

Análisis de estabilidad de taludes rocosos, combinando métodos de equilibrio límite, cinemático, métodos empíricos (RHRS Y Qslope) y fotogrametría. Caso de estudio Vía Cuenca – Girón – Pa-saje

Xavier Delgado-Reivan¹, Cristhian Paredes-Miranda¹, Silvia Loaiza¹, Maurizio Mulas^{1, *} y Luis Jordá-Bordehore²

¹ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), Universidad Politécnica ESPOL, Campus Gustavo Ga-lindo Km 30.5 vía Perimetral, 09-01-5863 Guayaquil, Ecuador; xedelgad@espol.edu.ec (X.D.-R.); cris109@hotmail.es (C.P.-M.); sloaiza@espol.edu.ec (S.L.); mmulas@espol.edu.ec (M.M.)

² Universidad Politécnica de Madrid; [ljorda@upm.es](mailto:ljord@upm.es) (L.J.-B)

* Correspondencia: mmulas@espol.edu.ec; Tel.: +593-998250529 (M.M.)

Resumen:

Las nubes de puntos 3D obtenidas a partir de la técnica de bajo coste, remota y precisa SfM (Structure from Motion), permite la extracción y obtención de las discontinuidades y sus características de manera manual con la brújula y regla virtual del programa Cloud Compare y de manera automática con el programa DSE (Discontinuity Set Extractor), de forma más rápida, exacta y segura. Los puntos de control a tierra dan como resultado una variación tanto del buzamiento como del ángulo de buzamiento de $\pm 5^\circ$.

Este trabajo analiza la estabilidad de seis taludes (cinco excavados y un natural), apli-cando cinco metodologías de análisis diferentes: tres basadas en el sistema de clasificación de masas rocosas (SMR, RHRS_{mod} y Q_{slope}), análisis cinemático y análisis analítico (Equilibrio Límite). Luego se compara con lo observado en campo e identifico las metodologías de análisis más adecuados y que se ajustan a la realidad. Los parámetros necesarios para el análisis de cada uno de los taludes tales como: orientación, cantidad, espaciamiento y persistencia de las discontinuidades son los que se obtienen a partir del análisis automá-tico. Este tipo de análisis elimina la subjetividad de los autores, sin embargo, guardan relación y se asemejan a los obtenidos de manera manual.

Finalmente, los resultados muestran que para la zona de estudio y con la información disponible aplicando técnicas de bajo coste, la metodología que presenta los mejores re-sultados y se ajusta de mejor manera a la realidad en la zona de estudio es el sistema SMR. Además, SMR es un parámetro necesario para determinar el peligro de caída de rocas a través de RHRS modificado.

Palabras Clave: Structure from Motion; Discontinuity Set Extractor; Cloud Compare; Clasificación de Masas Rocosas; Análisis Analítico; Análisis Cinemático

Citation: Lastname, F.; Lastname, F.; Lastname, F. Title. *Geosciences* 2022, 12, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: Firstname Last-name

Received: date

Accepted: date

Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neu-tral with regard to jurisdictional claims in published maps and institu-tional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and con-ditions of the Creative Commons At-tribution (CC BY) license ([https://cre-ativecommons.org/licenses/by/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

1. Introducción

La caracterización de la masa rocosa y el análisis de la estabilidad de taludes rocosos en vías es una tarea fundamental y necesaria para garantizar la seguridad de los usuarios. Tradicionalmente, el análisis de los taludes se realiza mediante estaciones geomecánicas con la utilización de brújula de mano, cinta métrica y otras herramientas que permiten describir las condiciones de las juntas como el esclerómetro y peine de Barton [1]. Existen

varias metodologías para el análisis de la estabilidad de taludes: métodos de equilibrio límite [2–4]; análisis cinemático [5–6]; métodos empíricos como las clasificaciones geomecánicas (Clasificación de Masa de Roca- RMR; Índice Q de Barton - Q_{system} ; Índice Q pendiente de Barton - Q_{slope} ; Clasificación de Masa de Pendiente – SMR; Sistema de Clasificación de Peligro de Caída de Rocas - RHRS) [7-9]; métodos numéricos [10, 11]. Todas las metodologías necesitan de una correcta caracterización de las discontinuidades ya que de estas depende el comportamiento mecánico, hidráulico y deformacional de la masa rocosa [12]. Las discontinuidades no son más que roturas y fracturas en el macizo rocoso con bajas o nulas resistencias a la tracción [13].

El análisis de discontinuidades en taludes rocosos mediante el uso de nube de puntos 3D (3DPC), obtenidas a través de técnicas remotas como Structure from Motion (SfM), ha ido ganando protagonismo en los últimos años. SfM aporta información geométrica de la superficie externa del talud, permite su análisis de manera segura y la obtención de datos en sitios de difícil acceso. Con la técnica SfM se obtienen conjuntos de datos de alta resolución a distintas escalas y a un bajo coste, requiriendo únicamente de imágenes superpuestas y desplazadas [14]; por lo que la hace ideal en investigaciones de bajo coste en áreas remotas como es el caso del presente estudio. Además, SfM permite el reconocimiento y clasificación de las discontinuidades mediante la aplicación de metodologías de reconocimiento semiautomático [15–18]. Diversos algoritmos desarrollados en los últimos años [16, 19–21] permiten la adquisición automática a partir de la 3DPC de parámetros físicos de los planos de las discontinuidades (espaciamiento, persistencia, rugosidad). El nivel de detalle obtenido en 3DPC con técnicas SfM de acuerdo con [12] es similar al obtenido mediante técnicas de escaneo laser, con la gran ventaja de ser una técnica considerablemente más económica. Por otra parte [22] consideran aceptable una diferencia de valores de orientación de las discontinuidades medidas en campo con la 3DPC de $\pm 5^\circ$. En los taludes analizados en el presente estudio se tiene una precisión media de 4° para la dirección de buzamiento y de 2° para el buzamiento, con una variabilidad máxima de 6° en la dirección de buzamiento en uno de los taludes estudiados. De igual manera [22] señalan que la extracción automática de discontinuidades puede considerarse como el método más objetivo, ya que minimiza la influencia del operador. Por lo tanto, para el análisis de estabilidad realizados en el presente estudio se trabaja con la información obtenida de manera automática con el uso del algoritmo Discontinuity Set Extractor (DSE).

El objetivo general de este estudio es valorar la bonanza de cada una de las distintas metodologías de análisis de estabilidad de taludes, a partir de los datos obtenidos de la 3DPC que permita la identificación del método de análisis más apropiado y que mejor se ajusta a la realidad de la zona de estudio. Con este fin, se propone el análisis de la estabilidad de taludes con métodos empíricos SMR, Q_{slope} y RHRS_{mod} [8, 23–24]; método de equilibrio límite con la ayuda de programas comerciales como Rocplane y Swedge de la casa Rocscience (no se realiza análisis de equilibrio límite para fallas por volcamiento debido a que no se cuenta con la geometría detallada de los taludes) y finalmente análisis cinemático aplicando el modelo JRC-JCS propuesto por Barton y Bandis detallado en [25].

La zona de estudio está ubicada al Sur Oeste de los Andes ecuatorianos (Figura 1a), específicamente entre los km 78+000 – 92+000 de la vía Cuenca – Girón – Pasaje dirección Este – Oeste (Figura 1b). El sector está conformado principalmente por depósitos ignimbríticos, pertenecientes al Grupo Saraguro y a las formaciones Jubones y Santa Isabel [26–29]; lavas andesíticas y ignimbríticas soldadas de composición dacítica a riolítica ricas en cristales de plagioclasa, biotita y cuarzo predominan en la zona [30–31] (Figura 1c). Este tramo de la carretera presenta taludes de corte con diaclasas de enfriamiento en forma columnar de gran escala con inclinaciones en el rango de 80° - 90° y alturas variables entre los 10m – 100m. Esto sumado a la notoria presencia de discontinuidades y bloques de rocas caídos en la vía, dificultan el levantamiento de información en campo y hace

necesario el uso de técnicas remotas como SfM que permitió complementar, garantizar y mejorar la precisión de la información obtenida en campo.

96
97

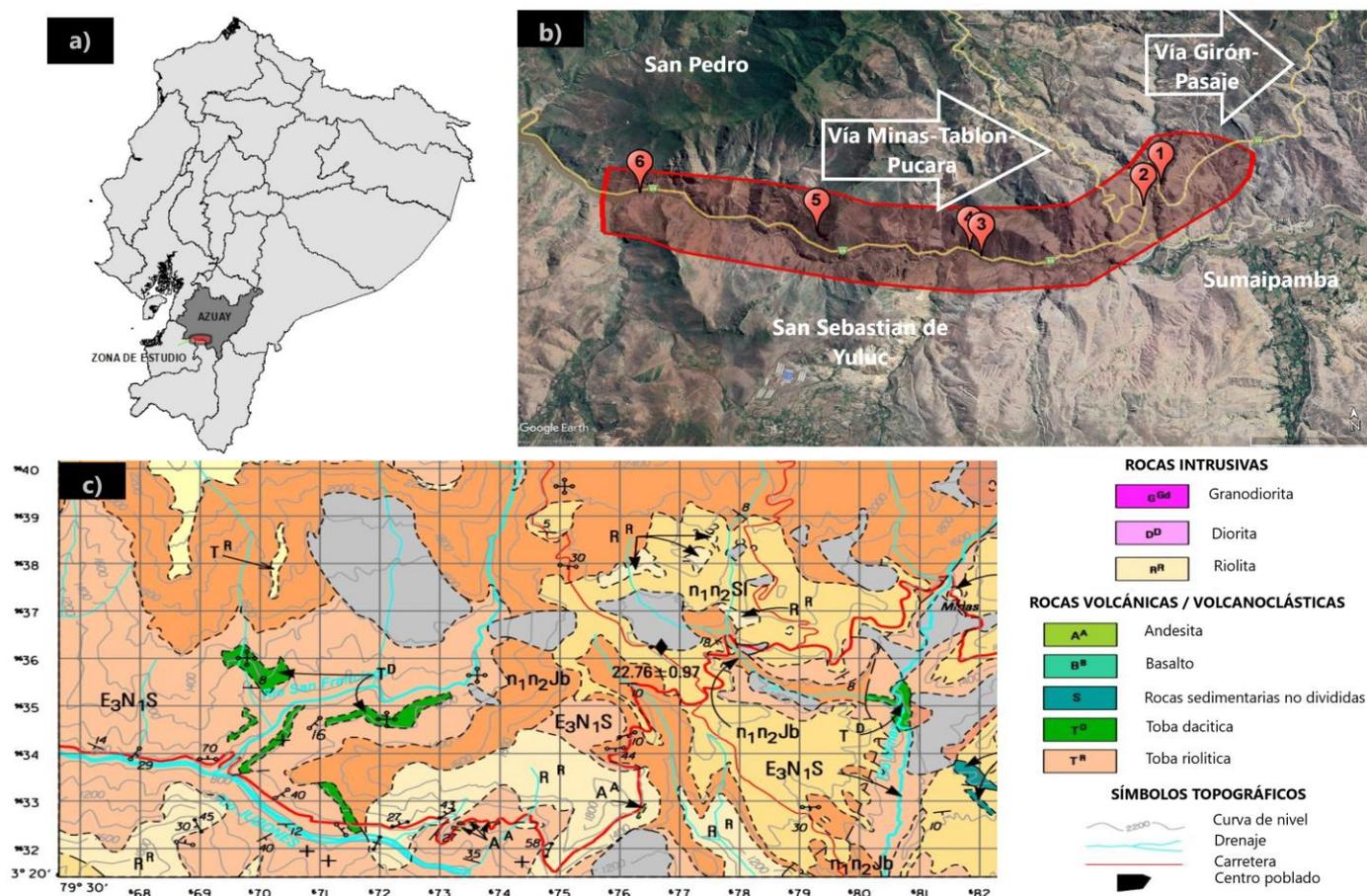


Figura 1. Aspectos generales del área de estudio: a) Ubicación de la zona de estudio: Azuay (Ecuador); b) Vista aérea de la zona analizada extraído y modificado de Google Earth. c) Mapa geológico de la zona de estudio: grupo Saraguro (E_3N_1S), formación Jubones (n_1n_2Jb), formación Jubones (n_1n_2Jb). IIGE (2005 – modif.)

98
99
100
101

2. Materiales y métodos

102

2.1 Levantamiento de información en campo

103

Generalmente el levantamiento de información se realiza en campo con el uso de estaciones geomecánicas a través de estadillos normalizados [1]. Sin embargo en este trabajo se aplicaron técnicas remotas como SfM [32–33] que ayudan a caracterizar macizos rocosos de manera más segura y rápida, utilizándolas como complemento a la técnica clásica.

104
105
106
107
108

Las campañas de campo se desarrollaron en los meses de mayo y junio de 2022, en cada talud (Figura 2) se obtuvieron nueve medidas de orientación de las discontinuidades (buzamiento y dirección de buzamiento); que posteriormente permitieron comprobar el grado de precisión de la fotogrametría. Además, en campo se obtuvo distintas características de las discontinuidades de los taludes como: rugosidad, grado de meteorización, resistencia a la compresión, calidad de la roca; así como también características geométricas del talud como la altura, orientación y tipo, resultados que se presentan en la Tabla 1. Las coordenadas se representan en el sistema UTM WGS 84 17S.

109
110
111
112
113
114
115
116

117

Tabla 1. Información general de la ubicación, geometría y orientaciones de los taludes analizados.

Talud N°	Ubicación	Coordenadas		Altura (m)	DIP Talud (°)	DIR DIP Talud (°)	Tipo de pendiente	Num. de fotografías
		Este	Norte					
1	km 78+740	680392	9631487	46,80	76	315	Excavada	250
2	km 80+900	680041	9631075	13,50	85	55	Excavada	135
3	km 84+475	677153	9630275	32,50	82	215	Excavada	82
4	km 84+635	676963	9630415	23,60	80	185	Excavada	88
5	km 87+700	674342	9630924	40,00	90	45	Natural	109
6	km 91+080	671281	9631878	33,70	83	180	Excavada	171

Asimismo, se realizó un levantamiento fotográfico con una cámara digital Cannon Eos Rebel T4i, que permitió complementar la información del análisis de discontinuidades a través de la creación de la nube de puntos 3D. En un tablero colocado a pie de talud alineado verticalmente (90°), del cual se conoce su rumbo, se colocan 3 puntos de control a tierra con los cuales se pudo escalar y orientar la 3DPC en acuerdo con la metodología de [22].

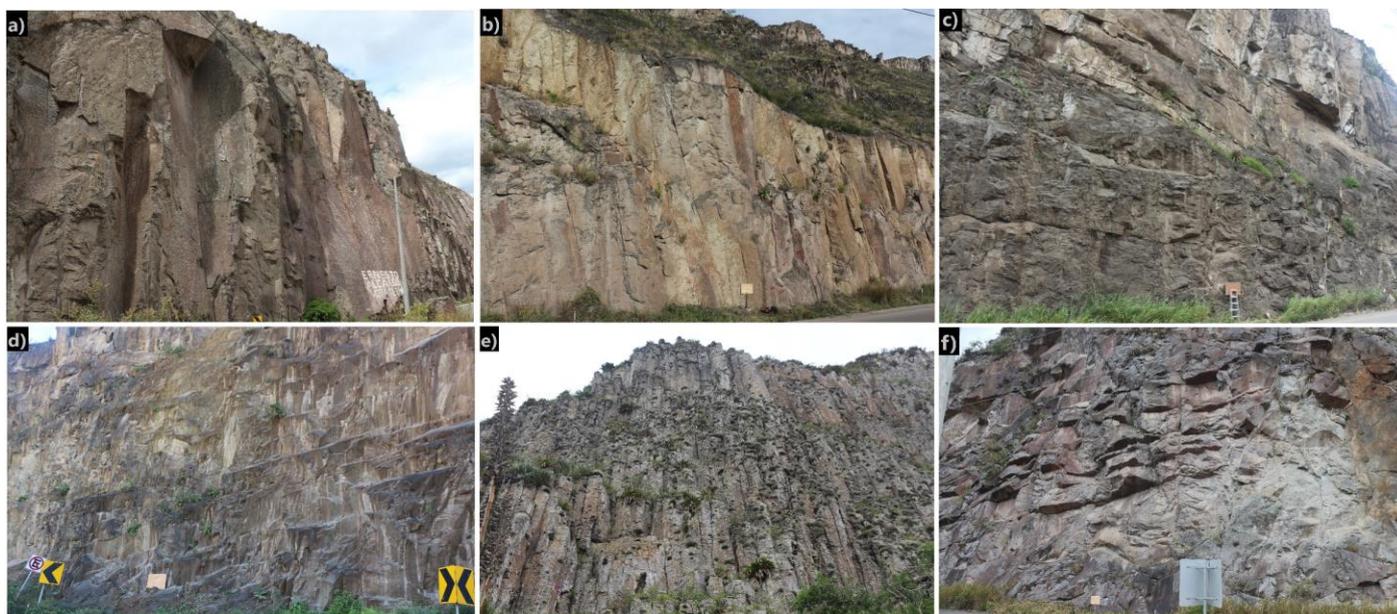


Figura 2. Vista general de taludes analizados via Cuenca – Girón – Pasaje, sentido Este - Oeste: a) Talud 1; b) Talud 2; c) Talud 3; d) Talud 4; e) Talud 5; f) Talud 6

2.2 Nube de puntos 3D

El procesamiento de imágenes digitales se hizo con el software Agisoft Metashape Version 1.7.3 modo Demo, el cual permite la construcción 3D a partir de vistas múltiples de imágenes. El procesamiento de las imágenes con Metashape se hizo siguiendo los siguientes pasos [34]: a) carga de imágenes; b) inspección y descarte de imágenes con calidad inferior a 0,50 unidades; c) alineado automático de cámaras; d) construcción de la nube de puntos 3D. En cada uno de los pasos se trabaja con la calidad más alta, para obtener la mayor cantidad de puntos y nubes lo más reales posibles (Figura 3a). En el programa Cloud Compare versión 2.12 [35], se carga la 3DPC obtenida y con la brújula virtual se verifico y comprobó que las orientaciones medidas en los puntos marcados en la (Figura 3b), sean similares y coherentes en comparación con las medidas en campo con brújula tipo Brunton; esto con la finalidad de garantizar que la orientación y escalado de la 3DPC sea el correcto.

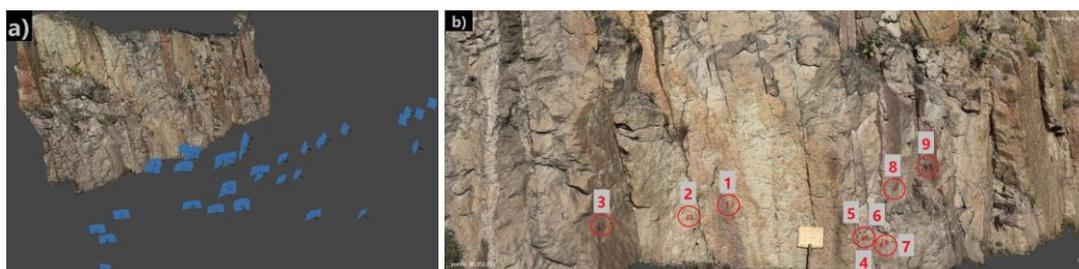


Figura 3. Construcción de la nube de puntos 3D con el programa Agisoft (ejemplo talud 2 ubicado en el km 80+900): a) nube de puntos 3D y orientación de las cámaras; b) puntos de control de orientaciones y puntos de control a tierra.

141
142
143

2.3 Identificación de las discontinuidades

144

Una vez construido y validado las orientaciones y escalado de la 3DPC, la identificación de las discontinuidades se realizó mediante dos métodos: a) de manera manual con el apoyo de la brújula virtual del programa Cloud Compare y b) de manera automática, con el programa de código abierto Discontinuity Set Extractor (DSE).

145
146
147
148

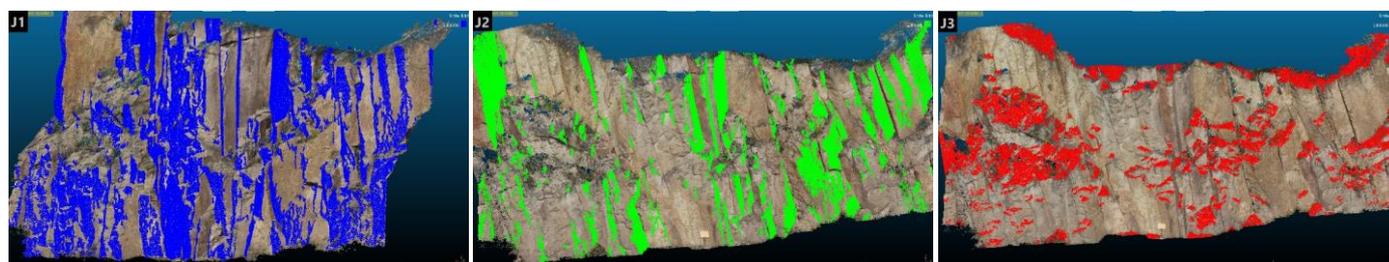
De manera manual se obtuvo centenas de medidas de orientación de las discontinuidades de acuerdo con lo señalado en la Tabla 1, creando grupos de puntos mediante el uso de estereogramas, cada conjunto importante de puntos corresponde a una familia de discontinuidades. DSE es un programa que funciona en el entorno de MATLAB que permite identificar las familias de discontinuidades y sus orientaciones de manera automática [17] (Figura 4). Además, es posible calcular el espaciamiento normal de las discontinuidades [20] y la persistencia [21]. En la tabla 2 se presentan los parámetros utilizados en el desarrollo de este estudio para el análisis de discontinuidades con DSE, en acuerdo con [17].

149
150
151
152
153
154
155
156
157

Tabla 2. Parámetros utilizados en DSE para la obtención de las discontinuidades de manera automática.

158

Fundamento	Parámetro	Valor
Cálculo del vector normal	Número de vecinos cercanos (knn).	30
	Tolerancia / Test de coplanaridad (h).	0%
Cálculo de polos principales	Número de bins para análisis de densidad.	256
	Ángulo mínimo entre polos principales.	30
Asignación de puntos a polos principales	Ángulo máximo entre un polo y su correspondiente polo principal.	30
Análisis Clúster	Número mínimo de puntos por Clúster.	100
	Agrupamiento de planos de Clúster (k).	2



159
160

Figura 4. Discontinuidades identificadas de manera automática con DSE del talud 2 ubicado en el km 80+900: J1; J2; J3.

2.4 Análisis con métodos empíricos

161

Los sistemas de clasificación de masas rocosas han sido utilizados durante varias décadas para evaluar el comportamiento de taludes excavados en roca [36–37]. Los

162
163

factores principales que intervienen en la mayoría de clasificaciones empíricas de acuerdo con [38], son los siguientes: a) la resistencia intacta de la roca (UCS); b) la calidad de la roca (RQD); c) las condiciones de las discontinuidades (número de familias, rugosidad, meteorización o alteración, espaciamiento y persistencia de las discontinuidades); d) los flujos de agua subterránea y; e) factor reductor de estrés (SRF).

El índice de resistencia geológico (GSI) y la resistencia de la roca intacta (UCS), se obtuvo directamente en campo a través de la observación y el martillo Schmidt tipo N respectivamente; mientras que el RQD y la clasificación RMR se determinaron en oficina mediante la combinación de los datos obtenidos en campo y a través de la 3DPC.

De entre las varias clasificaciones de pendientes que existen hoy en día [39–43] hay dos clasificaciones que destacan y son utilizadas a nivel mundial: a) la clasificación de masa de pendiente o SMR [8], que se desarrolló a partir del RMR de Bieniawski, proporcionando factores de ajuste o corrección (Ecuación 1) en función del tipo del método de excavación (F4) y de las orientaciones de las discontinuidades y del talud (F1, F2, F3); b) el índice Q_{slope} [7,23], utiliza los mismos cuatro parámetros RQD, J_n , J_r , J_a , del índice Q de Barton y los otros dos los sustituye por el número de condición ambiental y geológico (J_{wice}) y por el mayor de entre los siguientes factores de reducción de tensión para la pendiente considerando la condición física (SRF_a), similar al índice Q (SRF_b) y (SRF_c) que considera la discontinuidad mayor. Además, en este sistema toma importancia la orientación de la discontinuidad (O) (Ecuación 2).

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (1) \quad 184$$

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_O \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (2) \quad 185$$

En [23], se presenta una formula simple (Ecuación 3) para determinar el ángulo de la pendiente máximo que puede tener un talud para considerarse como estable y no requerir soporte. Dicho ángulo es el comparativo para determinar si el talud es estable o inestable.

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (3) \quad 190$$

Adicionalmente, considerando que la caída de rocas es un peligro importante en los cortes de taludes rocosos para vías y la notoria presencia de bloques de rocas a los costados de la vía analizada, debido a los ángulos de corte pronunciados y notorias fracturas de los taludes, se realizó un análisis de riesgo de desprendimiento de rocas. De acuerdo con la clasificación RHRS_{mod} valores en el rango de 200-300, corresponden a un riesgo medio de desprendimiento de rocas, mientras que valores en el rango de 300-400, corresponden a taludes con riesgo alto de caída de rocas para los cuales es necesario tomar medidas correctivas.

Para determinar el peligro de desprendimiento de rocas se aplicó el Sistema de Clasificación de Peligros de Caídas de Rocas (RHRS_{mod}) modificado por [44], desarrollado a partir del presentado por la División de Carreteras del Estado de Oregón [45] descrito a detalle en [9] y ejemplificado en [46]. En [44] se presenta las funciones exponenciales aplicadas para el cálculo de puntuaciones del método RHRS_{mod}. Para todos los taludes analizados se asumieron los siguientes datos: a) riesgo medio del vehículo (AVR) = 60%; b) distancia de visión de decisión (%D_a) = 50%; c) precipitación media anual (h) = <400mm y; d) frecuencia de caída de rocas (f) = tres por año. Todos los demás parámetros necesarios para la aplicación de la metodología fueron obtenidos en campo. Además, es importante aclarar que en la zona lo típico es la caída de bloques individuales por lo que para la puntuación se toma el tamaño de bloque.

2.5 Análisis cinemático

En acuerdo con [6] al tratarse de taludes poco profundos de roca competente donde su estabilidad está controlada estructuralmente, se realizó un análisis cinemático con el apoyo del software DIPS Versión: 6.008 de la casa Rocscience Inc. Con las familias de discontinuidades identificadas de manera automática con el programa DSE y determinado el ángulo de fricción aplicando el criterio de [25]. Se realizó el análisis cinemático con DIPS, y se corroboró con las condiciones de fallo para rotura planar, rotura por cuña y rotura por vuelco definidas por [5] y que están en función del ángulo de fricción, buzamiento y dirección de buzamiento tanto de las discontinuidades como del talud.

Para la aplicación del criterio de Barton & Bandis se asumieron los siguientes parámetros: ángulo de fricción básico $\phi_b=35^\circ$, peso específico de la roca $\gamma=0.026\text{MPa}$, coeficiente de rugosidad de las juntas $JRC = 8$ para todos los taludes. La resistencia a la compresión de las juntas JCS se midió en campo con el martillo de Schmidt y ϕ_r se obtuvo de acuerdo con lo indicado en [47].

2.6 Análisis de equilibrio límite

Los tipos de fallo de taludes pueden ser: a) circular [2]; b) de derribo [2]; c) planar [3] y d) de cuña [4]. Los dos primeros tipos de fallo requieren conocer la geometría a detalle, por lo que, al tratarse de una investigación en donde el objetivo es utilizar metodologías de bajo coste, se hizo imposible realizar un análisis de equilibrio límite a los taludes para estos tipos de falla. Sin embargo, se realizó un análisis de equilibrio límite o también conocido como analítico, determinando el factor de seguridad (FS) (Ecuación 4) para roturas planas y roturas por cuña. El análisis analítico calcula las fuerzas resistentes o estabilizadoras (F_{est}) y las divide para las fuerzas actuantes o desestabilizadoras (F_{des}) debiendo obtenerse un valor superior a 1 para considerarse que el talud es estable.

$$FS = \frac{F_{est}}{F_{des}} \quad (4)$$

El análisis de estabilidad de los taludes para roturas planas se realizó con la ayuda del programa comercial RocPlane Versión 2.029 que analiza la estabilidad de deslizamientos planos utilizando el método de equilibrio límite. Por otra parte, para el análisis de rotura por cuña se utilizó el programa SWedge Versión 4.078 que evalúa la geometría y estabilidad de cuñas superficiales tetraédricas en taludes rocosos, utilizando Métodos de Equilibrio Límite. El cálculo de las fuerzas estabilizadoras en el caso de roturas planas se aplicó el criterio de Barton & Bandis (Ecuación 5); con los mismos parámetros calculados en el análisis cinemático. Mientras que para el análisis de roturas por cuña se aplicó el criterio de Mohr-Coulomb, asumiendo una cohesión nula siendo esta la condición más desfavorable del talud.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (5)$$

3 Resultados

3.1 Análisis de las familias de discontinuidades

A partir de las nubes de puntos obtenidas para cada uno de los taludes y explicado a detalle en la sección 2, del presente documento; fue posible identificar entre 3 y 4 familias de discontinuidades (J_i) mediante las dos técnicas aplicadas. Para el análisis manual se han medido entre 150 y 300 planos; en el talud número 5 con el análisis manual se identificó una cuarta familia de discontinuidades (J_4), misma que tiene un buzamiento cercano a cero y que no aflora por lo que no se la identifica en el análisis automático. El análisis

automático con DSE permite la medición de miles e incluso millones de puntos, identificando discontinuidades importantes que no han sido definidas en el análisis manual, como el caso de los taludes 1 y 6. La tabla 3, presenta las familias de discontinuidades identificadas por los dos métodos y el número de mediciones en cada análisis.

Tabla 3. Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de manera manual combinando las medidas con brujula en campo y brujula virtual y las obtenidas de manera automática con DSE.

Talud N°	Análisis Manual					Análisis Automático				
	J1	J2	J3	J4	Numero de mediciones	J1	J2	J3	J4	Medición DSE (Pts*/Cluster)
1	315/75	274/81	051/86	N.I.	190	319/76	276/80	055/88	156/34	3,586,666*/684
2	067/83	012/81	050/51	N.E.	250	070/86	015/80	073/39	N.E.	754,110*/442
3	222/88	166/30	184/89	025/46	300	216/83	189/39	000/85	057/72	1,941,850*/1136
4	011/76	206/36	185/82	055/82	151	355/75	204/45	193/75	036/76	447,726*/784
5	269/89	233/86	160/89	347/03	186	261/87	230/87	170/89	N.I.	481,677*/342
6	174/68	340/37	N.I.	327/84	230	183/68	337/39	216/86	326/85	1,542,583*/1374

N.I. = No Identificada / N.E. = No Existe / * Numero de medición de orientaciones de manera automática

Para los análisis en los cuales es necesario conocer la orientación de las discontinuidades, como es el caso del análisis cinemático y SMR, se trabajó con las identificadas de manera automática ya que, elimina la subjetividad de los autores. La figura 5 muestra las discontinuidades identificadas para cada talud con el apoyo del programa DSE.

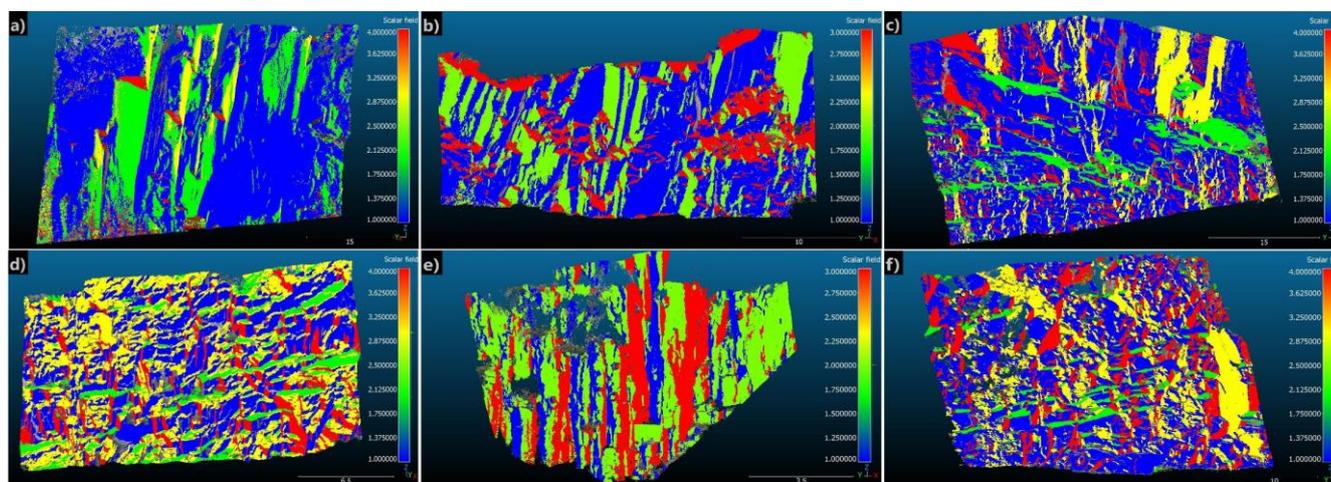


Figura 5. Identificación automatico de discontinuidades con el apoyo del programa DSE: a) Talud 1; b) Talud 2; c) Talud 3; d) 4 / Talud 4; e) Talud 5; f) Talud 6.

3.2 Sistemas de clasificación de masas rocosas

3.2.1 Clasificación de masa de pendiente (SMR)

De acuerdo con el RMR_{básico}, los macizos rocosos son de calidad regular a buena con valores entre los 50 a 70; sin embargo, al aplicar los factores de corrección para determinar el SMR, se obtuvieron valores por debajo de los cuarenta en cinco de los seis taludes analizados; clasificándolos como taludes inestables de mala calidad. La orientación de las discontinuidades más desfavorables podría causar en los taludes 1 y 6 una rotura en cuña, mientras que en los taludes 2, 3 y 4 una posible falla planar. También cabe mencionar que cuatros de los taludes analizados son parcialmente estables frente a un fallo por volcamiento. La tabla 4, muestra los resultados, parámetros y factores considerados para la obtención del SMR.

Tabla 4. Parámetros y factores de corrección para determinar el sistema SMR de clasificación de masa rocosa para taludes.

278

Talud N°	GSI	RQD	UCS	RMR	Rotura (familia)	Factores de corrección				SMR	Estabilidad
						F1	F2	F3	F4		
1	75 - 80	100	40	70	P (J1)	1	1	-25		45	PS
					W (J2-J3)	0,7	1	-50	0	35	U
					T (J3)	0,4	1	-6		67	S
2	60 - 65	95 - 100	38	60	P (J3)	0,7	0,85	-60		24	U
					W (J1-J2)	0,15	1	-50	0	52	PS
					T	0,15	1	0		60	S
3	55 - 60	85 - 95	40	59	P (J2)	0,4	0,85	-60		38	U
					W (J2-J4)	0,15	0,4	-60	0	55	PS
					T (J4)	0,4	1	-25		49	PS
4	55 - 60	77 - 87	51	63	P (J2)	0,7	0,85	-60		27	U
					W (J3-J4)	0,15	0,85	-60	0	55	PS
					T (J1)	0,7	1	-25		45	PS
5	50 - 55	75 - 85	58	53	P	0,15	0,15	0		68	S
					W	0,15	0,15	0	15	68	S
					T (J2)	0,85	1	-25		46	PS
6	50 - 55	50 - 60	46	46	P (J1)	1	1	-60		10*	U
					W (J1-J4)	0,15	1	-60	0	37	U
					T (J4)	0,15	1	-25		42	PS

P = rotura planar; W = rotura en cuña; T = Volcamiento; U = inestable; PS = parcialmente estable; S = estable

3.2.2 Índice Q_{slope}

279

Todos los taludes analizados están formados por rocas competentes y ubicados en un entorno desértico. En general los taludes presentan un grado de alteración con pequeños desplazamientos y rugosidades entre plana lisa a ondulada rugosa. De acuerdo con el Q_{slope} el talud 1 se puede considerar como estable, mientras que en los demás taludes todos presentan ángulos de buzamiento mucho mayores al sugerido (β) mediante este método de clasificación (Tabla 5). La clasificación Q_{slope}, fue creada para analizar los taludes de carretera es por esto por lo que en el Talud 5, que es un talud natural, se observa la discordancia de resultados al compararlo con la clasificación SMR.

280
281
282
283
284
285
286
287

Tabla 5. Cálculo de los parámetros medios para identificar el Q_{slope} de los taludes estudiados: U = inestable; S = estable

288

Talud N°	Factores de cálculo							Qslope	β (°)	Estabilidad
	RQD	Jn	Jr	Ja	O	Jwice	SRF			
1	100	9	3	4	1,00	1	2,5	3,33	75	S
2	100	9	2	6	0,75	0,8	5	0,44	58	U
3	90	15	3	2	0,75	0,8	5	1,08	66	U
4	80	15	3	2	0,75	0,8	5	0,96	65	U
5	80	9	1	6	0,50	0,8	4	0,15	48	U
6	55	9	3	4	0,50	0,8	5	0,37	56	U

3.2.3 Sistema de Clasificación de Caída de Rocas Modificado (RHRS_{mod})

289

La notoria presencia de rocas caídas acomodadas a un costado de la vía analizada hace que cobre importancia la clasificación a través de este método. En esta ocasión se prefirió el sistema RHRS modificado, frente al tradicional de Hoek, debido a que en la

290
291
292

metodología propuesta por [44] añade en la evaluación por puntaje la categoría de la clasificación de masa de pendiente (SMR) calculada anteriormente. La clasificación RHRS_{mod} no se aplicó en el talud 5, ya que no es un talud de carretera. Se obtuvieron valores de RHRS_{mod} de 368, 240, 281, 240 y 344 para los taludes 1, 2, 3, 4, 6, respectivamente. Estos valores corresponden a riesgos medio a altos de desprendimiento de rocas que requieren de medidas correctivas. La tabla 6 muestra los parámetros aplicados con el calor y puntaje adoptado en los taludes analizados.

Tabla 6. Valores y puntajes para cada uno de los parámetros aplicando la metodología RHRS_{mod}

Categoría	Talud 1		Talud 2		Talud 3		Talud 4		Talud 6	
	Valor	Punt.								
Altura de la pendiente (H)	46,8	81	13,5	7	32,5	81	23,6	32	33,7	81
Efectividad de la zanja	N.c.	81								
Riesgo medio del vehículo (AVR)	60	14	60	14	60	14	60	14	60	14
Distancia de visión de decisión (%Da)	50	47	50	47	50	47	50	47	50	47
Ancho de calzada (Lc)	10	25	10	25	10	25	10	25	10	25
Clasificación de masa de pendiente (SMR)	27	26	24	39	38	10	27	26	10	81
Tamaño del bloque (Db)	2,86	81	0,72	14	0,63	10	0,22	2	0,27	3
Precipitación anual (h)	400	4	400	4	400	4	400	4	400	4
Frecuencia de caída de roca (f)	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9

3.3 Análisis Cinemático

Tal como se presenta en la tabla 7 y figura 6, mediante el análisis cinemático se ha identificado distintos posibles modos de falla para 5 de los 6 taludes analizados. Cuatro de los taludes estudiados pueden presentar falla por cuña; tres presentan una posible rotura planar y finalmente dos podrían presentar falla por volcamiento. Los taludes 2, 4 y 6 presentan más de un posible modo de falla mediante el análisis cinemático. Por otra parte, el talud 3, se lo identifica como parcialmente estable para los 3 tipos de rotura; sin embargo, posteriormente en comparación con los resultados obtenidos por los otros métodos se identificará el tipo de falla más probable en cada uno de los taludes.

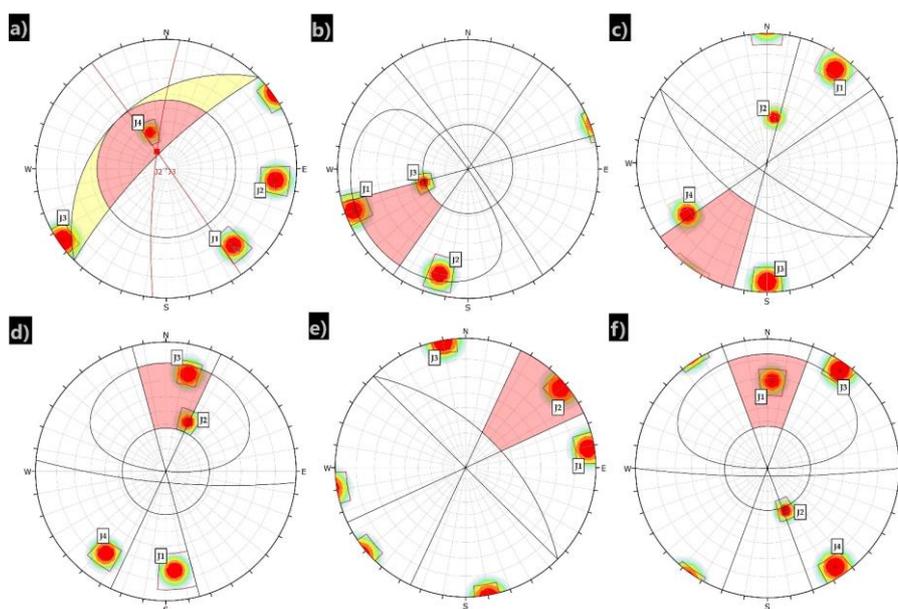


Figura 6. Análisis cinemático: a) Talud 1 (posible falla en cuña J2 – J3); b) Talud 2 (posible rotura planar por J3); c) Talud 3 (posible volcamiento J4); d) Talud 4 (posible rotura planar J2 y J3); e) Talud 5 (posible volcamiento J2); f) Talud 6 (posible falla planar J1).

Tabla 7. Análisis cinemático: parámetros y resultados para determinar la estabilidad de los taludes estudiados: P = planar; W = cuña; T = Volcamiento; U = inestable; S = estable

Talud N°	ϕ_i (°)	Tipo de rotura	Estabilidad	Discontinuidad para considerar
1	34	P	S	/
		W	U	J2 - J3
		T	S	/
2	38	P	U	J3
		W	U	J1 - J2
		T	S	/
3	29	P	PS	J2
		W	PS	J2 - J4
		T	PS	J4
4	37	P	U	J2 y J3
		W	U	J3 - J4
		T	U	J1
5	32	P	S	/
		W	S	/
		T	U	J2
6	36	P	U	J1
		W	U	J1 - J4
		T	PS	J2

2.1 Análisis de Equilibrio Límite

Como se esperaba siendo coincidentes con los resultados previos obtenidos, el análisis de equilibrio límite presenta resultados de $FS < 1$, presentándose inestabilidad para por lo menos un tipo de rotura en cada uno de los taludes estudiados. Sin embargo, es importante notar en la tabla 8, que a pesar de que, en los análisis previos, existía la posibilidad de una rotura plana y en cuña para los taludes 2 y 4 respectivamente, con este análisis se observa que para esos casos se tienen factores de seguridad mayores a uno ($FS > 1$), determinando de esta manera que estos tipos de fallas no son las más desfavorables para dichos taludes. En los taludes en los cuales mediante la clasificación SMR y análisis cinemático se determinó que el posible fallo sería por volcamiento, no se realizó el análisis de equilibrio límite por no contar con una geometría detallada de los taludes.

Tabla 8. Analisis de Equilibrio Límite: factor de seguridad frente a discontinuidades mas desfavorables: W = Cuña; P = Planar

Talud N°	Tipo de rotura	Factor de Seguridad (FS)	Discontinuidad para considerar
1	W	0,56	J2 - J3
2	P	1,31	J3
	W	0,14	J1 - J2
3	P	0,96	J2
	W	0,68	J2 - J4
4	P	0,39	J3
	W	3,09	J3 - J4
6	P	0,47	J1
	W	0,29	J1 - J4

3 Discusión

La adquisición de las fotografías, la medición de los puntos de control mediante brújula manual y cinta métrica, el análisis de la apertura, rugosidad, resistencia y meteorización de las discontinuidades, fueron los trabajos realizados en campo. Con la aplicación de la técnica SfM y la creación de la 3DPC en oficina, fue posible la identificación y medición de discontinuidades de forma rápida y sencilla. Además, permitió el cálculo del espaciamiento y persistencia de las discontinuidades de una manera más segura y exacta. El juicio y subjetividad de los autores cuando se realiza la identificación de las discontinuidades de manera manual se ve eliminado al realizar un análisis de discontinuidades automático con el apoyo de programas como el DSE, obteniendo de esta manera mediciones más exactas. Sin embargo, es importante recalcar que la variación media absoluta de la dirección de buzamiento y buzamiento son menores a 10° y 5° respectivamente, entre las orientaciones obtenidas con la brújula virtual y de manera automática.

En las caras de los seis taludes estudiados se observan importantes fracturas y discontinuidades, ángulos de buzamiento de los taludes mayores a los 75° y alturas de varias decenas de metros. Por lo tanto, era presumible que al realizar el análisis de estabilidad se determinen e identifiquen posibles roturas. Cada uno de los distintos métodos utilizados aplican distintos parámetros y consideraciones; sin embargo, en todos los casos se determinó por lo menos un modo de rotura para cada talud.

De los análisis realizados al talud 1, se ha determinado una posible rotura en cuña ocasionadas por la intersección de los grupos de discontinuidades J2 – J3. El talud 1 presenta el menor ángulo de buzamiento de los taludes estudiados y un RQD = 100, por lo que se esperaría e incluso visualmente gran parte del talud se considera estable como se estableció mediante la clasificación Q_{slope} . Sin embargo, en la figura 1a, en la parte superior izquierda se observa claramente el fallo tipo cuña del talud. En el caso del talud 2, ubicado en el km 80+900, se ha identificado la inestabilidad de este mediante todos los métodos analizados. La intersección de las discontinuidades J1 – J2, podrían causar una rotura tipo cuña por lo que sería el plano de falla esperado, sin embargo, en campo no se observa aún ninguna rotura y visualmente se lo considera como un talud estable. Para el talud 3, se determinó dos posibles modos de rotura la primera planar producida por J2 y la segunda rotura planar producida por la intersección de J2 – J4. Visualmente se observa algunas roturas en cuña y planares concordantes con lo establecido en los análisis. El talud 4, es un caso bastante particular ya que de acuerdo con la clasificación SMR y el análisis cinemático determinaron la posibilidad de que se de los tres tipos de rotura, mientras que el análisis de equilibrio limite descarte la rotura en cuña y en la observación de campo, no se observa aun ningún tipo de falla o rotura. En talud número 5, únicamente mediante el análisis cinemático se determinó el posible fallo por volcamiento, mientras que de acuerdo con el SMR se lo considera estable al ser un talud natural; por otra parte de manera visual se observan pequeños bloques caídos, pero con grandes aberturas entre las discontinuidades, observándose bloques bastante sueltos y de gran tamaño. En cuanto al talud 6, ubicado en el km 91 + 080, tanto de manera visual como con los análisis se ha identificado roturas planares ocasionadas por J1 y en cuña debido a la intersección de las discontinuidades J1 – J4.

Por otra parte, la clasificación $RHRS_{mod}$ cobra importancia debido a la gran cantidad de rocas de tamaño considerable acomodadas a los costados de la vía. En los taludes analizados se tienen valores de $RHRS_{mod}$ superiores a 300, en los taludes 1 y 3, mismos que requieren de medidas correctivas inmediatas. Adicionalmente, sería importante centrar futuros estudios en la zona enfocados únicamente en la clasificación $RHRS_{mod}$, debido a que en la zona existe gran cantidad de taludes de gran altura y de mala calidad propensos a un constante desprendimiento y caídas de rocas.

Este estudio pone en manifiesto la importancia de utilizar varios métodos de análisis de estabilidad de taludes, que permitan comparar e identificar adecuadamente la estabilidad de estos, así como también el modo de rotura y las discontinuidades a considerar. Sin embargo, es sumamente importante identificar los métodos de análisis más adecuado de acuerdo con la realidad de cada talud, por ejemplo la clasificación Q_{slope} fue creado para la excavación de taludes nuevos por lo que en este estudio no brinda la misma cantidad de información en comparación con el SMR, cinemático y equilibrio límite, además, puede arrojar resultados falsos como el caso del presente talud 1 en el cual claramente se observa una rotura en cuña, sin embargo, mediante Q_{slope} se lo determino como estable.

Tabla 9. Identificación de la estabilidad de los taludes estudiados por los distintos métodos: U = Inestable; S = Estable; N.A. = No Aplica; M = Riesgo Medio; H = Riesgo Alto

Talud N°	SMR	Q_{slope}	RHRS _{mod}	Cinemático	Analítico	Visual	Descripción
1	U	S	H	U	U	U	Rotura en cuña
2	U	U	M	U	U	S	No se observa ninguna rotura
3	U	U	M	S	U	U	Roturas planares y en cuña
4	U	U	M	U	U	S	No se observa ninguna rotura
5	S	N.A.	N.A.	U	N.A.	U	Se observan bloques muy sueltos/volcamiento
6	U	U	H	U	U	U	Roturas planares y en cuña

Finalmente, en la tabla 9, se presenta un resumen de la estabilidad de los taludes estudiados, determinados por los métodos mencionados anteriormente y se hace una comparación con lo observado en campo.

4 Conclusiones

La metodología seguida en el presente trabajo para el uso de la técnica SfM, permitió el levantamiento de los taludes de manera segura y rápida, adquiriendo las fotografías con los respectivos puntos de control en un tiempo promedio de 20 minutos por talud. SfM permite realizar un análisis a detalle de las discontinuidades en lo que se refiere a la orientación, espaciado y persistencia, además proporciona una inmejorable capacidad de acceso a las zonas elevadas en talud de gran altura. A partir de las fotografías se pudo reconstruir el talud e identificar las discontinuidades con DSE de manera automática con la medición de miles de orientaciones a partir de la 3DPC, eliminando de esta manera la subjetividad y la baja cantidad de datos obtenidos con la brújula virtual en Cloud Compare; sin embargo, manteniendo cordura en los resultados obtenidos en ambos casos.

En las cinco diferentes metodologías utilizadas para el análisis de la estabilidad de los taludes se obtuvieron resultados apegados a la realidad. Al aplicar el Q_{slope} cuya metodología no considera la orientación de las discontinuidades, se pueden obtener resultados diferentes a lo observado en la realidad, como es el caso del talud 1 que se lo determino estable, a pesar de que se observa claramente un desprendimiento de un bloque de tamaño considerable. Por otra parte, el sistema de clasificación SMR es el ideal para la zona de estudio, ya que considera el tipo de excavación y la orientación de las discontinuidades; mismo que debe ir complementado con un análisis cinemático para posibles roturas

planares, en cuña y por volcamiento, o con un análisis de equilibrio límite para roturas planares y en cuña; que permita validar los resultados. A más de esto, SMR es un parámetro necesario para la clasificación RHRS_{mod} implementado en el presente estudio.

La incorporación de información a detalle de los parámetros que interviene en la clasificación RHRS_{mod} permitirá obtener resultados más realistas y un análisis a profundidad de distintos taludes en la zona de estudio en cuanto al peligro de caída de rocas. En la zona de estudio se observa gran cantidad de rocas caídas a un costado de la vía y es común el cierre e incluso accidentes viales en época invernal a causa del desprendimiento de rocas. Por lo que se hace un llamado a profundizar en las clasificaciones de peligro de caídas de rocas que permita identificar zonas de alto riesgo de caída de rocas a lo largo de la carretera, así como, la propuesta de posibles medidas correctivas.

Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas fueron utilizadas en el texto:

SMR	Clasificación de Masa de Pendiente
RHRS	Sistema de Clasificación de Peligro de Caída de Rocas
Q_{slope}	Índice Q pendiente de Barton
SfM	Structure from Motion
DSE	Discontinuity Set Extractor
RMR	Clasificación de Masa de Roca
Q_{system}	Índice Q de Barton
3DPC	Nube de Puntos 3D
JRC	Coefficiente de rugosidad de las juntas
JCS	Resistencia a compresión de las juntas
UCS	Resistencia intacta de la roca
RQD	Calidad de la roca
SRF	Factor reductor de estrés
GSI	Índice de resistencia geológico
J_r	Índice de rugosidad
J_n	Índice de diaclasado
J_a	Índice de alteración
J_{wice}	Numero de condición ambiental y geológico
O	Orientación de las discontinuidades
F1-F2-F3	Ajuste al RMR en función de las orientaciones
F4	Ajuste al RMR en función del método de excavación
β	Ángulo de pendiente máximo Q_{slope}
ϕ_b	Angulo de fricción básico
ϕ_r	Angulo de fricción residual
ϕ_i	Angulo de fricción instantáneo
σ_n	Esfuerzo normal
τ	Esfuerzo tangencial
γ	Peso específico
FS	Factor de seguridad
F_{est}	Fuerzas estabilizadoras
F_{des}	Fuerzas desestabilizadoras

5 Bibliografía

- Jorda, L.; Tomás, R.; Rodríguez, M.; Abellan, A. Manual de Estaciones Geomecánicas. Descripción de Macizos Rocosos En

- Afloramientos.; 2016; ISBN 978-84-96140-55-4. 425
2. Mohtarami, E.; Jafari, A.; Amini, M. Stability Analysis of Slopes against Combined Circular–Toppling Failure. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2014**, *67*, 43–56, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.12.020>. 426
427
 3. Johari, A.; Mehrabani Lari, A. System Probabilistic Model of Rock Slope Stability Considering Correlated Failure Modes. *Comput. Geotech.* **2017**, *81*, 26–38, doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.07.010>. 428
429
 4. Deng, D. Limit Equilibrium Analysis on the Stability of Rock Wedges with Linear and Nonlinear Strength Criteria. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2021**, *148*, 104967, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104967>. 430
431
 5. Zhou, X.; Chen, J.; Chen, Y.; Song, S.; Shi, M.; Zhan, J. Bayesian-Based Probabilistic Kinematic Analysis of Discontinuity-Controlled Rock Slope Instabilities. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2017**, *76*, 1249–1262, doi:10.1007/s10064-016-0972-5. 432
433
 6. Jordá-Bordehore, L.; Jordá-Bordehore, R.; Romero-Crespo, P.L. Kinematic Assessment of Multi-Face Round Slopes Using Hemispherical Projection Methods (HPM). *Soils Rocks* **2016**, *39*, 167–176. 434
435
 7. Bar, N.; Barton, N.R. Empirical Slope Design for Hard and Soft Rocks Using Q-Slope. In Proceedings of the 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium; OnePetro, 2016. 436
437
 8. Romana, M.R. 23 - A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. In; HUDSON, J.A.B.T.-R.T. and S.C., Ed.; Pergamon: Oxford, 1993; pp. 575–600 ISBN 978-0-08-042066-0. 438
439
 9. Hoek, E. Practical Rock Engineering Available online: <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf> (accessed on 21 June 2022). 440
441
442
 10. Stead, D.; Coggan, J. 13 Numerical Modeling of Rock-Slope Instability. *Landslides Types, Mech. Model.* **2012**, *144*. 443
 11. Azarafza, M.; Asghari-Kaljahi, E.; Akgün, H. Numerical Modeling of Discontinuous Rock Slopes Utilizing the 3DDGM (Three-Dimensional Discontinuity Geometrical Modeling) Method. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2017**, *76*, 989–1007, doi:10.1007/s10064-016-0879-1. 444
445
446
 12. Riquelme, A.; Cano, M.; Tomás, R.; Abellán, A. Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis. *Procedia Eng.* **2017**, *191*, 838–845, doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>. 447
448
449
 13. Zhang, L. Engineering Properties of Rocks; Butterworth-Heinemann, 2016; ISBN 0128028769. 450
 14. Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. ‘Structure-from-Motion’ Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology* **2012**, *179*, 300–314, doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>. 451
452
453
 15. Guo, J.; Wu, L.; Zhang, M.; Liu, S.; Sun, X. Towards Automatic Discontinuity Trace Extraction from Rock Mass Point Cloud without Triangulation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2018**, *112*, 226–237, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.023>. 454
455
 16. Li, X.; Chen, Z.; Chen, J.; Zhu, H. Automatic Characterization of Rock Mass Discontinuities Using 3D Point Clouds. *Eng. Geol.* **2019**, *259*, 105131, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.008>. 456
457
 17. Riquelme, A.J.; Abellán, A.; Tomás, R.; Jaboyedoff, M. A New Approach for Semi-Automatic Rock Mass Joints Recognition from 3D Point Clouds. *Comput. Geosci.* **2014**, *68*, 38–52, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>. 458
459
 18. Riquelme, A.J.; Tomás, R.; Abellán, A. Characterization of Rock Slopes through Slope Mass Rating Using 3D Point Clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2016**, *84*, 165–176, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.008>. 460
461
 19. Lato, M.J.; Vöge, M. Automated Mapping of Rock Discontinuities in 3D Lidar and Photogrammetry Models. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2012**, *54*, 150–158, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003>. 462
463

20. Riquelme, A.J.; Abellán, A.; Tomás, R. Discontinuity Spacing Analysis in Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Eng. Geol.* **2015**, *195*, 185–195, doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009. 464
465
21. Riquelme, A.; Tomás, R.; Cano, M.; Pastor, J.L.; Abellán, A. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Rock Mech. Rock Eng.* **2018**, *51*, 3005–3028, doi:10.1007/s00603-018-1519-9. 466
467
22. Jordá Bordehore, L.; Riquelme, A.; Cano, M.; Tomás, R. Comparing Manual and Remote Sensing Field Discontinuity Collection Used in Kinematic Stability Assessment of Failed Rock Slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2017**, *97*, 24–32, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.06.004. 468
469
470
23. Bar, N.; Barton, N. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mech. Rock Eng.* **2017**, *50*, 3307–3322, doi:10.1007/s00603-017-1305-0. 471
472
24. Saroglou, H.; Marinos, V.; Marinos, P.; Tsiambaos, G. Rockfall Hazard and Risk Assessment: An Example from a High Promontory at the Historical Site of Monemvasia, Greece. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2012**, *12*, 1823–1836, doi:10.5194/nhess-12-1823-2012. 473
474
475
25. Barton, N.; Bandis, S. Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice; 1990; Vol. 182;. 476
26. Avilés-Moran, H.; Escobar Segovia, K.; Flor-Jiménez, M.; Mulas, M.; Murillo-Lozano, I.; Villalta-Echevarría, M. Geotechnical and Structural Characterization of the Ignimbritas of the Saraguro Group in the Sector of Santa Isabel-Pucará, Ecuador. In Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology; January 1 2019. 477
478
479
27. Witt, C. Constraints on the Tectonic Evolution of the North Andean Block Trailing Tail : Evolution of the Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin and the Intermontane Basins of the Central Ecuadorian Andes. **2007**. 480
481
28. Hungerbühler, D.; Steinmann, M.; Winkler, W.; Seward, D.; Egüez et al., A. Neogene Stratigraphy and Andean Geodynamics of Southern Ecuador. *Earth-Science Rev.* **2002**, *57*, 75–124. 482
483
29. Hungerbühler, D. Neogene Basins in the Andes of Southern Ecuador. Evolution, Deformation and Regional Tectonic Implications, ETH Zürich A4 - Bernoulli, Daniel A4 - Winkler, Wilfried, 1997. 484
485
30. Pratt, W.T.; Figueroa, J.F.; Flores, B.G. Geology and mineralization of the area between 3° and 4° S, Western Cordillera, Ecuador 1997. 486
487
31. Dunkley, P.N.; Gaibor, A. Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 2°00' and 3°00'S. **1997**. 488
32. Kong, D.; Saroglou, C.; Wu, F.; Sha, P.; Li, B. Development and Application of UAV-SfM Photogrammetry for Quantitative Characterization of Rock Mass Discontinuities. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2021**, *141*, 104729, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104729. 489
490
491
33. Assali, P.; Grussenmeyer, P.; Villemin, T.; Pollet, N.; Viguiet, F. Surveying and Modeling of Rock Discontinuities by Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry: Semi-Automatic Approaches for Linear Outcrop Inspection. *J. Struct. Geol.* **2014**, *66*, 102–114, doi:https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.014. 492
493
494
34. Agisoft, L.L.C. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. *St Petersburg, Russ. Agisoft LLC.[Google Sch.* **2014**. 495
35. Girardeau-Montaut, D. CloudCompare. *Fr. EDF R&D Telecom ParisTech* **2016**, *11*. 496
36. Azarafza, M.; Nikoobakht, S.; Rahnamarad, J.; Asasi, F.; Derakhshani, R. An Empirical Method for Slope Mass Rating-Qslope Correlation for Isfahan Province, Iran. *MethodsX* **2020**, *7*, 101069, doi:https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101069. 497
498
37. Siddique, T.; Masroor Alam, M.; Mondal, M.E.A.; Vishal, V. Slope Mass Rating and Kinematic Analysis of Slopes along the National Highway-58 near Jonk, Rishikesh, India. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2015**, *7*, 600–606, doi:https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.06.007. 499
500
501
38. Pantelidis, L. Rock Slope Stability Assessment through Rock Mass Classification Systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2009**, *46*, 502

- 315–325. 503
39. Selby, M.J. A Rock Mass Strength Classification for Geomorphic Purposes: With Tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphol.* **1980**, *31*, 31–51. 504
505
40. Robertson, A.M. Estimating Weak Rock Strength. In Proceedings of the Proceedings of the SME annual meeting, Phoenix; 1988; pp. 1–5. 506
507
41. Hack, R. An Evaluation of Slope Stability Classification. In Proceedings of the ISRM International Symposium-EUROCK 2002; OnePetro, 2002. 508
509
42. Tomás, R.; Delgado, J.; Serón, J.B. Modification of Slope Mass Rating (SMR) by Continuous Functions. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2007**, *44*, 1062–1069. 510
511
43. Mazzoccola, D.F.; Hudson, J.A. A Comprehensive Method of Rock Mass Characterization for Indicating Natural Slope Instability. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* **1996**, *29*, 37–56. 512
513
44. Budetta, P. Assessment of Rockfall Risk along Roads. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2004**, *4*, 71–81. 514
45. Pierson, L.A.; Davis, S.A.; Van Vickle, R. Rockfall Hazard Rating System: Implementation Manual; 1990; 515
46. Peševski, I.; Jovanovski, M.; Guy, M.; O'Hare, N. Rockfall Hazard Assessment for Access Road to Dam "Sveta Petka" Using Rockfall Hazard Rating System (RHRS). *Geol. Maced.* **2011**, *25*, 11–20. 516
517
47. Barton, N.; Choubey, V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mech.* **1977**, *10*, 1–54, 518
doi:10.1007/BF01261801. 519
520