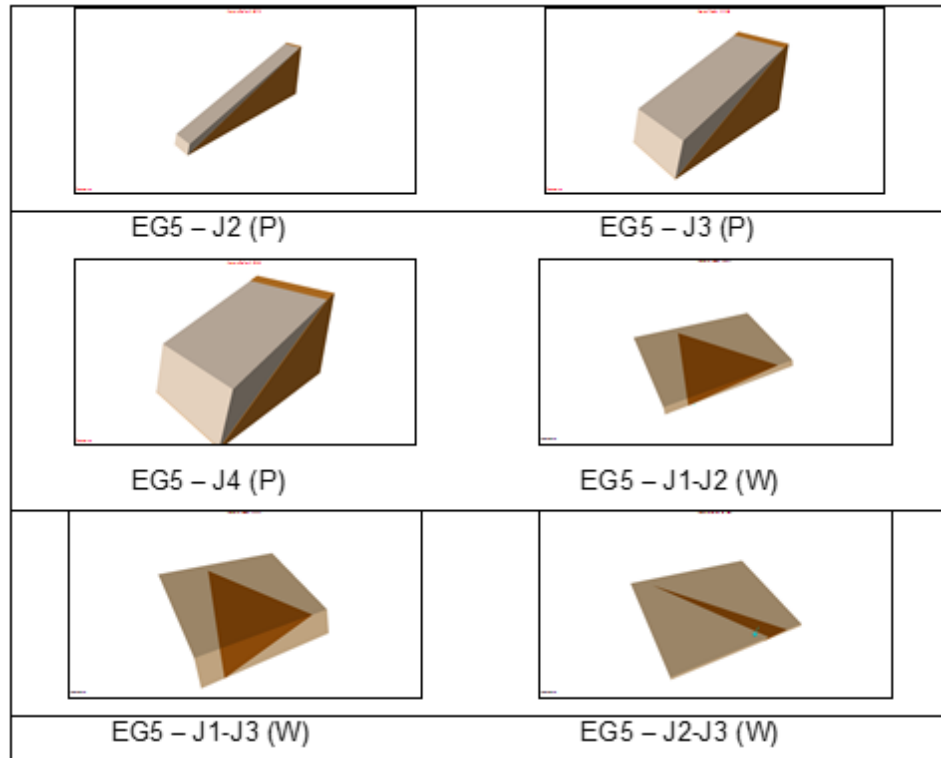
**Figura 26**

Análisis de Equilibrio Límite EG4: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: $W = \text{Cuña}$; $P = \text{Planar}$



Figura 27

Análisis de Equilibrio Límite EG5: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar

**Figura 28**

Análisis de Equilibrio Límite EG6: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar

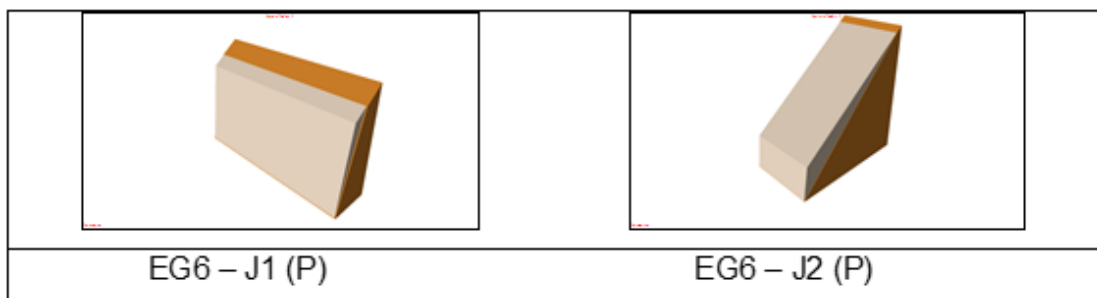


Figura 29

Análisis de Equilibrio Límite EG7-EG8: factor de seguridad frente a discontinuidades

más desfavorables: W = Cuña; P = Planar

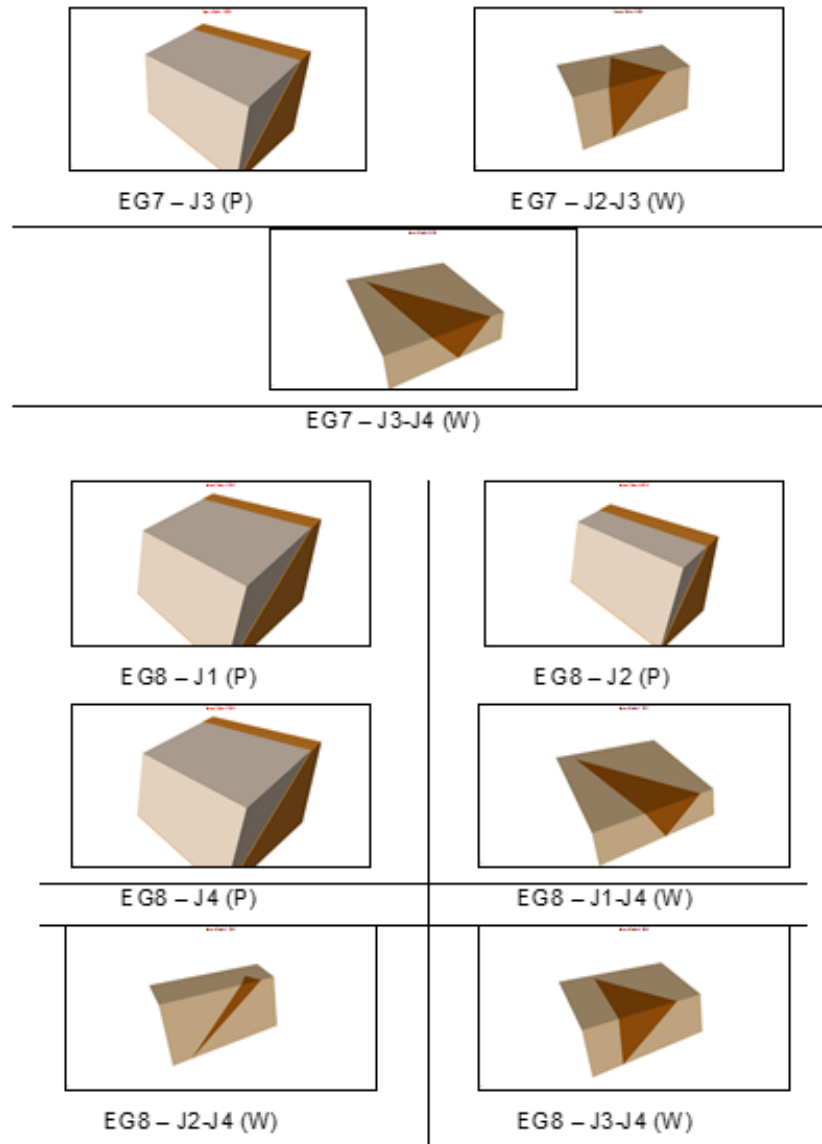
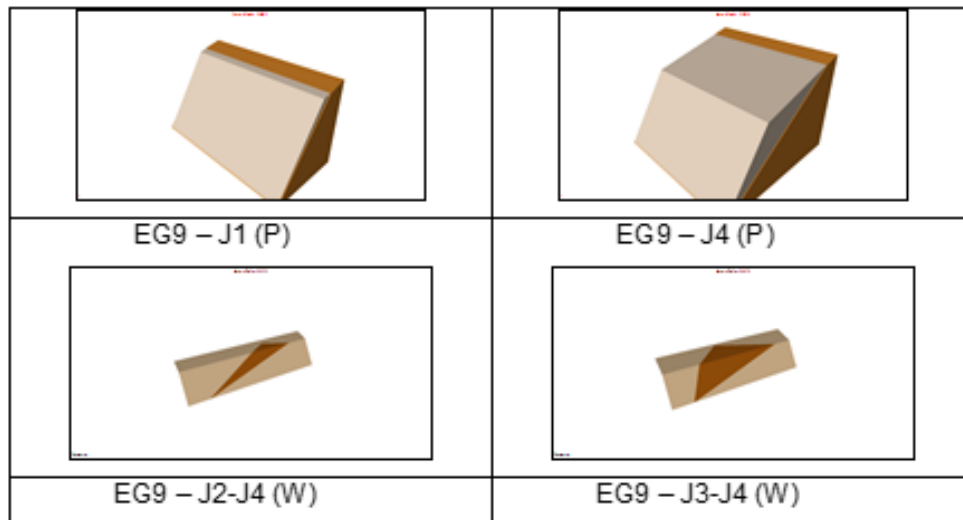


Figura 30

Análisis de Equilibrio Límite EG9: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar

**Figura 31**

Análisis de Equilibrio Límite EG10: factor de seguridad frente a discontinuidades más desfavorables: W = Cuña; P = Planar



En términos globales, el análisis de equilibrio límite confirma que las estaciones más problemáticas corresponden a EG3, EG4, EG5, EG6 y EG9, asociadas principalmente al Grupo Saraguro y a la Formación Santa Isabel. Por el contrario, los taludes desarrollados en la Formación Jubones presentan factores de seguridad relativamente más altos, aunque varios de ellos continúan condicionados por la orientación estructural del macizo y por la presencia de discontinuidades desfavorables.

4.1.6. Integración de resultados

Tabla 23

Integración de resultados

Estación	Cinemático (P/W/T)	Cinemático global (S/U)	SMR (resumen)	Q-slope (resumen)	Equilibrio límite (FSmin)	Equilibrio límite (S/U)	Análisis final
EG1	U/U/S	U	U (Clase IV-V; SMRmin≈3.40)	U (Qslope=0.189; βmax=50.53°)	1.9574	S	U (alta: al menos 3 métodos indican inestabilidad)
EG2	S/S/S	S	U (Clase IV-V; SMRmin≈3.00)	U (Qslope=0.143; βmax=48.11°)	1.62753	S	U (media: cinemático/FS aceptables, pero SMR y Q-slope desfavorables)
EG3	S/S/S	S	U (Clase IV-V; SMRmin≈12.00)	U (Qslope=0.119; βmax=46.51°)	0	U	U (alta: al menos 3 métodos indican inestabilidad)
EG4	S/S/S	S	U (Clase V; SMRmin≈3.20)	U (Qslope=0.119; βmax=46.51°)	1.35674	S	U (media: cinemático/FS aceptables, pero SMR y Q-slope desfavorables)
EG5	S/U/S	U	U (Clase IV-V; SMRmin≈4.60)	U (Qslope=0.122; βmax=46.73°)	1.15166	U	U (alta: coincide cinemático + FS crítico; SMR y Q-slope desfavorables)

EG6	U/U/S	U	U (Clase V; SMRmin≈27.35)	U (Qslope=0.089; βmax=43.99°)	0	U	U (alta: coincide cinemático + FS crítico; SMR y Q- slope desfavorables)
EG7	S/U/S	U	U (Clase IV-V; SMRmin≈8.20)	U (Qslope=0.189; βmax=50.53°)	1.1678	U	U (alta: coincide cinemático + FS crítico; SMR y Q- slope desfavorables)
EG8	S/S/S	S	U (Clase IV-V; SMRmin≈16.35)	U (Qslope=0.187; βmax=50.44°)	1.53395	S	U (media: cinemático/FS aceptables, pero SMR y Q-slope desfavorables)
EG9	U/U/S	U	U (Clase V; SMRmin≈30.00)	U (Qslope=0.100; βmax=45.00°)	0.84853	U	U (alta: coincide cinemático + FS crítico; SMR y Q- slope desfavorables)
EG10	S/U/S	U	U (Clase IV-V; SMRmin≈17.00)	U (Qslope=0.156; βmax=48.86°)	1.95212	S	U (alta: al menos 3 métodos indican inestabilidad)

En términos generales, se confirma que la falla en cuña es el mecanismo predominante en el tramo estudiado, debido a la geometría interna del macizo y a la presencia de múltiples familias de discontinuidades con intersecciones desfavorables. Este

comportamiento se identificó tanto en el análisis cinemático como en la clasificación SMR y en el equilibrio límite, especialmente en las estaciones EG4, EG5, EG6, EG7, EG9 y EG10.

Los índices SMR y Q-slope muestran una buena correspondencia con los factores de seguridad calculados, al identificar como más desfavorables aquellas estaciones ubicadas en macizos más fracturados, alterados o de menor resistencia. De manera particular, EG3, EG6 y EG9 destacan como los sectores más críticos del corredor, mientras que EG4 y EG5 presentan condiciones también desfavorables, aunque algo menos severas. En contraste, varias estaciones ubicadas en la Formación Jubones muestran una calidad geomecánica relativamente mejor, aunque continúan condicionadas por la disposición estructural de sus discontinuidades.

De forma integral, los resultados evidencian que la estabilidad de los taludes estudiados depende de la combinación entre calidad geomecánica del macizo, geometría del talud y orientación estructural de las discontinuidades. Por ello, la valoración conjunta de métodos empíricos, cinemáticos y analíticos permitió identificar con mayor claridad los sectores más susceptibles y establecer una base técnica consistente para la formulación de medidas de estabilización y control en el corredor evaluado.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. La evaluación geotécnica realizada en el tramo estudiado evidencia que la estabilidad de los taludes rocosos está condicionada principalmente por la litología, el grado de meteorización, la calidad del macizo rocoso y la orientación de las discontinuidades. En los taludes asociados al Grupo Saraguro y a la Formación Santa Isabel se identificaron las condiciones más desfavorables, debido a que presentan menores valores de resistencia de roca intacta, menores índices GSI, baja cohesión y ángulos de fricción reducidos, lo que incrementa la susceptibilidad a mecanismos de rotura planar y en cuña.
2. Los taludes desarrollados sobre la Formación Jubones presentan, en términos generales, una roca intacta más competente y mejores parámetros resistentes que los sectores correspondientes al Grupo Saraguro y a la Formación Santa Isabel. Sin embargo, esta mayor competencia no garantiza por sí sola la estabilidad del talud, ya que en varios casos la disposición estructural del macizo genera condiciones geométricas desfavorables que favorecen la ocurrencia de fallas, especialmente en cuña.
3. La aplicación integrada de los métodos SMR, Q-slope, análisis cinemático y equilibrio límite permitió obtener una interpretación consistente del comportamiento geomecánico del tramo evaluado. Los resultados de SMR ubicaron a la mayoría de los taludes dentro de clases IV y V, correspondientes a condiciones malas o muy malas de estabilidad. De manera complementaria, el índice Q-slope mostró que los ángulos máximos recomendados resultan

inferiores a varios de los buzamientos reales observados en campo, lo que confirma una condición geométrica desfavorable en distintas estaciones.

4. El análisis cinemático permitió identificar que la falla en cuña es el mecanismo de rotura predominante en el tramo estudiado, seguido por la falla planar. Las estaciones EG4, EG5, EG6, EG7, EG9 y EG10 presentan combinaciones de discontinuidades geoméricamente compatibles con inestabilidad en cuña, mientras que EG6 y EG9 también muestran condiciones favorables para falla planar. El volcamiento no se identificó como el mecanismo dominante en las estaciones evaluadas.
5. Los resultados obtenidos mediante equilibrio límite corroboran la interpretación cinemática y empírica. En particular, las estaciones EG3 y EG6 presentan los escenarios más críticos, con factores de seguridad iguales o menores que la unidad en algunas superficies de falla, lo que evidencia condiciones de inestabilidad o falla inminente. Otras estaciones, como EG4, EG5 y EG9, muestran factores de seguridad bajos o marginales, lo que indica estabilidad limitada y alta sensibilidad frente a eventos desencadenantes, como el viento, lluvias intensas, incremento de presión de poros o vibraciones.
6. En términos globales, las estaciones EG3, EG4, EG6 y EG9 representan los sectores de mayor vulnerabilidad geotécnica dentro del corredor analizado, debido a la combinación de baja calidad geomecánica, fracturamiento intenso y orientación estructural desfavorable. La estación EG5 presenta también una condición de estabilidad restringida por el grado de alteración del macizo. En contraste, las estaciones asociadas a la Formación Jubones muestran una respuesta relativamente más favorable, aunque continúan condicionadas por la geometría de sus discontinuidades.

7. Los resultados del estudio demuestran que la estabilidad de los taludes no depende únicamente de la resistencia de la roca intacta, sino de la interacción entre geometría del talud, calidad del macizo, orientación de las discontinuidades y mecanismos de falla estructuralmente controlados. Por ello, la evaluación integrada de métodos empíricos, cinemáticos y equilibrio límite constituye una estrategia adecuada para analizar taludes rocosos en corredores viales emplazados en macizos fracturados y geológicamente complejos.

5.2. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se establecen las siguientes recomendaciones técnicas, integrando los cuatro métodos de análisis (SMR, Q/Q-slope, análisis cinemático y equilibrio límite) y los parámetros geomecánicos medidos:

Tabla 24

Recomendaciones para estaciones geomecánicas (EG1-EG10)

Estacion	Condición geomecánica crítica	FS / SMR / Q	Recomendación técnica
EG3 (Grupo Saraguro)	Roca altamente fracturada; buzamientos de discontinuidades desfavorables	FS < 1; SMR V; Q < 0,25; $\beta_{\max} \approx 44^\circ$	Implementar anclajes y pernos de refuerzo; mallas de acero; drenaje superficial e interno; reconfiguración de pendiente y bermas intermedias.

EG4 (Grupo Saraguro)	Roca débil con alta meteorización y orientación desfavorable de discontinuidades	FS \approx 1,2; SMR IV; Q < 0,25; $\beta_{max} \approx 46^\circ$	Anclajes selectivos; mallas y revestimiento con concreto proyectado; control de erosión superficial; monitoreo continuo.
EG6 (Grupo Saraguro)	Alta probabilidad de rotura plana y cuña	FS < 1; SMR V; Q < 0,25; $\beta_{max} \approx 45^\circ$	Refuerzo estructural integral; drenaje profundo; monitoreo con inclinómetros y extensómetros; reconfiguración geométrica del talud.
EG9 (Grupo Saraguro)	Talud inestable por baja resistencia intacta y discontinuidades favorables a deslizamiento	FS \approx 1,1; SMR IV; Q < 0,25; $\beta_{max} \approx 50^\circ$	Anclajes y mallas de refuerzo; bermas intermedias; drenaje superficial; inspección periódica de fracturación.
EG5 (Formación Santa Isabel)	Roca meteorizada; baja c y ϕ ; estabilidad marginal	FS \approx 1,3; SMR IV; Q < 0,25	Refuerzo pasivo: bermas, revestimiento de concreto proyectado; control de erosión; monitoreo de fracturación superficial.

EG1, EG7, EG8, EG10 (Formación Jubones)	Roca competente pero con estructuras desfavorables (cuñas y planos)	FS \approx 1,2– 1,3; SMR IV; Q < 0,25; $\beta_{max} \approx$ 44°–48°	Refuerzo selectivo en zonas críticas; inspección periódica de discontinuidades; prevención de cuñas mediante bermas y drenaje superficial.
--	--	---	---

1. Priorizar intervenciones de estabilización en las estaciones EG3, EG4, EG5, EG6 y EG9, ya que concentran las condiciones más desfavorables del tramo estudiado. Estas intervenciones deben orientarse en función del mecanismo de falla predominante en cada caso, dando especial atención a superficies planares y cuñas estructuralmente definidas.
2. Implementar un programa de monitoreo geotécnico en los sectores críticos, incorporando inspecciones periódicas, control visual de aperturas de discontinuidades, revisión de caída de fragmentos y seguimiento de cambios geométricos en la cara del talud. En los puntos de mayor riesgo, este monitoreo puede complementarse con instrumentación específica, según la disponibilidad técnica y presupuestaria.
3. Mejorar el sistema de drenaje superficial y sub superficial en los taludes más vulnerables, con el fin de reducir infiltraciones y evitar incrementos de presión de agua que disminuyan la resistencia efectiva del macizo rocoso. Esta medida es especialmente importante en sectores donde la estabilidad ya es marginal y donde la época lluviosa puede actuar como factor detonante.
4. Evaluar ajustes en la geometría de los taludes en aquellos sectores donde el buzamiento actual supera las condiciones recomendables para la calidad del macizo rocoso. Cuando sea técnicamente viable, se recomienda considerar reperfilado,

reducción de pendiente o conformación de obras de protección, especialmente en taludes desarrollados en materiales del Grupo Saraguro y de la Formación Santa Isabel.

5. Diseñar medidas de estabilización específicas según el mecanismo de falla identificado. En taludes con potencial de falla planar o en cuña pueden considerarse alternativas como pernos de roca, mallas metálicas, concreto lanzado, barreras dinámicas o sistemas de contención, dependiendo de la magnitud del problema y de la accesibilidad del sector. La selección de estas soluciones debe sustentarse en estudios de detalle y en análisis complementarios de diseño.
6. Desarrollar estudios geotécnicos de mayor detalle en los sectores con factores de seguridad críticos, incorporando levantamientos adicionales, caracterización más profunda de discontinuidades y, de ser necesario, modelaciones numéricas que permitan evaluar con mayor precisión el comportamiento del talud frente a diferentes escenarios de carga y saturación.
7. Integrar los resultados obtenidos en un esquema de gestión preventiva del riesgo geotécnico para el corredor analizado, de manera que las actividades de mantenimiento, drenaje, limpieza y estabilización se ejecuten con base en criterios técnicos y en la jerarquización de sectores más vulnerables. Esto permitiría optimizar recursos y reducir la probabilidad de afectaciones a la vía y a sus usuarios.

Referencias

- ASTM International. (2014). *ASTM D5873-14: Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method*. ASTM International.
- Aspden, J. A., Bonilla, W., & Duque, P. (1995). *The El Oro metamorphic complex, Ecuador: Geology and economic mineral deposits* (British Geological Survey Technical Report No. WC/95/67). British Geological Survey.
- Avilez, H. S., & Flor, M. A. (2017). *Caracterización volcanológica, geotécnica y estructural de las ignimbritas del Grupo Saraguro en el sector Santa Isabel–Pucará* [Tesis de grado no publicada]. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Bar, N., & Barton, N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. En *EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium* (pp. 1–11).
- Bar, N., & Barton, N. (2017). The Q-slope method for rock slope engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(12), 3307–3322.
- Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(9), 255–279.
- Barton, N. (2002). Q-system of rock mass classification. En J. A. Hudson (Ed.), *Rock engineering* (pp. 7–18).
- Barton, N., & Bandis, S. (1980). Reflections on the Barton–Bandis shear strength criterion. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, 115–118.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.

- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. En *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering* (Vol. 1, pp. 97–106).
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7–17.
- Branney, M. J., & Kokelaar, P. (2002). *Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites*. Geological Society of London.
- Chung, J. S., & Lee, C. (2000). A new method for assessing the stability of rock slopes. *Geotechnical Testing Journal*, 23(4), 377–386.
- Delgado-Reivan, X., Paredes-Miranda, C., Loaiza, S., Mulas, M., & Jordá-Bordehore, L. (2022). Analysis of rock slope stability combining limit equilibrium, kinematic, empirical methods (RHRS and Q-slope) and photogrammetry: Case study Cuenca–Girón–Pasaje. *Geosciences*, 12(3), 1–22.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Wiley.
- Dunkley, P. N., & Gaibor, A. (1997). *Informe No. 2, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Geology of the Western Cordillera of Ecuador between 2°–3°S*. CODIGEM-BGS.
- Helg, U. (1997). *Geologie des Intermontanen Beckens von Sta. Isabel (Miozän, Südecuador): Beckennordteil* [Tesis de maestría, Institute of Geology ETH-Zürich].
- Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. Rocscience.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). Institution of Mining and Metallurgy.

- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion—2002 edition. En *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium* (pp. 267–271).
- Hoek, E., Marinos, P., & Benisch, M. (1995). The Geological Strength Index: A tool for rock mass classification. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(2), 191–200.
- Hungerbühler, D. (1997). *Tertiary basins in the Andes of southern Ecuador (3°00'–4°20')*: Sedimentary evolution, deformation and regional tectonic implications [Tesis doctoral, Institute of Geology ETH Zürich].
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., Helg, U., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1), 75–124.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2016). *Informe de gestión MTOP 2016*. <https://www.obraspublicas.gob.ec/informe-de-gestion-mtop-2016/>
- Palmström, A. (1996). Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 175–188.
- Pratt, E., Figueroa, J., & Flores, B. (1997). *Informe No. 1, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Mapa escala 1:200.000. Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 3°S and 4°S*. CODIGEM-BGS, Quito, Ecuador.
- Primicias. (2023, octubre 13). *Concesiones, vías y peajes: ¿Qué vías del sur de Ecuador pasarán a privados?* Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/concesiones-vias-peajes-sur-ecuador/>
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. En *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics* (pp. 49–53).

- Singh, B. (2010). *Engineering rock mass classification: Tunneling, foundations, and landslides*. Butterworth-Heinemann.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering: Civil and mining* (4th ed.). CRC Press.