

Análisis de Estabilidad de Taludes en la Vía Penipe Baños, aplicando métodos empíricos, análisis cinemático y técnicas remotas - fotogrametría.

Lisette Albán G. ¹, Ramiro Valenzuela C. ¹, Silvia Loaiza ¹, Maurizio Mulas ¹ y Luis Jordá-Bordehore^{2*}

¹ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL Universidad Politécnica, Gustavo Galindo Campus

Km 30.5 Perimetral, Guayaquil P.O. Box 09-01-5863, Ecuador

² Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.

(Recibido , Revisado , Aceptado)

Resumen. El presente trabajo tiene como objetivo analizar la estabilidad de cuatro taludes a lo largo de la vía Penipe Baños, ubicados entre las provincias de Chimborazo y Tungurahua, donde en ocasiones se presentan desprendimientos de rocas que dificultan la circulación y ponen en peligro a los usuarios de la vía. Este camino fue construido recientemente como una alternativa al antiguo camino, que fue destruido en gran parte por las erupciones del volcán Tungurahua durante el siglo XXI.

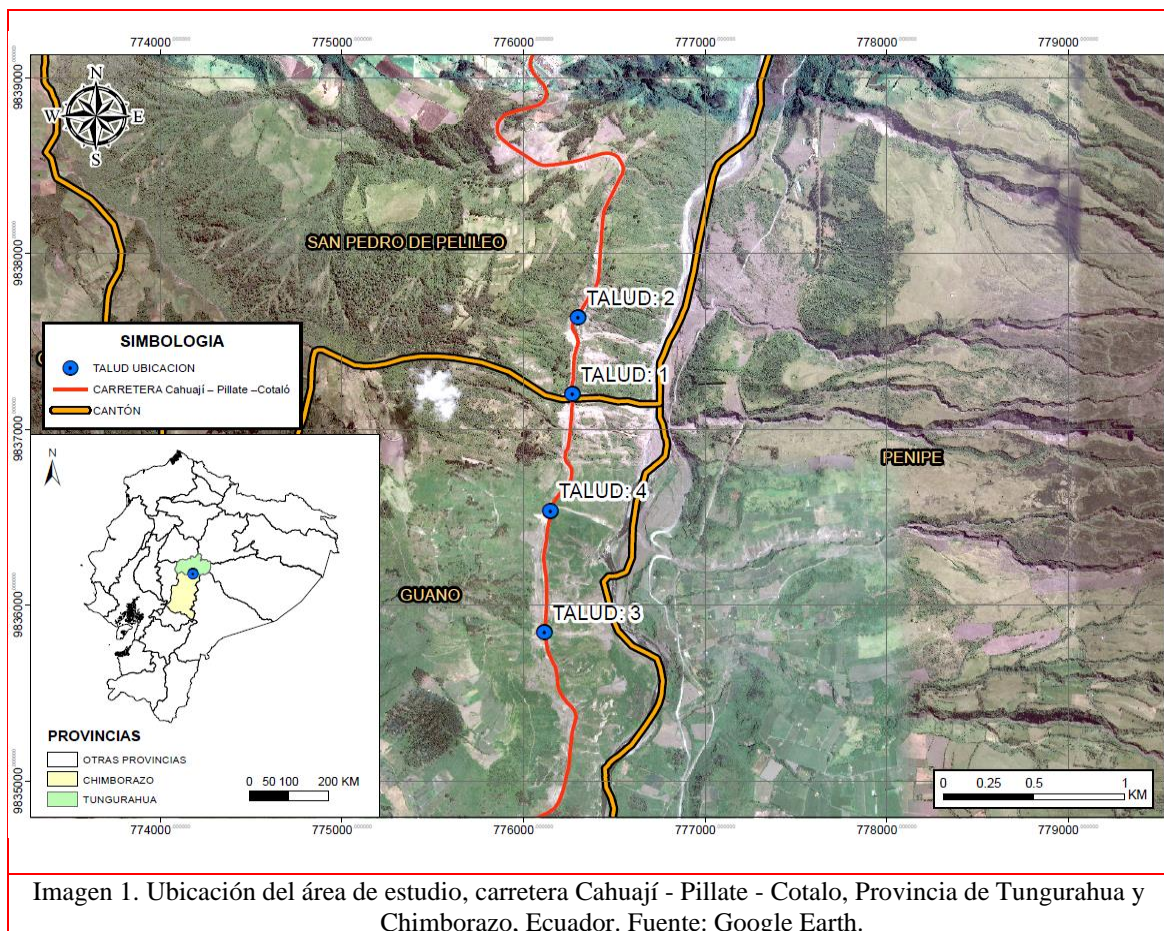
La metodología aplicada para el análisis de cada talud, se basa en la toma de datos con la ayuda de técnicas remotas como SfM (Structure from Motion) que nos permite obtener datos de los taludes mediante fotogrametría con el objetivo de analizar los taludes adecuadamente a pesar de las dificultades de accesibilidad a los mismos y así, tomar ciertas medidas y datos necesarios para utilizar los métodos aplicados en este trabajo. Se han utilizado métodos empíricos como el SMR (Slope Mass Rating), Q – Slope, el método RHRS (Sistema de Clasificación de peligro de caídas de rocas) el cual es poco conocido en nuestro medio y nos ayuda a determinar el peligro que presentan estos bloques de roca y la aplicación del método cinemático. El método RHRS fue comparado con el software Rocfall para el análisis de la trayectoria de caída de bloques de roca. Los resultados de este trabajo son en su mayoría similares entre los métodos utilizados, existen algunas diferencias que se deben a que ciertos métodos consideran algunos factores que no son considerados en otros y eso resulta en una diferencia de resultados. Estas diferencias también nos ayudan a concluir la importancia de utilizar varios métodos, para observar cuál se ajusta mejor a la realidad observada en el sitio. En este caso, los taludes estudiados no representan mayor riesgo para la vía que otros taludes cercanos a los estudiados, los cuales no pudieron ser analizados por la falta de accesibilidad y el peligro de tomar datos en estas condiciones. Es importante estudiar estos métodos de análisis y recolección de datos porque demuestran la confiabilidad de estas técnicas remotas de bajo costo para facilitar el análisis a realizar en otros casos, especialmente en lugares con condiciones similares.

Palabras Clave: estabilidad de taludes, estaciones geomecánicas, fotogrametría, RHRS Sistema de Clasificación de peligro de caídas de rocas.

1. Introducción

La carretera Cahujá – Pillate – Cotaló, fue inaugurada el 18 de junio del 2015 este corredor vial tiene una longitud de 26 km y ancho de vía de 11.50 metros. Fue construida como ruta alterna a la

antigua vía Penipe Baños, vía que se ha visto afectada desde el año 1999 por las diversas erupciones del volcán Tungurahua. La antigua vía se encuentra atravesada por más de siete quebradas por donde bajaban flujos de lodo y lahares producto de las erupciones del mencionado volcán. Debido al alto riesgo que presenta la zona, la Secretaría de Gestión de Riesgo la declaró en varias ocasiones como Zona de Emergencia. Esta vía es de gran importancia, debido a que une a los cantones de Baños y Penipe, cantones agrícolas y turísticos los cuales son pertenecientes a la provincia de Tungurahua y Chimborazo, respectivamente.



El objetivo de este trabajo, es realizar el análisis de estabilidad de cuatro taludes ubicados en la carretera Cahujá – Pillate –Cotaló, ruta alternativa a la vía Penipe - Los Pájaros (Baños) ;**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, aplicando diferentes metodologías como los métodos empíricos: la Fotogrametría SfM (Structure from Motion), Q-Slope, el RMR (Rock Mass Rating), SMR (Slope Mass Rating), Análisis de Cinemático (DIPS), RHRS (Sistema de Clasificación de Peligro de Caída de Rocas). En un principio se descartó la posibilidad de realizar un estudio de elementos finitos a partir de parámetros del macizo rocoso (criterio de Hoek y Brown) y la geometría global de cada uno de los taludes. Se identificaron modos de rotura cinemáticos y no es realista un fallo del talud a través del macizo. Un análisis de rotura global o de rotura circular no serían realistas.

El sitio de estudio se encuentra ubicada en una zona montañosa, donde existen taludes naturales y artificiales, los cuales se encuentran compuestos de material volcánico. En la actualidad, los taludes presentan desprendimientos rocosos, los cuales son frecuentes y ponen en riesgos a los usuarios de la vía y moradores del sector.

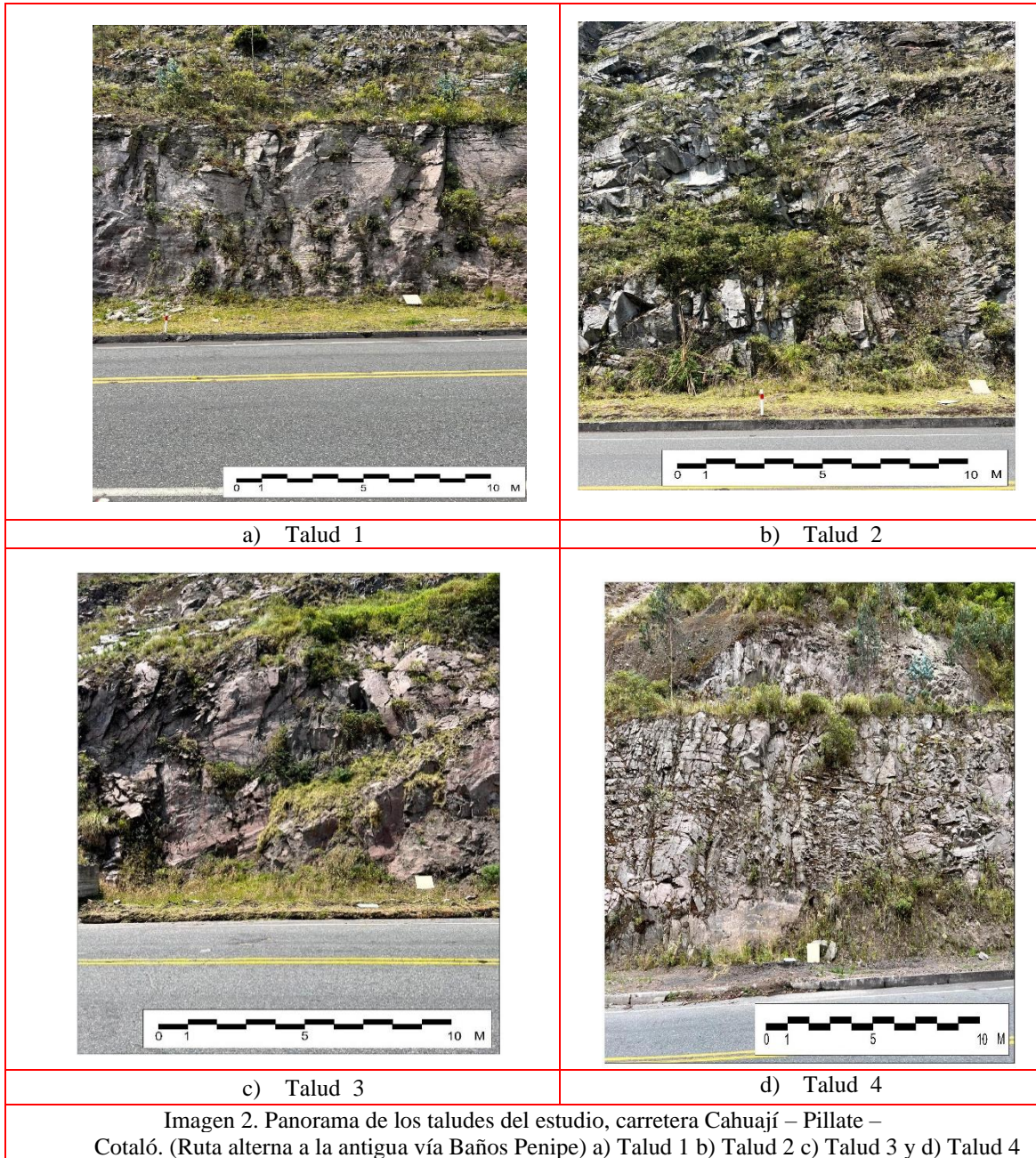
En cuanto a la geología del sitio, los taludes están sobre los Volcánicos del Mulmui e Igualata (Plioceno), los cuales son volcanes que están apagados. En este sitio afloran principalmente materiales piroclásticos como toba de grano fino a toba gruesa pumicea, y lavas a composición andesíticas (IG- EPN, 2018).

Para la elaboración del presente trabajo, se realizó el relevamiento geológico-geotécnico (estaciones mecánicas), con el objetivo de determinar la estabilidad de cuatro taludes, aplicando los métodos empíricos como el Slope Mass Rating (Romana, 1985) y Q Slope (Barton & Bar, 2015) así como también un análisis cinemático. Las estaciones geomecánicas han sido analizadas con la ayuda de la fotogrametría y mediciones en campo en los pocos lugares accesibles de los taludes. Estas técnicas y metodologías se completaron con el método Rockfall Hazard Rating System (RHRS), desarrollado por (Pierson et al., 1990) como método de caracterización de la estabilidad de los taludes rocosos y con el objetivo de realizar una comparación con el software RocFall para evaluar los desprendimientos de roca y sus trayectorias.

2. Materiales y Métodos

Para la obtención de los datos geotécnicos de los taludes se realizaron estaciones geomecánicas. Se conoce como estación geomecánica al conjunto de observaciones de mecánica de rocas sobre las propiedades de la matriz, juntas y macizo rocoso. Entre otros parámetros se obtiene la compresión simple (mediante esclerómetro), orientación de las familias de fracturas (brújula) y las características de las juntas o discontinuidades (rugosidad, relleno, espaciado, etc.) así como el RQD.

Para complementar la toma de datos y poder caracterizar de mejor manera los taludes, se utilizaron las técnicas remotas como la Fotogrametría SfM (Structure from Motion), para así poder pasar a la fase de gabinete y la aplicación de los métodos empíricos como la Clasificación de la caída de rocas (RHRS), el cual otorga un puntaje a los taludes según los datos y características del sitio, siendo el de mayor puntaje el talud más desfavorable. SMR (Romana, 1985) (Slope Mass Rating) y el Q slope (Bar and Barton, 2017). Además, del análisis cinemático mencionado anteriormente. A continuación, se muestran las imágenes de los taludes que se consideran en este trabajo.



2.1 Fotogrametría SfM (Structure from Motion)

La recolección de datos de campo es fundamental para un análisis realista, sin embargo, en muchas ocasiones, es peligroso recolectar datos geométricos y geotécnicos bajo altos escarpes y áreas de riesgo de caída de rocas. La obtención de estos datos siempre estará limitada por la

ubicación y el nivel de accesibilidad al talud estudiado al realizar mediciones manuales, así como por los equipos disponibles como equipos topográficos para obtener con precisión los datos deseados.

En este caso, se aplicó un enfoque de técnica remota usando fotogrametría (SfM), porque era demasiado peligroso recolectar datos debajo de las laderas. La técnica SfM (Structure from Motion) se considera un método de fotogrametría de alta resolución y bajo costo. Además, esta técnica se enfoca en los mismos principios de la fotogrametría estereoscópica (la nube de puntos 3D se puede construir superponiendo imágenes).

Para el desarrollo de esta técnica, se utilizó la cámara de un celular modelo iPhone 13 Pro para tomar fotos del sitio de estudio. Donde se tomaron múltiples fotos (Talud 1: 188 fotos, Talud 2: 260 fotos, Talud 3: 165 fotos, Talud 4: 133 fotos), cada talud en análisis. Para la orientación de la fotogrametría se utilizó como plano de referencia un tablero de 60cm x 40 cm, el cual se colocó en forma horizontal y con un lado orientado hacia el norte geográfico con el fin de utilizar las 3 esquinas del tablero como puntos de control o referencia para orientar el modelo. También se tomaron medidas en campo utilizando una brújula y un flexómetro. Para comprobar la altura del talud se tomaron medidas con un medidor láser BOSCH, que nos permitió medir la altura del talud por medio de un láser.

Luego las fotos fueron procesadas en el Software Agisoft (2016) con el fin de construir la nube de puntos de cada talud. Finalmente, para verificar los resultados se compararon las medidas de buzamiento y dirección de buzamiento del plano de referencia utilizado con los resultados de las mismas medidas en el software CloudCompare en su versión 2.12 (Girardeau-montaut, 2016).

2.2 Estaciones geomecánicas

Las estaciones geomecánicas ayudan a obtener los datos relevantes de los taludes, los cuales se basan en las condiciones existentes del sitio y del comportamiento de las discontinuidades. Una estación geomecánica se define como un punto o sitio de observación, donde se aprecia el afloramiento rocoso, en un entorno aproximadamente de cinco metros donde se caracterizan las discontinuidades y matriz rocosa, extrayendo parámetros físicos y mecánicos (Bernal, 2022). Por consiguiente, se analiza la distribución, orientación y buzamiento de las discontinuidades, así como las condiciones de alteración y resistencia de las paredes en la matriz rocosa y los labios de discontinuidades, para definir las familias que están presentes en el macizo. Una correcta y completa estación geomecánica, nos ayuda a obtener información certera de las características geomecánicas del macizo rocoso en estudio. Por consiguiente, estos datos se correlacionaron con los datos después obtenidos con la fotogrametría incluyendo un análisis automático de las discontinuidades con el software de uso libre Discontinuity Set Extractor (DSE) en el ambiente de MATLAB, este análisis permite identificar las discontinuidades a partir de la nube de puntos 3D, realizada anteriormente (Riquelme et al., 2014).

Para realizar una estación geomecánica se utilizó una brújula Brunton modelo 9077, un esclerómetro PCE - HT 225 A, el cuaderno de geomecánica, un medidor láser BOSCH GLM400C entre otras herramientas básicas. De las estaciones geomecánicas, se obtiene la caracterización del macizo rocoso y con ello, se procede aplicar los métodos mencionados en este trabajo. Los mismos se encuentran entre varios métodos de clasificación de taludes en la actualidad. (Hack, 2002; Mazzoccola & Hudson, 1996; Robertson, 1988; Selby, 1980; Tomás et al., 2007).

2.3 SMR (Slope Mass Rating)

La clasificación geomecánica conocida como SMR tiene origen en la corrección por orientación de juntas y taludes del RMR (Rock Mass Rating) básico desarrollado por Bieniawski (1973), los factores de ajuste para obtener el valor de SMR a partir del RMR dependen de la geométrica y la relación entre las orientaciones de los taludes y las discontinuidades, así como el método de excavación utilizado. Esta clasificación es utilizada para evaluar la estabilidad de taludes en roca.

El SMR se obtiene de la expresión (Romana, 1985):

$$SMR = RMR_b + (F1 * F2 * F3) + F4 \quad (1)$$

SMR: Clasificación de masa de pendiente.

RMRb: Clasificación básica del macizo rocoso.

F1: Factor dependiente entre la dirección de las juntas y la cara del talud.

F2: Factor en función del buzamiento de la junta en el plano de rotura.

F3: Factor que refleja la relación entre el buzamiento de la junta y el talud.

F4: Factor en función del método que se utilizó para excavar el talud.

2.4 Q – Slope

Q slope (Bar and Barton, 2017) es un método empírico para evaluar el comportamiento de taludes de roca excavados en campo y es utilizado tanto para carreteras como para minería superficial. Este método es derivado del índice Q (Barton et al., 1974), que ha sido utilizada ampliamente para la caracterización y evaluación de macizos rocosos en obras subterráneas. Los parámetros de Q de Barton que se mantienen para este cálculo son el RQD, Jn, Jr y Ja, los nuevos parámetros como el Jwice y el SRF (Strenght Reduction Factor) son determinados por varias condiciones a lo largo del tiempo de exposición del talud como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 1: Numero de condiciones ambientales y geológicas (Jwice), Fuente: Bar and Barton (2017)

Descripción	Ambiente seco	Ambiente húmedo	Ambiente tropical	Hielo
Estructura estable; roca competente	1.0	0.7	0.5	0.9
Estructura estable; roca incompetente	0.7	0.6	0.3	0.5
Estructura inestable; roca competente	0.8	0.5	0.1	0.3
Estructura inestable; roca incompetente	0.5	0.3	0.05	0.2

Tabla 2: Factores de reducción de fuerza máximos de SRFa, Fuente: Bar & Barton (2017)

Descripción	SRFa
Ligero aflojamiento debido a la ubicación de la superficie, perturbación por voladura o excavación.	2.5

* Bloques sueltos, grietas por tensión, cizallamiento articular, susceptibilidad a la intemperie, perturbación severa de la voladura.	5
Como arriba (*), pero fuerte susceptibilidad a la intemperie	10
La pendiente se encuentra en una etapa avanzada de erosión y aflojamiento debido a la erosión por el agua y/o los efectos de acuífamiento de hielo.	15

Tabla 3: Factores de reducción de fuerza máximos de SRFb, Fuente: Bar & Barton (2017)

Descripcion	σ_c/σ_1	SRFb
Rango moderado de tensión-fuerza.	50 - 200	2.5 - 1
Alto rango de resistencia al esfuerzo.	10 - 50	5 - 2.5
Falla localizada en roca intacta	5 - 10	5 - 10
Trituración o rendimiento plástico.	2.5 - 5	15 - 10
Flujo plástico de material ablandado por tensión.	1 - 2.5	20 - 15

Q slope es calculado mediante la expresión:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (1)$$

- RQD: Designación de Calidad de la Roca.
- Jn: Índice de diaclasa.
- Jr: Índice de rugosidad de las discontinuidades.
- Ja: Índice de alteración de la discontinuidad.
- Factor O: Factor de orientación de la discontinuidad.
- Jwice: Condiciones ambientales y geológicas.
- SRFslope: Factor de reducción de la fuerza.

Una vez obtenido el valor de Q slope se puede determinar el valor del ángulo máximo del talud para que este sea estable sin necesidad de soporte.

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65 \quad (2)$$

β : Angulo máximo del talud.

2.5 RHRS (Sistema de Clasificación de Peligro de Caída de Rocas)

El sistema de clasificación de caídas de rocas (RHRS), inicialmente fue implementado por el Departamento de transporte de Oregón en 1984 y patrocinado por la FHWA (Administración Federal de Carreteras), su objetivo era identificar las pendientes que representaban un alto riesgo y que requerían la realización de trabajos de forma inmediata o bien, el desarrollo de un estudio más complejo (Pierson et al., 1990). Sin embargo, en la mayoría de los lugares montañosos, en ocasiones se deben realizar cortes en rocas y debido a la época en el que se desarrollaba esta metodología, hubo malas prácticas de excavación, malas técnicas de voladura y desgarramiento agresivo, obteniendo como resultados pendientes más propensas al desprendimiento de la caída de rocas.

Para la aplicación de esta metodología, es necesario realizar el inventario de las pendientes, la clasificación preliminar de las pendientes, las cuales se agrupan en tres categorías A, B y C, (alto, moderado o bajo), esto según el nivel de amenaza. El objetivo es tener el registro de los lugares donde ocurren la caída de rocas e identificando las pendientes peligrosas. Y con la clasificación detallada se busca diferenciar numéricamente el riesgo en los sitios donde ocurre el desprendimiento. De acuerdo con la puntuación, se puede planificar y organizar, los lugares que requieren una pronta intervención. Cabe indicar que las puntuaciones más altas representan un mayor riesgo.

También es importante contar con registros fotográficos de las pendientes, ya que permiten relacionar los criterios con las condiciones reales del sitio. Esta clasificación es un proceso gradual cuyo objetivo es identificar pendientes peligrosas y determina el orden necesario para mitigar y realizar las correcciones necesarias, del ser el caso.

2.5.1 RHRSmod (Sistema de Clasificación de Peligro de Caída de Rocas Modificado)

Para la aplicación del RHRS modificado, se realizaron algunos estudios en el sur de Italia, donde identificaron que el método RHRS era susceptible a ciertas categorías de la metodología original y que estos datos varían de acuerdo a la perspectiva de cada evaluador (Budetta, 2004).

Para la aplicación del RHRS modificado, se realizaron algunos estudios en el sur de Italia, donde identificaron que el método RHRS era susceptible a ciertas categorías de la metodología original y que estos datos varían de acuerdo con la perspectiva de cada evaluador.

Dentro de las categorías que aplica el RHRSmod, se tiene las calificaciones para las categorías altura de la pendiente, efectividad de zanja, riesgo medio del vehículo, porcentaje visual de decisión, ancho de calzada, características geológicas del sitio, el volumen de desprendimiento de rocas o bien, el tamaño de bloque, el clima y la presencia de agua en el talud, el historial de la caída de rocas. Y como dato importante, el método incluye la categoría Slope Mass Rating (SMR), cuyo dato fue obtenido previamente en este estudio. Demostrando que este método es más sencillo y objetivo al momento de clasificar las pendientes.

Para el análisis de las pendientes se asumieron los siguientes datos: para el riesgo medio del vehículo y a la distancia visual de decisión se lo analizo en cada zona donde existe el desprendimiento del talud, el ancho de calzada es 5,25 metros y precipitación media anual 600m. en cuanto la puntuación del RHRS se considera que para valores menores a 300 se trata de tener en constante monitoreo el sitio, para valores entre 300 y 400 se debe realizar un trabajo parcial correctiva.

2.6 Análisis Cinemático – método equilibrio limite y discontinuidades

El análisis cinemático es un método para analizar la estabilidad de un talud de roca a través de información relevante del mismo como son: identificación de discontinuidades del talud, buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades y del talud, coeficiente de fricción de la roca que compone el talud, entre otros.

Este análisis cinemático se realizó de forma gráfica utilizando el software DIPS de Rocscience, en el cual a través de las proyecciones estereográficas que utiliza el programa podemos encontrar zonas, donde se proyecta una discontinuidad, el talud tiene fallas potenciales que indicarían inestabilidad y en caso que no se encuentra discontinuidad, la pendiente sería estable.

Para evaluar la estabilidad cinemática de los bloques de roca se necesita la resistencia al corte de las discontinuidades. En este trabajo se utiliza Barton (2002) criterios para el “componente de fricción” de las juntas a considerar la cohesión = 0 para ser conservadora en el diseño. El “Componente de fricción (FC) está dado por la siguiente formula (Barton, 2002):

$$FC \text{ (deg)} = \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \times J_w \right) \quad (3)$$

FC:	Componente friccional.
Jr:	Índice de rugosidad de las discontinuidades.
Ja:	Índice de alteración de la discontinuidad.
Jw:	Índice de presencia de agua.

3. Resultados

Se utilizó el software Discontinuity Set Extractor para comparar los resultados que se midieron en campo, con los resultados obtenidos en el programa, donde es posible determinar con mayor certeza y claridad con los gráficos que proporcionados por este software en combinación con Cloud Compare las discontinuidades de cada una de las pendientes que son la base de todos los parámetros a utilizar en los métodos de cálculo de este trabajo. En el siguiente gráfico se aprecia las principales discontinuidades que se han considerado para cada talud:

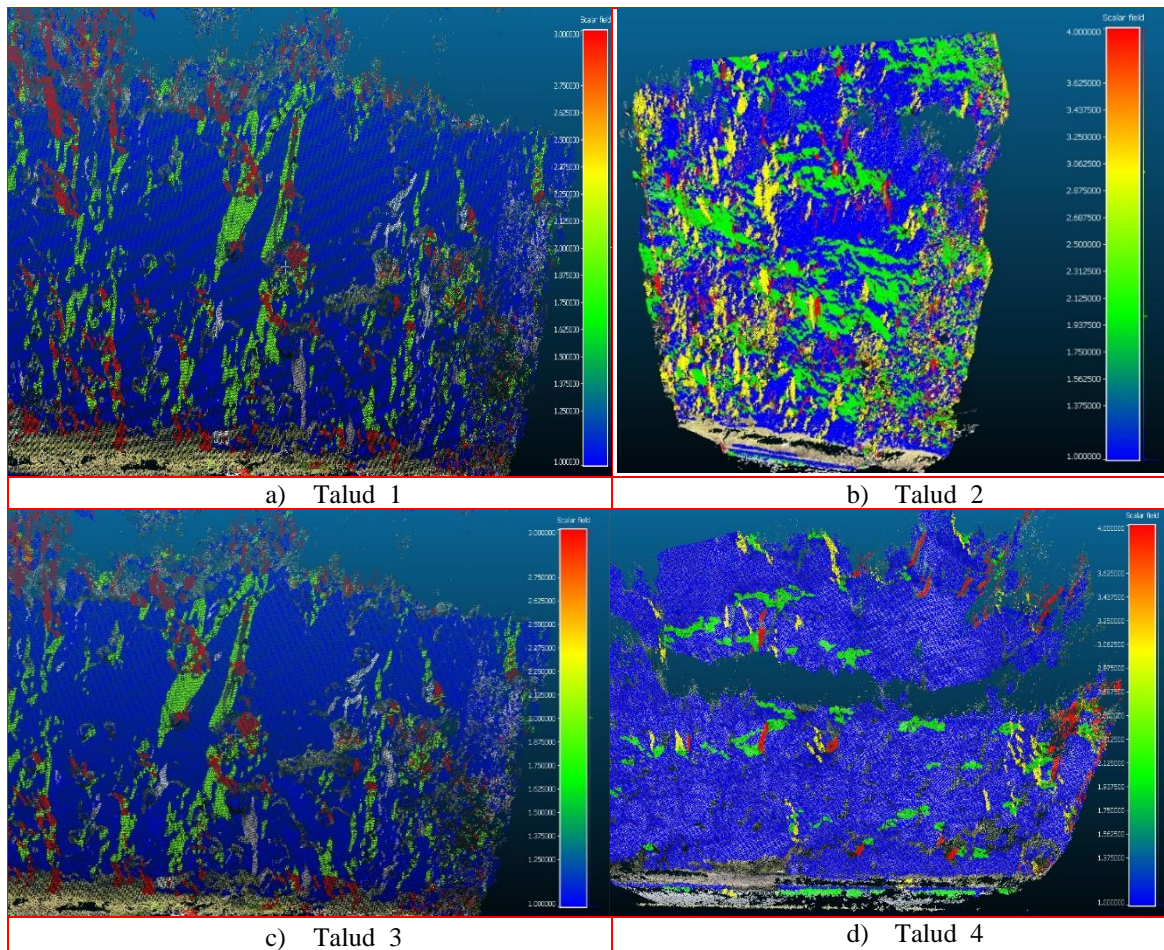


Imagen 3: Discontinuidades identificadas con DSE. a) Talud 1, b) Talud 2 c) Talud 3 y d) Talud 4

NOTA: LOS DISTINTOS COLORES EN LOS GRÁFICOS, REPRESENTAN LAS DISCONTINUIDADES IDENTIFICADAS EN CADA TALUD, SIENDO EL COLOR AZUL EL TALUD Y LOS DEMÁS COLORES LA FAMILIA DE DISCONTINUIDADES.

En el talud número 1 se encontró 2 discontinuidades principales y a considerar, mientras en los taludes restantes se encontraron 3 discontinuidades principales que se consideraron en el cálculo de los métodos siguientes. A continuación, en la *Tabla 4* se muestra el detalle de las discontinuidades identificadas en cada talud:

Tabla 4: Descripción de discontinuidades encontradas en cada uno de los taludes.

Juntas	Talud			
	1	2	3	4
Junta 1 DipDir / Dip	057/87	320/86	097/064	292/88
Junta 2 DipDir / Dip	036/53	072/70	194/83	322/86

Junta 3 DipDir / Dip	N.I.	176/86	354/77	052/86
----------------------	------	--------	--------	--------

3.1 Clasificación de Masa de taludes (SMR)

Los resultados de la RMR básico obtenidos indican que la roca en cada uno de los taludes oscila en valores de 50 a 70, aplicando los factores de corrección para cada uno de los casos de falla Planar y Toppling (basándose en las medidas tomadas y observaciones no hubo ninguna falla potencial de cuña). Se encontró que los dos primeros taludes son parcialmente estables, el tercero es estable y el cuarto se considera inestable, esto se debe principalmente a la orientación de las discontinuidades con respecto al talud, la siguiente tabla muestra los parámetros utilizados y los resultados obtenidos en cada una de los taludes.

Tabla 5: Parámetros característicos geomecánicos del RMR y del SMR en la zona de estudio.

Parámetros	Talud				
	1	2	3	4	
Litología	Ignimbrita	Ignimbrita	Ignimbrita	Ignimbrita	
Altura de talud (m)	10.80	23.70	8.00	11.15	
UCS (MPa)	45.08	33.32	35.28	42.14	
Val RQD (%)	93	94	97	85	
Val. Separacion de Juntas	3	3	3	3	
Estado de diaclasas	2	2	2	2	
Val. Presencia de agua	15	15	15	15	
RMR Calculado	67.30	68	68	57	
F1 P	J1	0.40	0.15	0.40	0.15
	J2	0.15	0.15	0.15	0.15
	J3	-	0.15	0.15	0.15
F2 P	J1	1.00	1.00	1.00	1.00

	J2	1.00	1.00	1.00	1.00
	J3	-	1.00	1.00	1.00
F3 P	J1	-6.00	0.00	-6.00	0.00
	J2	-60.00	-6.00	0.00	0.00
	J3	-	0.00	0.00	0.00
F1 T	J1	0.15	1.00	0.15	1.00
	J2	0.15	0.15	0.15	0.40
	J3	-	0.15	0.15	0.15
F2 T	J1	1.00	1.00	1.00	1.00
	J2	1.00	1.00	1.00	1.00
	J3	-	1.00	1.00	1.00
F3 T	J1	-25.00	-25.00	-25.00	-25.00
	J2	-25.00	-25.00	-25.00	-25.00
	J3	-	-25.00	-25.00	-25.00
Excavación	Voladoras o Excavaciones	Voladoras o Excavaciones	Voladoras o Excavaciones	Voladoras o Excavaciones	
F4	0.00	0.00	0.00	0.00	
SMR	58.30	43.00	64.25	32.00	
Estabilidad	Parcialmente Estable	Parcialmente Estable	Estable	Inestable	
Falla	P	T	T	T	

3.2 Q – SLOPE

En este método nos encontramos como resultados que el primer talud estudiado es inestable mientras que los tres restantes son estables, esto se debe a que en el método de Q slope se considera la inclinación del talud, la cual si es menor al ángulo (β) obtenido mediante el cálculo pues se considera que el talud es estable, esta consideración permite estos resultados ya que los taludes 2, 3 y 4 tienen una inclinación baja que les permite considerarse estables en este método.

Tabla 6: Parámetros de las características geomecánicas del índice Q slope de los taludes.

Parámetros	Talud			
	1	2	3	4
Litología	Ignimbrita	Ignimbrita	Ignimbrita	Ignimbrita
Altura de talud (m)	10.80	23.70	8.00	11.15

RQD (%)	93	94	97	85
Jn	12	12	12	12
Jr	3	3	3	3
Ja	2	2	2	2
O Factor	0.75	0.50	1.00	0.50
Jw	0.50	0.50	0.50	0.50
SRF Slope	2.50	4	2.50	4
Q Slope	1.74	0.73	2.43	0.66
β	69.80	62.30	72.70	61.40
Angulo del talud	79	61	57	57
Estabilidad	Inestable	Estable	Estable	Estable

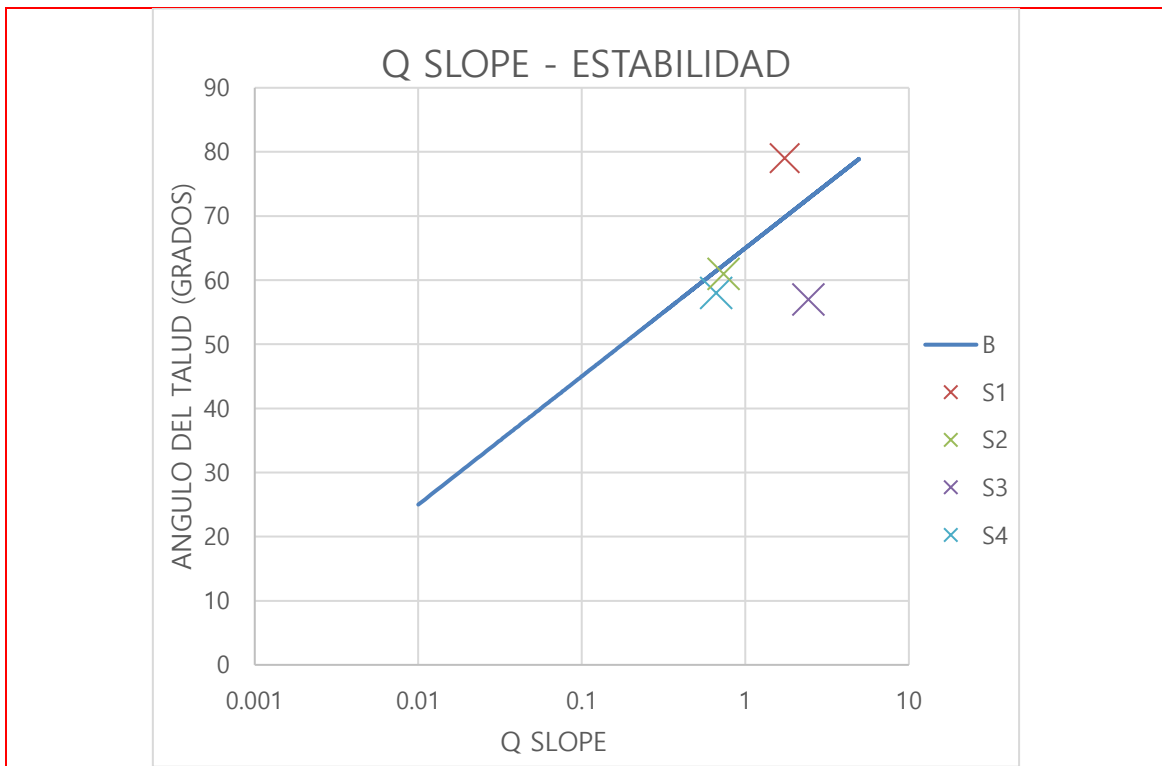


Imagen 4: Q Slope: Gráfico que representa la estabilidad de los taludes (slope1, slope2, slope3, slope4) de acuerdo con el máximo ángulo de inclinación (β) que este método considera (por encima de la línea azul es la zona inestable y por debajo la zona estable)

3.3 RHRSmod

Para la aplicación del método del Sistema de clasificación de riesgos de caída de rocas (RHRS), se optó por el método RHRSmodificado (Budetta, 2004), debido a que este método incluye dentro de sus categorías de evaluación el Slope Mass Rating (SMR), cuyo dato fue obtenido previamente. Y el cual se basa en la caracterización del macizo rocoso, otorgando un dato fiable con respecto al comportamiento del talud.

Para el RHRSmodificado se obtuvieron puntuaciones, que se muestran a continuación:

Tabla 7: Puntuación de talud del RHRSmod.

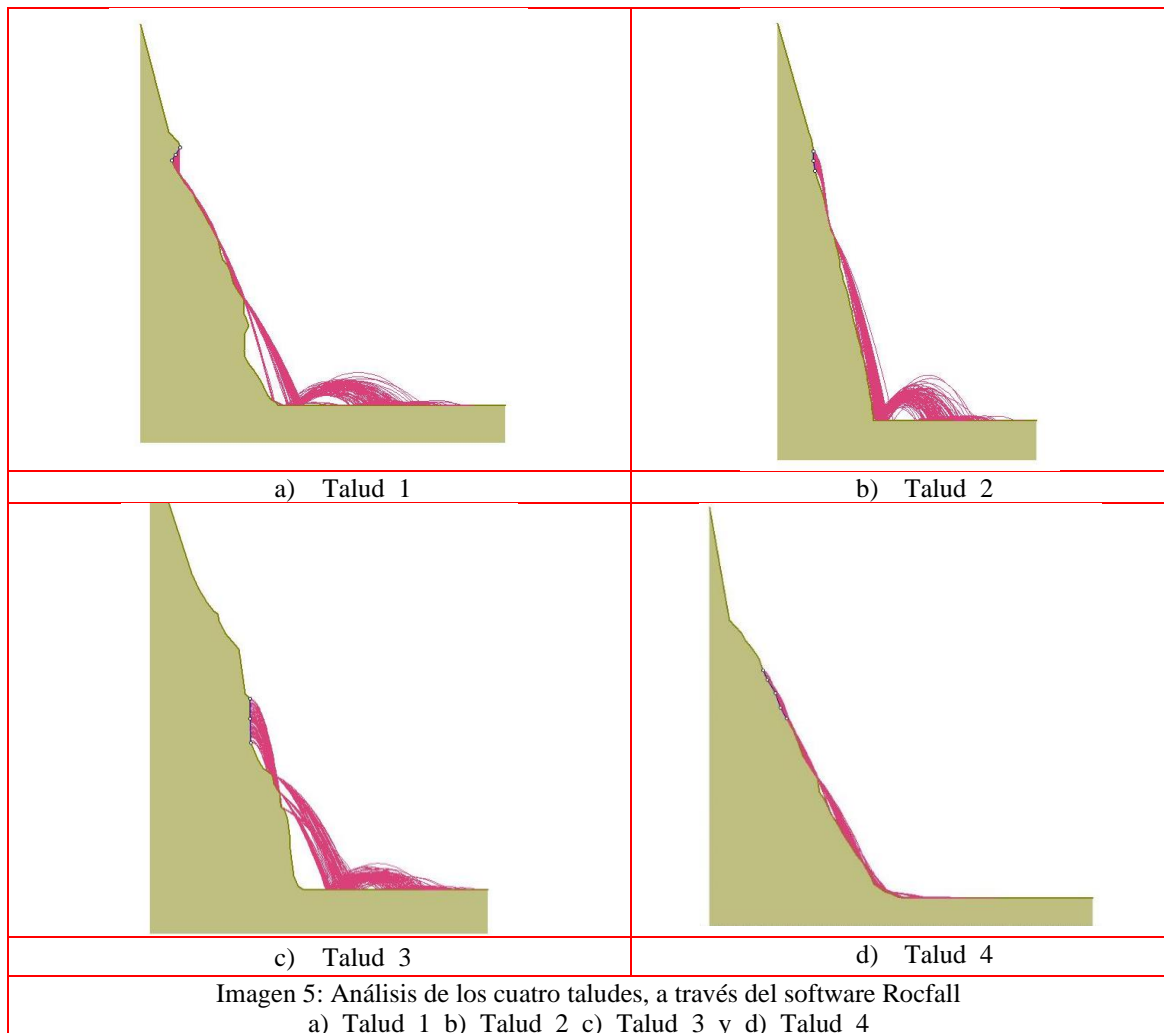
Talud	Puntuación
1	242.80
2	208.90
3	205.40

4	249.20
---	--------

Estas puntuaciones indican que el riesgo del desprendimiento de rocas, requieren una acción correctiva en los taludes 1 y 4. Y para los taludes 2 y 3, realizar un monitoreo continuo en estos sitios.

Tabla 8: Valor de RHRsmod. de la pendiente.

Parámetros	SLOPE							
	1		2		3		4	
	Valor	Puntos	Valor	Puntos	Valor	Puntos	Valor	Puntos
Altura del talud (m)	23.00	27.00	11.00	6.00	17.00	13.00	15.00	9.00
Eficacia de zanja	Captación limitada	27.00	Captación limitada	27.00	Captación moderada	9.00	Captación limitada y moderada	50.00
Riesgo medio del vehículo (AVR)	27.63	3.00	14.17	3.00	21.25	3.00	31.88	3.00
Distancia de visión de Decisión (%Da)	28.12	81.00	44.37	70.20	31.25	81.00	31.25	81.00
Ancho de vía (Lc) metros	5.25	81.00	5.25	81.00	5.25	81.00	5.25	81.00
Slope Mass Rating (SMR)	58.30	5.80	43.00	9.70	64.25	6.40	32.00	7.20
Tamaño del Bloque	0.50	9.00	0.30	3.00	0.26	3.00	0.30	3.00
Precipitación anual mm/año	600	6.00	600	6.00	600	6.00	600	6.00
Historia de caída de rocas	Pocas caídas	3.00	Pocas caídas	3.00	Pocas caídas	3.00	Caídas ocasionales	9.00



En el resultado del talud 1 existen fragmentos de roca al pie del talud lo cual nos indica una similitud con la imagen del resultado del software ya que la trayectoria es similar a lo visto en la realidad a pesar de que en alguna limpieza de la vía estos fragmentos hayan sido movidos.

En el resultado del talud 2 se pudo observar en campo fragmentos como el de la siguiente imagen el cual tiene una trayectoria muy similar al resultado en RocFall.



Imagen 6: Imagen del talud 2 donde se observa fragmentos de roca que han caído.

En el resultado del talud 3 si existe una diferencia con lo observado en campo ya que no se observaron muchos fragmentos caídos y peor aún con la trayectoria del resultado que indica que la caída sería hasta una distancia considerable del pie del talud.

En el talud 4 como podemos observar en la siguiente imagen si existe una similitud en la trayectoria de caída de fragmentos de roca, estos fragmentos que han caído se sitúan en el pie del talud, así como indica la trayectoria indicada en el programa.



Imagen 7: Imagen del talud 4, se observa fragmentos de roca que han caído.

3.3 Análisis Cinemático

Ingresando los datos de las discontinuidades y de cada uno de los taludes en el programa Dips mencionado en la metodología podemos encontrar gráficamente los polos (de las discontinuidades) que se encuentran en una zona de inestabilidad, es decir que según el método los polos de las discontinuidades que están en esta zona son considerados inestables, en el siguiente gráfico podemos observar los resultados, en este caso tenemos al talud 2 y 4 como considerados inestables.

Tabla 9: Evaluación cinemática de los taludes rocosos de estudio.

Parámetros	Talud			
	1	2	3	4
Orientación del talud DipDir/ Dip	087/79	139/61	119/57	115/58
Altura de talud (m)	10.80	23.70	8.00	11.15
Junta 1 DipDir / Dip	057/87	320/86	097/064	292/88

Junta 2 DipDir / Dip	036/53	072/70	194/83	322/86
Junta 3 DipDir / Dip	N.I.	176/86	354/77	052/86
Jr/Ja * Jw	$3/2 \times 0.5 = 0.75$	$3/2 \times 0.5 = 0.75$	$3/2 \times 0.5 = 0.75$	$3/2 \times 0.5 = 0.75$
Componente de Friccion FC (grados)	48	37	37	37
Modo de falla y juntas criticas	Estable sin falla	Derribo por flexión en J1	Sin fallas, estrictas. Estable	Derribo por flexión en J1
Factor de seguridad FS	0.27	>1	>2	>3

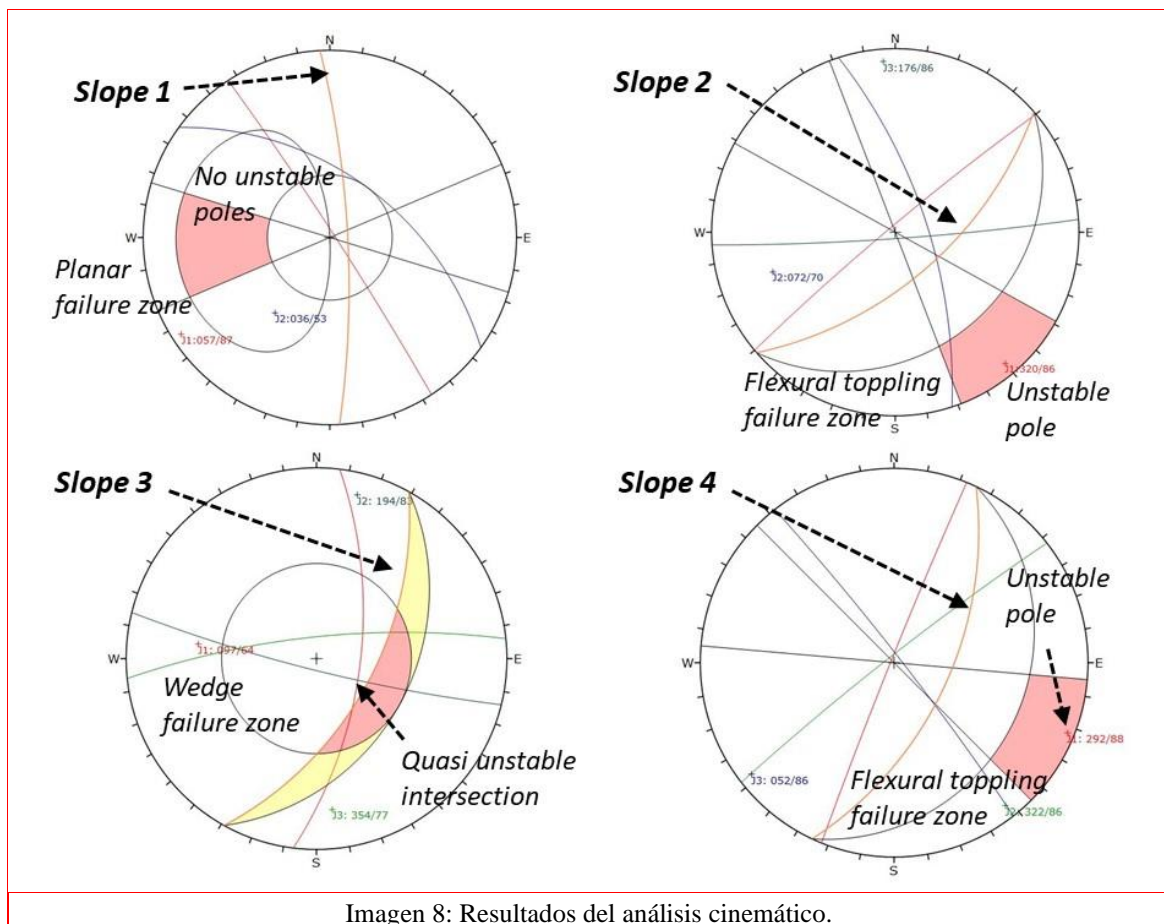


Imagen 8: Resultados del análisis cinemático.

4. Discusión

En este trabajo se realizó un trabajo se obtuvieron datos de campo para obtener los parámetros geotécnicos del macizo rocoso y de las discontinuidades, además de un modelo fotogramétrico. Dado que han existido dificultades de acceso a los taludes, se optado por combinar los análisis de campo con las técnicas remotas. En los taludes analizados fue muy importante comparar las medidas de las discontinuidades con los resultados de estos, en los programas computacionales a través de la nube de puntos y la identificación automática de discontinuidades (DSE), esto pudo corroborar las medidas realizadas en campo con ajustes mínimos debido a errores que en campo se ocasionan por la dificultad de realizar medidas debido a las limitaciones de espacio y accesibilidad principalmente, con estas mínimas diferencias con los resultados obtenidos en campo podemos calificar que en este trabajo esta técnica fue exitosa así como en otro trabajo similar (Delgado-Reivan et al., 2023) donde también se tuvo resultados muy buenos en la toma de datos a través de esta técnica.

A continuación, se muestra la Tabla 10, donde se resumen los resultados obtenidos en cada método, sobre la estabilidad de los taludes estudiados.

Tabla 10: Resumen de resultados utilizados por los distintos métodos.

Método aplicado	Talud			
	1	2	3	4
Slope Mass Rating (SMR)	Parcialmente Estable	Parcialmente Estable	Estable	Inestable
Q - Slope	Inestable	Estable	Estable	Estable
Análisis Cinemático	Estable	Estable	Estable	Estable
RHRSmod.	Riesgo moderado	Bajo riesgo	Bajo riesgo	Riesgo moderado
Visual	Estable	Parcialmente Estable	Estable	Estable

En el caso del talud 1, a pesar de que en campo no se identificaron problemas de estabilidad a simple vista, podemos ver que en los métodos empíricos utilizados los resultados no son favorables en el tema de la estabilidad, en el caso del SMR resulta que es parcialmente estable según esta clasificación, en cambio con el método Q slope resulta inestable y esto se debe a que el ángulo de inclinación del talud es superior al ángulo que nos indica este método para que sea estable bajo sus condiciones, en el caso del análisis cinemático resulta ser un talud estable a pesar de tener un factor de seguridad de 0.27, esto se debe a que existe una zona concreta del talud la cual esta propensa a la falla mientras que el resto del talud es estable por eso existe esa incoherencia entre el resultado del factor de seguridad y el resultado del talud como estable. Sin embargo, al analizar y sobre todo con

los resultados de los métodos empíricos las orientaciones de las discontinuidades presentan un riesgo de falla la cual debe ser considerada ya que con el tiempo o en algún evento particular puede representar un peligro para los usuarios de la vía en este caso la junta 2 es la que estaría provocando este problema.

En el caso de los tres taludes restantes, tenemos diferentes resultados comparando el SMR y el Q slope, es importante considerar el Q slope es un método que fue creado para taludes nuevos excavados en donde se considera el ángulo de inclinación de cada talud para saber si es estable o no, en este caso los taludes de esta carretera son taludes que han sido excavados o cortados a través de voladura para lograr construir la carretera, es decir el método de Q slope nos puede orientar de una manera más precisa por este particular mencionado y en este caso de los taludes 2, 3 y 4 el ángulo de inclinación que tienen estos taludes los hace considerar estables. Esta comparación de métodos también recalca lo importante del análisis de taludes de roca por varios métodos ya que cada caso es distinto y es importante la interpretación de los resultados más acordes a la realidad.

En el análisis cinemático los resultados de los tres taludes restantes son favorables en lo que a su estabilidad de refiere con factores de seguridad mayores de 1 y en el caso del talud 4 incluso este factor es mayor a 3. Esto nos indica que a pesar de observar evidencia de desprendimiento de pequeños fragmentos de rocas los taludes en general son estables bajo este método y las fallas o caídas de estos bloques pueden ser por fallas localizadas en una zona concreta o específica.

Comparando con otros trabajos Delgado-Reivan et al., (2023) y Bernal (2022) donde se han analizados taludes mediante estos métodos utilizados en el presente estudio, resulta igualmente que existen diferencias de resultados entre los métodos utilizados, esto corrobora la necesidad de analizar los taludes por varios métodos y obtener un criterio particular sobre cada uno dependiendo de sus características además de comparar con los resultados cinemáticos o numéricos de ser el caso y la identificación visual. En el caso del presente estudio los motivos geo mecánicos por los cuales difieren los métodos utilizados, sobre todo los métodos empíricos (SMR y Q slope), son principalmente el ángulo que tienen los taludes lo cual los hace considerar estables bajo el método del Q slope ignorando así condiciones localizadas en las cuales por la orientación de las discontinuidades pueden existir inestabilidades o desprendimientos lo cual si lo considera el método SMR, como en el caso del talud 2 donde la apreciación visual y el SMR indican cierta inestabilidad pero el Q slope debido al ángulo del talud lo califica como estable. A continuación, se establece ciertas ventajas y limitaciones que tiene cada uno de los métodos para poder considerar en los resultados obtenidos por cada uno.

Método aplicado	Ventajas	Limitaciones
Slope Mass Rating (SMR)	<ul style="list-style-type: none"> - Considera la orientación de las discontinuidades con referencia al talud - Considera el tipo método de excavación del talud o si es un talud natural 	<ul style="list-style-type: none"> - Es un método de prediseño no muy exhaustivo y debe ser comparado con otros métodos
Q – Slope	<ul style="list-style-type: none"> - En la construcción de un talud nuevo puede guiarnos sobre que inclinación debería tener el talud. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es un método de prediseño no muy exhaustivo y debe ser comparado con otros métodos.

		<ul style="list-style-type: none"> - Solo considera el ángulo del talud para calificar como estable o no - Fue diseñado para taludes nuevos excavados no para taludes naturales o de otro origen
Análisis Cinemático	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede realizar a través de secciones críticas y así se puede analizar algún caso puntual. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es complicado obtener los perfiles para el análisis exactamente debido a las limitaciones para realizar medidas en campo - Solo se analiza la sección en dos dimensiones ignorando así algunos esfuerzos que pueden afectar a la estabilidad del talud en la otra dirección
RHRSmod.	<ul style="list-style-type: none"> - Nos orienta acerca del nivel de riesgo en cada vía para así actuar con la brevedad o no según el caso. 	<ul style="list-style-type: none"> - No es un método para el diseño ni prediseño del talud, solo es de análisis de riesgo y para tomar medidas correctivas.
Visual	<ul style="list-style-type: none"> - Nos guía en primera instancia para detectar alguna inestabilidad o riesgo en un talud. - Podemos comparar con los métodos antes mencionados para corroborar la exactitud de los mismos en cada caso particular. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es muy subjetivo y va a depender de la experiencia que tenga el observador en el tema.

Con respecto a las puntuaciones obtenidas en el método RHRSmod, se identificó que los taludes 1 y 4, tienen un mayor peligro en cuanto al desprendimiento de la caída de rocas. Cuyos valores son superiores a 240 puntos, requiriendo una acción correctiva en estos taludes. Por lo que, es importante priorizar su riesgo. Y para los taludes 2 y 3, cuya puntuación son menores de 210 puntos, es necesario tener bajo observación estos taludes y realizar trabajos paliativos cuando sea necesario.

5. Conclusiones

- La metodología utilizada en este trabajo es de gran importancia ya que demuestra que podemos realizar estudios a taludes, utilizando técnicas remotas y de fácil acceso, como en este caso que se realizó la fotogrametría con puntos de control (SfM); lo que nos permitió conocer las propiedades necesarias de los taludes ya en la fase de oficina para poder realizar el análisis por los

diferentes métodos planteados en este trabajo, esto nos permite poder realizar análisis de taludes de roca de manera rápida y sencilla sin la necesidad de equipos muy especializados y de difícil acceso en ocasiones, un análisis rápido y oportuno de los taludes puede ser muy importante a la hora de evitar desgracias y afectaciones a los usuarios que transitan por las carreteras.

- Con los resultados obtenidos bajo los diferentes métodos utilizados en este trabajo es importante destacar la elección del método más adecuado para el estudio de cada talud, el estudio de un talud nos puede generar resultados distintos al evaluarlo con varios métodos pero está en nosotros analizar cuál es el método más acorde a la realidad de cada caso y así poder realizar una interpretación de estos resultados adecuada, también es importante la comparación con el comportamiento del talud observado físicamente en la realidad ya que pueden haber fallas localizadas en lugares específicos de un talud grande lo cual puede resultar en la proposición de soluciones diferentes a la que sugiera un resultado de algún método.

- Con la comparación de métodos utilizados también podemos concluir la importancia de combinar los resultados para una interpretación correcta, como el caso del Q slope que no considera la orientación de las discontinuidades y más bien se centra en el grado de inclinación de un talud en cambio el método cinemático y el SMR consideran estas orientaciones lo que pueden ser métodos más confiables en combinación con el método visual ya en campo para identificar posibles peligros y fallas en los taludes.

- El RHRSmod. es un método rápido y económico, debido a que su evaluación parte en obtener datos tomados en campo, para lo cual, se debe de mapear el sitio. Estos datos se basan en las características físicas del talud y de la carretera adyacente, a las condiciones climáticas del sitio y a la composición de su geología, lo que nos permite determinar una adecuada evaluación sobre el riesgo vial que existe en el lugar. Identificando así, los lugares más críticos, donde existan problemas de desprendimiento de rocas en los taludes.

- Se recomienda que se realice un monitoreo continuo en las áreas de los taludes de estudio, para llevar un registro de los desprendimientos de rocas. Todo esto con la finalidad de mitigar y tomar medidas correctivas de forma acertada, precautelando la seguridad de los vehículos y pasajeros que viajan por la infraestructura vial de este sector.

- Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados y servir de referencia para el correcto uso de los métodos aplicados, sobre todo para el criterio de qué método puede ser el más indicado según las condiciones de los taludes, así junto con otros trabajos similares y en condiciones parecidas a las del lugar analizado en el presente trabajo, puede encontrarse patrones que aporten a manuales o normativas en nuestro país.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL Universidad Politécnica por las enseñanzas brindadas durante el periodo de estudio y de forma especial a nuestro tutor y cotutores quienes nos guiaron con su conocimiento y experiencia para sacar adelante este artículo científico.

Referencias

- Bar, N., & Barton, N. (2017). The Q-slope Method for Rock Slope Engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Rock Engineering*, 50(12), 3307–3322.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 185–216. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4)
- Barton, N., & Bar, N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- Bernal, J. (2022). Análisis empírico de estabilidad de taludes carreteros y ferroviarios: Comparación entre métodos cinemáticos, Slope Mass Rating (SMR) e índice Q-slope. aplicación en la sierra de Guadarrama. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15, 335–343.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Nat Hazards Earth Syst Sci. Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-71-2004>
- Delgado-Reivan, X., Paredes-Miranda, C., Loaiza, S., Echeverria, M. D. P. V., Mulas, M., & Jordá-Bordehore, L. (2023). Stability Analysis of Rocky Slopes on the Cuenca–Girón–Pasaje Road, Combining Limit Equilibrium Methods, Kinematics, Empirical Methods, and Photogrammetry. *Remote Sensing*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/rs15030862>
- Girardeau-montaut, D. (2016). CloudCompare (p. 11). EDF R&D Telecom ParisTech.
- Hack, R. (2002). An Evaluation of Slope Stability Classification. All Days.
- IG- EPN. (2018). 53.- Hoja geológica Chimborazo - escala 1 100.000.pdf.
- Mazzoccola, D. F., & Hudson, J. A. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29(1), 37–56. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.03>
- Pierson, L. A., Davis, S. A., & Vickle, R. Van. (1990). Rockfall Hazard Rating System: Implementation manual.
- Riquelme, A., Abellan, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds.
- Robertson, A. M. (1988). Estimating Weak Rock Strength. In *Proceedings of the SME Annual Meeting*. 1–5.
- Romana, M. (1985). New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. *International Society of Rock Mechanics*, 49–53.
- Selby, M. J. (1980). A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift Für Geomorphologie*.
- Tomás, R., Marchal, J., & Serón, J. (2007). Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 1062–1069. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.02.004>

CERTIFICACIÓN DE REVISIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Por medio de la presente, Yo Davide Besenzon Venegas, Coordinador del Programa de Maestría en Geotecnia de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico que:

Con fecha 13 de febrero de 2022, los estudiantes Lissette Stefanía Albán Gómez y Ramiro Alejandro Valenzuela Carrasco con números de identificación 0931140990 y 0603951419, respectivamente, de la Cohorte 3, presentaron la propuesta de su tema de titulación al Comité Académico del programa. Posteriormente, con fecha 07 de marzo de 2022, el Comité revisó y aprobó la propuesta mediante la resolución FICT-CA-GEOTEC-008-2022, cumpliendo con los requisitos establecidos para la aprobación del tema.

A partir de dicha aprobación, los estudiantes mantuvieron reuniones periódicas con el tutor designado, Luis Jordá Bordehore, para la elaboración y desarrollo de su proyecto de titulación, siguiendo los lineamientos establecidos por el programa. Con fecha 08 de julio de 2023, los estudiantes presentaron y sustentaron su proyecto de titulación ante el tribunal evaluador asignado, cumpliendo con el proceso formal de evaluación académica.

Por lo tanto, en calidad de Coordinador del Programa de Maestría en Geotecnia, certifico que el trabajo de titulación denominado "**Análisis de estabilidad de taludes en la vía Penipe Baños, aplicando metodologías empíricas, análisis numérico y técnicas remotas-fotogrametría**", realizado por los estudiantes Lissette Stefanía Albán Gómez y Ramiro Alejandro Valenzuela Carrasco con números de identificación 0931140990 y 0603951419, respectivamente, ha sido revisado y evaluado conforme a los lineamientos y estándares establecidos por el programa.

Debido a circunstancias externas, no ha sido posible obtener las firmas de los involucrados (estudiante, tutor(es) y/o evaluadores). No obstante, en calidad de Coordinador del Programa, certifico que el proyecto cumple con los requisitos académicos y ha sido revisado para su presentación y archivo institucional.

Atentamente,



M. Sc. Davide Besenzon Venegas
Coordinador de la Maestría en Geotecnia