

Análisis de Estabilidad de taludes rocosos en la Carretera Cuenca – Sayausí – Molleturo, Puerto Cajas, combinando técnicas remotas, empíricas y visualización en Realidad Virtual

Tania Gabriela Peralta Quizhpi¹; Silvia Loaiza Ambulud i¹ [0000-0001-7565-842X]; Maurizio Mulas¹ [0000-0002-2089-3980]; Luis Jordá Bordehore² [0000-0002-2332-5647]

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil Campus Gustavo Galindo Velasco – Km. 30.5 Vía Perimetral, Ecuador.
lncs@springer.com

Abstract. Puerto de Cajas es un paso de alta montaña en una importante vía que comunica la costa y la ciudad de Cuenca en Ecuador. La estabilidad del macizo rocoso está controlada por bloques y discontinuidades (evaluación cinemática). Mediante fotografías realizadas en campo y estaciones geomecánicas ubicadas en los taludes de estudio, se ha generado la nube de puntos necesaria para obtener las características de difícil acceso en campo. Los datos fueron validados utilizando puntos de control ubicados en las laderas para comparar qué tan similares son las direcciones obtenidas con el Software Cloud Compare y las obtenidas manualmente usando una brújula digital aplicada a teléfonos celulares. Se analizaron tres taludes con las metodologías SMR, Qslope y análisis cinemático. Los resultados obtenidos con el Sistema SMR tienen cierta similitud con lo obtenido con el análisis cinemático. El principal aporte de este artículo es replicar la aplicación de técnicas rápidas y de bajo costo en un lugar donde no se había hecho antes y que forma parte del área protegida Cajas. Los resultados muestran que los taludes son de buena calidad rocosa, sin embargo, el control de estabilidad es necesario no solo para la seguridad vial de la zona sino también para la conservación del entorno en el que se ubica. Otra contribución de la investigación es mostrar los resultados en un repositorio 3D público que se puede visualizar usando gafas de Realidad Virtual. Otros investigadores pueden replicar los resultados, no solo con la metodología y las tablas de datos, sino también accediendo a un entorno simulado de realidad aumentada.

Keywords: Rock Mass, Cloud Compare, kinematic analysis, photogrammetry.

1 Introducción

La estabilidad de taludes ha sido un tema recurrente de estudio a lo largo del tiempo y más aún cuando conllevan asegurar la vida de quienes usan estructuras como vías que atraviesan dichos taludes.

El análisis de estabilidad en un talud rocoso siempre requiere especial cuidado en cuanto a la toma de datos de campo pues de ello depende la interpretación de los datos geomecánicos que pueden verse involucrados en la inestabilidad de los taludes (Buyer et al., 2020; Cerúsico and Marcuzzi, 2011) . En el caso de taludes a lo largo de carreteras, pueden presentar diversos tipos de fallas dependiendo de la rotura de la masa o mediante las discontinuidades.

Las discontinuidades pueden provocar tipologías de rotura como cuña, planar o por vuelco. Es por ello que es imperante realizar la evaluación de la estabilidad de manera que se garantice con ello la seguridad de los usuarios (Bernal, 2022).

Aún con el avance de tecnologías, la toma de datos directamente en campo en taludes rocosos es de suma importancia para su posterior uso en el análisis cinemático. Es por ello que la observación geomecánica es tan importante pues reúne todas estas observaciones necesarias para caracterizar el talud (Jordá et al., 2017).

Existen varias metodologías para el análisis que se basan en las características tanto físicas como mecánicas de las rocas, los mismos que son empleados para alcanzar una mejor caracterización (Cervantes, 2003). Se usó fotogrametría principalmente para determinar algunos atributos geométricos de los taludes en zonas altas que suponen un desafío en campo (Harrison, 1993).

La fotogrametría es una metodología que sigue desarrollándose actualmente y mediante imágenes digitales obtenidas en los sitios de estudio desde varios ángulos de observación, se han procesado con el uso de un software que supone un gasto menor comparado con otras técnicas de procesamiento. Mediante esta técnica se pretende combinar la observación en campo y posteriormente el análisis cinemático para establecer cuán estables son los macizos rocosos estudiados.

El objetivo general de este estudio es evaluar la estabilidad de los macizos rocosos mediante técnicas de mapeo y procesamiento para la determinación de los beneficios de cada una de las metodologías aplicadas.

El área de estudio se encuentra ubicado en la parte andina al sur de Ecuador, provincia del Azuay; se trata de la vía Cuenca – Sayausí – Molleturo, en el parque Nacional Cajas, específicamente en las abscisas 28+060 – 33+200 (See Fig.1).

Esta zona se encuentra dentro del páramo andino ecuatoriano, sobre la cordillera occidental de Los Andes, por lo que su clima es frío y húmedo, con precipitaciones medias anuales de 1106 mm y una temperatura media de 5.78° C (Ministerio del ambiente Ecuador, 2018).

Los taludes están ubicados dentro de la Formación Tarqui (PT). Esta Formación se constituye principalmente de depósitos de caída volcanoclásticos primarios pobremente consolidados y profundamente alterados, la sedimentación tomó lugar en un ambiente volcánico durante una fuerte fase eruptiva y depósitos de caída cubrieron por completo el área, se estima que el espesor es de máximo 300 m (Steinmann, 1997).

En este trabajo se usa un proceso relativamente nuevo para determinar características de los taludes de forma remota y que de otra manera son muy peligrosos de obtener directamente en campo, para determinar valores que permitan conocer cuan estables son los taludes estudiados sin alterar el entorno frágil de la zona. Para ello se han instalado estaciones geomecánicas para realizar la caracterización del macizo y obtener

las propiedades del mismo, consecuentemente la información se ha procesado en oficina con el fin de validarla.

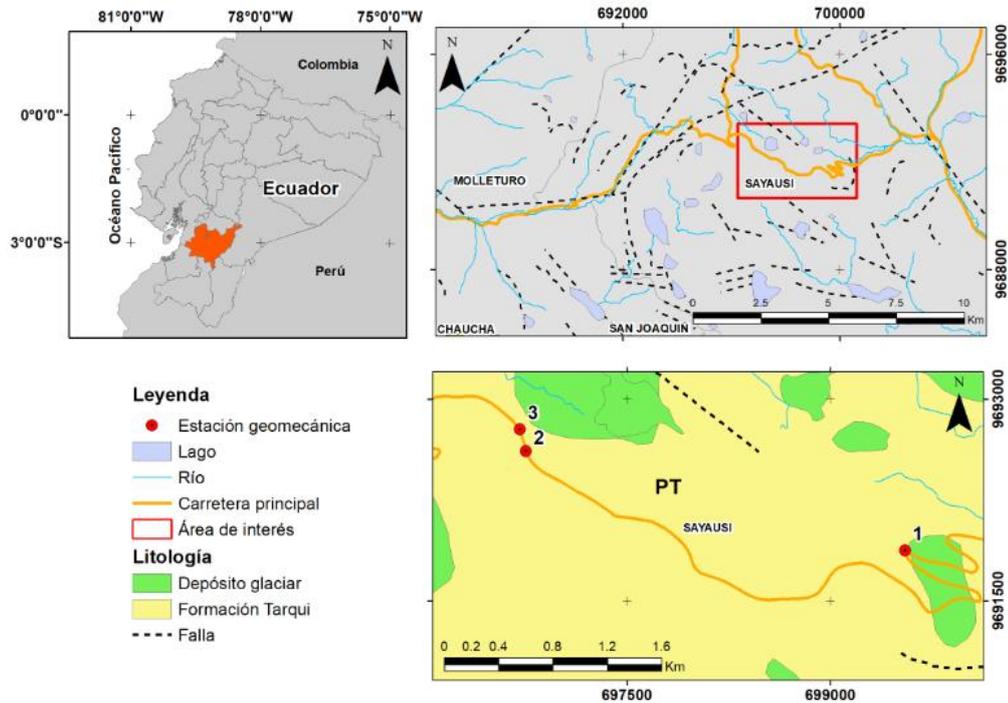


Fig. 1. Aspectos generales del área de estudio. (a) Localización del área de estudio. (b) Área analizada con los lineamientos estructurales principales. (c) Mapa geológico del área de estudio: Formación Tarqui (PT), Depósito Glaciar.

1.1 Información recolectada en Campo

Los taludes en materiales rocosos poseen roturas que deben estudiarse de manera sistemática pues están gobernados por planos de debilidad que inciden directamente en su estabilidad (Mira et al., 2013; Puell, 2003). Las caras del talud que están en contacto con la superficie son las más propensas a mostrar afección a procesos geológicos y climáticos, lo cual modifica gradualmente su relieve (Alonso Chaves et al., 2008).

Por lo general la información se obtiene directamente en campo usando estaciones geomecánicas implantadas en los sitios de análisis. Sin embargo, en el presente se hace uso de técnicas remotas tales como fotogrametría que permite realizar una caracterización más segura para el ingeniero en campo, usando los resultados como complemento a lo observado directamente en campo.

El macizo del Cajas posee una topografía bastante irregular, con alturas que van desde los 3160 msnm (zona Llaviucu) hasta los 4500 msnm (cerro Arquitectos) con vastas llanuras y valles (Prado, 2009).

Las campañas de campo se realizaron en abril del 2023, en la temporada lluviosa de la Sierra Ecuatoriana. Mediante libreta de campo se levantó toda la información importante para la caracterización de cada uno de los taludes (rugosidad, persistencia, geometría del talud, orientación, etc.) y se obtuvieron también las mediciones de orientación de las discontinuidades.

En cuanto a la resistencia a la compresión simple, se estimó mediante martillo de geólogo (Barton, 1978).

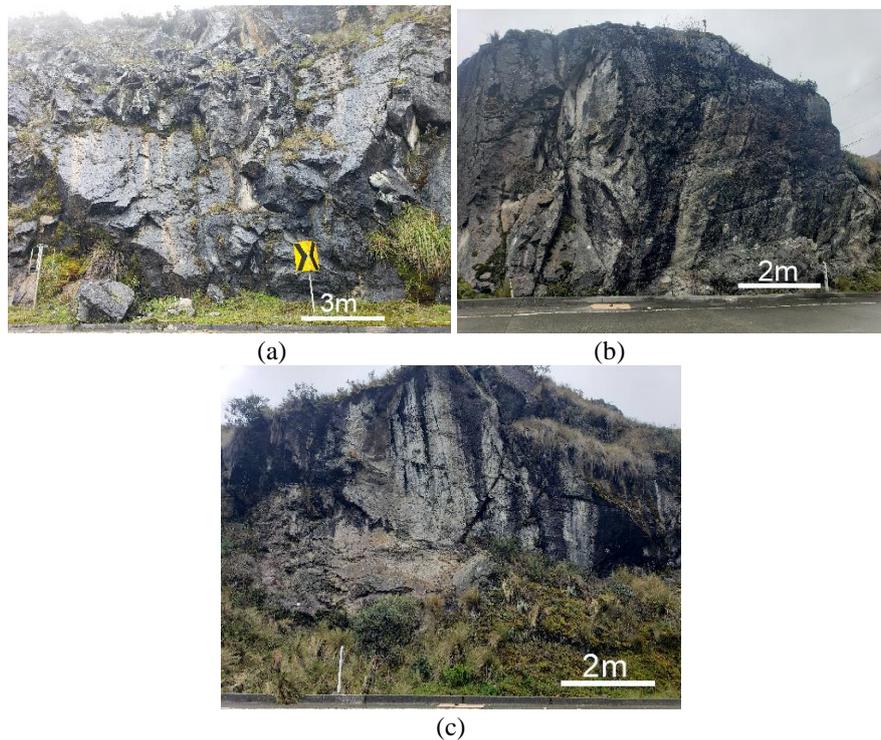


Fig. 2. Vista general de los taludes analizados. (a) Talud 1. (b) Talud 2. (c) Talud 3.

Tabla 1. Información general de los taludes.

Talud	Ubicación	Coordenadas (WGS 84)		Altura (m)	DIP Talud (°)	Tipo de talud
		East	North			
1	28+060	699542	9691876	12	78	Excavado
2	33+020	696756	9692613	6.8	68	Excavado
3	33+200	696710	9692774	7.5	77	Excavado

Las herramientas tecnológicas para la adquisición y procesamiento de los datos obtenidos en campo son muy variadas: fotogrametría, estructura a partir de movimiento, evaluación de nubes de puntos y reconstrucción 3D, que se utilizan para obtener datos

importantes como la geometría, la ubicación, la superficie o el análisis cinemático (Lato et al., 2013).

Para crear la nube de puntos 3D se usaron fotografías obtenidas de cada uno de los taludes rocosos con una cámara de celular, lo cual complementa la información obtenida con la observación directa.

El tipo de cámara no es un asunto importante, siempre y cuando se tengan imágenes nítidas que ayuden al software a generar una nube más densa, esta metodología rápida y de bajo costo no implica tener imágenes profesionales (Delgado-Reivan et al., 2023).

Este procedimiento permite una mayor seguridad puesto que el contacto físico con el talud puede resultar peligroso, costoso y lento, así como la toma de datos puede ser sagrada por zonas inaccesibles del talud (Tomás et al., 2020).

2 Materiales and Métodos

2.1 Generación de nube de puntos 3D

La detección remota para la modelación de un macizo rocoso a partir de nubes de puntos 3D ha tenido un auge con el avance tecnológico (Riquelme et al., 2016) y a su vez ha incidido en las estrategias de tomas de datos indirectas en cuanto a taludes con pendientes rocosas de difícil acceso.

Para el procesamiento de las fotografías obtenidas en campo se ha utilizado el Software Agisoft Metashape Version 1.7.3 Demo. El número de fotografías en cada talud varían, teniendo en cuenta que debe tratarse de una cantidad considerable para obtener un mejor resultado.

Se recomienda que las imágenes con calidad menor a 0.5 se descarten del procesamiento fotogramétrico puesto que disminuyen la eficacia de la cobertura para la escena a reconstruirse (Agisoft, 2018).

Una vez obtenidas las imágenes procesadas con Agisoft, se tienen archivos que son exportados a continuación, los archivos se cargan en el Software Cloud Compare versión 2.12.4, que es una aplicación de manejo y comparación de nubes de puntos 3D (Cloud Compare, 2016; Girardeau-Montaut, 2016) para así obtener parámetros del talud que son de difícil acceso en campo.

Este proceso se realizó para cada uno de los taludes, obteniendo un número de puntos y nubes en calidad alta para que sea lo más parecido a la realidad.

Para la toma de datos de dirección de buzamiento y buzamiento se hizo uso de la aplicación Clino, que es una brújula-clinómetro para captura de datos en smartphones. Esta aplicación permite usar un teléfono para realizar mediciones de la orientación de estructuras geológicas del talud en campo (Petroleum Experts, 2023).

Se han tomado mediciones en puntos de los taludes con la aplicación Clino y luego se señalaron puntos específicos en ciertos planos del talud para posteriormente contrastar lo obtenido y corroborar que en efecto la diferencia entre ambas sea máximo de 5° como lo recomendado por Delgado et al. (2023). Después de procesar las imágenes, el resultado fue un modelo en 3D que permite visualizar mejor las características de cada talud, sobre todo las de difícil acceso (**Fig.3**).

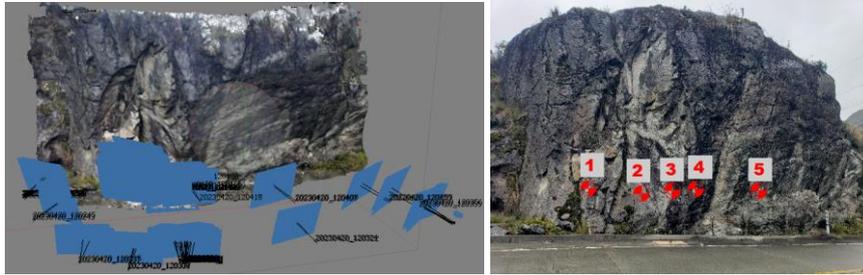


Fig. 3. Talud 2 (a) Nubes de puntos obtenidas con Agisoft. (b) Puntos de control para orientación.

Los taludes han sido estudiados combinando distintas técnicas sin dejar de lado la toma manual de datos en campo, tratándose de un caso de estudio con el que se pretende validar el potencial de la combinación de distintas metodologías para evaluar la estabilidad de un macizo. Si bien es cierto los taludes del presente estudio se encuentran a un costado de la carretera, las metodologías planteadas pueden aplicarse perfectamente en taludes de difícil acceso, este inconveniente puede resolverse mediante el uso de drones o UAV (Vehículos aéreos no tripulados).

El uso de drones combinado con tecnología LiDAR (Airborne Light Detection and Ranging) es una opción perfecta para acceder a taludes de macizo rocoso que por su ubicación o condición de estabilidad suponen un riesgo para ser levantados de forma directa (Mohan et al., 2021; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2019). Aunque el uso de un drone genera ya una fotogrametría, la implementación de tecnología LiDAR permite directamente obtener datos concretos eliminando características como la vegetación para el procesamiento posterior de los parámetros del talud.

Partiendo de esto, la nube de puntos 3D generada mediante esta metodología es mucho más extensa sin embargo es de excelente calidad y resolución (Xu et al., 2022). La aplicabilidad del método se ajusta perfectamente para los fines geotécnicos y la información obtenida no solamente puede usarse para caracterización del macizo sino para obtener otros parámetros dependiendo de la naturaleza del proyecto (Francioni et al., 2019).

2.2 Discontinuidades

Las fracturas presentes en las superficies de los macizos rocosos denominadas comúnmente como discontinuidades, son de importancia al momento de evaluar un talud, sin embargo, son independientes de su número pues aunque sean muchas pueden no representar un riesgo geológico por lo que es importante evaluarlas (Elberg et al., 2011).

Las discontinuidades generan familias que se observan en un talud rocoso y por lo general suelen tener una morfología y orientación semejantes (Alameda, 2014). Para el caso de estudio se usó la data obtenida en campo de forma manual y se comparó con lo obtenido con el software Cloud Compare.

Las orientaciones resultantes de las mediciones se muestran en la **Tabla 2** en las cuales se puede observar la diferencia entre lo observado en campo y lo obtenido con fotogrametría, así como el número de familias presentes en cada talud rocoso.

La obtención de información representativa de las discontinuidades, es determinante en la definición de posibles mecanismos cinemáticos que podría presentar el talud (Migliazza et al., 2021).

Las características de las discontinuidades fueron obtenidas de forma manual en zonas seguras y accesibles de los taludes estudiados. Mediciones en zonas de difícil acceso se realizaron una vez obtenidas las nubes de puntos 3D para mayor seguridad.

A partir de las orientaciones pertenecientes a cada familia de discontinuidades observadas en campo, se obtuvieron estereogramas que representan dichas familias de forma gráfica y que permiten determinar su modo de falla más probable.

2.3 Análisis empírico

Las estructuras presentes en un macizo rocoso ejercen el mayor control sobre su comportamiento, por lo tanto, los sistemas de clasificación relacionan una baja resistencia directamente con macizos rocosos muy fracturados (Carter et al., 2008). Los sistemas de clasificación para los taludes del presente estudio son SMR y Q-Slope que son los más usados en la práctica ingenieril (Pariseau, 2017).

La clasificación RMR comprende la recolección de datos de campo y procesamiento de escritorio posterior, está basado principalmente en información de espaciamiento, condiciones de las juntas, etc. (Siddique et al., 2015). En cuanto a la clasificación RQD, varía en escala logarítmica desde 0.001 hasta un máximo de 1.000 (Hoek, 2000).

Slope Mass Rating (SMR) (Romana, 1985) deriva del Sistema de clasificación dado por RMR (Bieniawski, 1989) se obtiene Slope Mass Rating ajustando factores que dependen de la relación junta-pendiente y del método de excavación aplicado (Romana, 1993; Tomás et al., 2017; Torres, 2008). En la ecuación (1) se tiene la ecuación del SMR junto con los factores de corrección que tienen en cuenta aspectos de tipo de excavación y las orientaciones.

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

Clasificación Qslope es una clasificación de macizo rocoso desarrollada recientemente que es específica para pendientes rocosas (Barton and Bar, 2015). Utiliza seis parámetros: RQD, J_n , J_r , J_a , son los mismos que en el índice Q pero introduce un factor corrector denominado factor O que depende de la estabilidad aparente del talud, los factores J_w y SRF del sistema Q ahora se denominan J_{wice} que incluye otros aspectos y SRF que se obtiene de tres formas diferentes tomando siempre la más desfavorable entre ellas (Barton and Bar, 2015).

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

Según Delgado et al. (2023) no está por demás realizar el cálculo para determinar el ángulo de máxima pendiente en el que el talud puede considerarse con una pendiente estable.

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

Tanto el método SMR como Qslope son ampliamente utilizados en el campo de la geotecnia, el método SMR permite realizar una definición cuantitativa de cada uno de los factores de corrección lo cual supone una ventaja sobre otros métodos. Por otro lado, una desventaja que presenta el método es que los macizos rocosos de muy mala calidad deben tratarse con mucho más cuidado pues su precisión varía con la experticia.

La principal ventaja del sistema Qslope es haber sido determinado a partir de un gran número de casos históricos y en distintos lugares estudiados, pero ignora ciertas características como el modo de excavación de los macizos rocosos y no considera características como la orientación de las discontinuidades.

Aunque individualmente ambas metodologías presentan limitaciones, combinándolos pueden generar resultados muy concretos que de hecho se complementan bastante bien (Azarafza et al., 2022).

2.4 Análisis Cinemático

Generalmente el análisis cinemático se realiza en taludes en los que las discontinuidades inducen el movimiento de bloques, pudiendo ser la falla de tipo plana, en cuña o volcamiento dependiendo de las condiciones que se presenten en el macizo rocoso.

Las diferentes estructuras geológicas presentes en un macizo rocoso afectan a su calidad y estabilidad (Pantelidis, 2009). Sin embargo, son las discontinuidades las que gobiernan su estabilidad por lo que a partir del análisis cinemático se puede determinar esto junto con la calidad del macizo rocoso (Rusydny et al., 2019).

El análisis cinemático es muy útil para determinar los sitios que están propensos a fallar acorde a sus direcciones y a las juntas que posee (Kumar and Kumar Pandey, 2021) así como para determinar el mecanismo de falla mediante una relación entre la geología estructural y las condiciones de estabilidad (C Wyllie and W Mah, 2005). Las relaciones angulares entre las discontinuidades y el buzamiento de las formaciones rocosas se aplican para determinar el potencial de falla y su tipo (Kliche, 1999).

En el presente se realizó el análisis cinemático usando los datos recolectados en campo mediante el Software DIPS Versión 6.008 perteneciente a la casa Rocscience Inc., (Rocscience, 2023). Las orientaciones de las discontinuidades se pueden representar en un estereograma en forma de grandes círculos, polos o vectores de inmersión. De igual forma las familias de discontinuidades fueron identificadas en campo junto con sus características de dirección de buzamiento/buzamiento.

Para aplicar los criterios de (Barton and Bandis, 1990) fue necesario asumir algunos parámetros a partir de la literatura teniendo en cuenta la litología del sitio de estudio (Jordá-Bordehore et al., 2021), el ángulo de fricción básico $\phi_b = 30^\circ$ (Wallace et al., 1970) se adoptó pues no se realizaron ensayos tilt test ni con martillo Schmidt que permitan calcularlo, peso específico de la roca 0.028 MPa (Vutukuri et al., 1978) y el coeficiente de rugosidad JRC = 8 (Barton and Choubey, 1977) asumido para todos los taludes. La resistencia de la roca se obtuvo por aproximación con un martillo de geólogo como se mencionó anteriormente.

El ángulo ϕ_r se obtuvo a partir de la relación de Barton-Choubey (Barton and Choubey, 1977), tomando como rango 26 a 31 grados (Delgado et al, 2023).

3 Resultados

3.1 Análisis de las discontinuidades

Una vez procesada la nube de puntos con el Software, se identificaron entre 2 a 3 familias (**Fig. 4**) que se han usado para su análisis. Se vio necesario realizar un análisis manual de las discontinuidades y para ello en el modelo 3D generado con el software (junto con lo obtenido en campo con la brújula digital) se midieron entre 148 y 200 planos en cada uno de los taludes. En el talud número 3 se identificaron únicamente 2 familias de discontinuidades.

La **Tabla 2** presenta las familias de cada uno de los taludes así como también el número de mediciones realizadas a partir de la nube de puntos 3D de forma manual con el soporte del Software Cloud Compare.

Tabla 2. Orientaciones de las discontinuidades obtenidas combinando las mediciones manuales realizadas con la aplicación Clino en campo y la brújula virtual de Cloud Compare.

Talud N°	Sets de juntas identificadas (Orientación DipDir/Dip)			Número de Mediciones
	J1	J2	J3	
1	099/77	247/82	034/58	148
2	134/84	068/73	315/87	165
3	099/74	258/72	N.I.	200

Las mediciones realizadas con la aplicación para celular Clino y lo obtenido con el Software Cloud Compare varían entre sí en un máximo de 8°, teniendo en cuenta que en campo se tomaron varias medidas de los mismos planos para disminuir errores de ejecución.

Así también, como se mencionó en la Sección 2.2, los puntos de control ubicados en cada talud permiten disminuir el sesgo entre mediciones de campo y las realizadas en gabinete.

3.2 Sistemas de clasificación del macizo rocoso

Los tres taludes fueron clasificados mediante los sistemas SMR y Qslope, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

Slope Mass Rating (SMR). El valor de RMR básico obtenido para cada talud indica que su calidad va desde mala a media, con valores que van desde 33 a 53.

En cuanto al SMR, una vez aplicados los factores de corrección se han obtenido calidades que van desde Muy Mala a Normal para los 3 taludes. Tomando en cuenta las orientaciones de las discontinuidades se determinó el posible método de falla que podría presentarse en cada talud. En la **Tabla 3** se muestran los resultados obtenidos para determinar el SMR.

Tabla 3. SMR obtenido y factores de corrección para cada talud.

Talud N°	RQD	UCS (MPa)	RMR	Rotura (Familia)	Factores de corrección				SMR	Estabilidad
					F1	F2	F3	F4		
1	90 - 100	50	53	Planar (J1)	0.7	1	-50	8	26	Inestable
				Cuña (J1 – J3)	0.15	1	-60	8	51.8	Parcialmente estable
				Vuelco (J1)	0.15	1	-25	8	57	Parcialmente estable
				Vuelco (J2)	0.15	1	-25	8	57	Parcialmente estable
2	70 - 80	40	33	Planar (J2)	0.15	1	-6	8	39	Inestable
				Cuña (J1 – J3)	0.15	1	-25	8	40.5	Parcialmente estable
				Vuelco (J1)	0.15	1	-25	8	37	Inestable
3	90 - 100	50	37	Planar (J1)	0.15	1	-50	8	38	Inestable
				Planar (J2)	0.7	1	-50	8	10	Completamente inestable
				Cuña (J1 – J2)	0.15	1	-25	8	41	Parcialmente estable

Qslope. De la misma forma como se realizó para el Sistema SMR, también fue analizado el índice Qslope para cada talud en estudio. De forma preliminar se tiene roca competente pero que sin embargo puede presentar ciertos riesgos en cuanto a estabilidad.

El ambiente en el que se ubican los taludes es húmedo y presenta bajas temperatura, por lo que presentan diversos grados de alteración. La rugosidad varía entre plana e irregular a nivel macroscópico y rugosa e irregular. Estando los taludes ubicados en una carretera, se ajustan bien a la metodología de clasificación Qslope.

Los resultados obtenidos mediante este Sistema muestran que el talud 2 se encuentra en el límite entre estable e incierto, sin embargo los taludes 1 y 3 pueden considerarse estables (**Tabla 4**).

Tabla 4. Parámetros base y cálculo de Qslope para cada talud.

Talud N°	RQD	Jn	Jr	Ja	OFactor	Jwice	SRF	Qslope	β (°)	Estabilidad
1	91	12	4	1	0.75	0.5	15	0.76	63	Estable
2	77	12	4	4	0.75	0.5	15	0.16	49	Transición
3	91	6	1.5	7	1	0.6	5	0.39	57	Estable

Los resultados obtenidos con el Sistema Qslope difiere un tanto con lo determinado con el Sistema SMR pues los taludes resultan ser estables en su mayoría según el método Qslope. El Sistema Qslope ignora ciertas características como por ejemplo el modo de excavación de los macizos rocosos; lo cual podría ser la causa de la diferencia de resultados tal como lo mencionado por Delgado et al. (2023).

3.3 Análisis cinemático

Siendo el análisis cinemático un método utilizado para analizar el potencial de los diversos modos de fallas en el talud, se tomaron en cuenta tres tipos de falla: planar, cuña y vuelco por flexión.

Los resultados se obtuvieron de forma gráfica mediante estereogramas en los que se muestran los planos en función de sus orientaciones en términos de dirección de inclinación (DipDir) y Buzamiento (Dip).

En la **Tabla 5** se presentan en porcentajes para cada talud y sus familias, los resultados de los análisis para las diferentes mediciones estructurales. Este porcentaje representa la proporción de mediciones estructurales que tienen alto riesgo de falla cinemática (planar, cuña o vuelco por flexión).

Tabla 5. Resultados de análisis cinemático y su porcentaje de planos críticos.

Talud N°	Tipo de falla	Set de discontinuidad	Estabilidad	% de planos críticos
1	Planar	J1	Inestable	44
	Vuelco por flexión	-	Estable	-
	Cuña	J1 – J2	Inestable	36.5
2	Planar	-	Estable	-
	Vuelco por flexión	J2	Inestable	96.43
	Cuña	-	Estable	-
3	Planar	-	Estable	-
	Vuelco por flexión	J1	Inestable	12.5
	Cuña	-	Estable	-

En la **Fig. 4** se muestran los estereogramas de las discontinuidades con sus respectivas familias, se aprecia mayor concentración de puntos en las familias J1 y J2 para el Talud 1, mientras que en el caso del Talud 2 la familia J2 es más prominente, en el Talud 3 la familia que predomina es J1.

Mientras que en la **Fig. 5** se muestran los resultados para cada mecanismo de falla que podría presentarse en los distintos taludes, para el Talud 1 el modo de falla más probable son el tipo planar y por cuña, en el caso de los taludes 2 y 3 es posible una falla de vuelco por flexión.

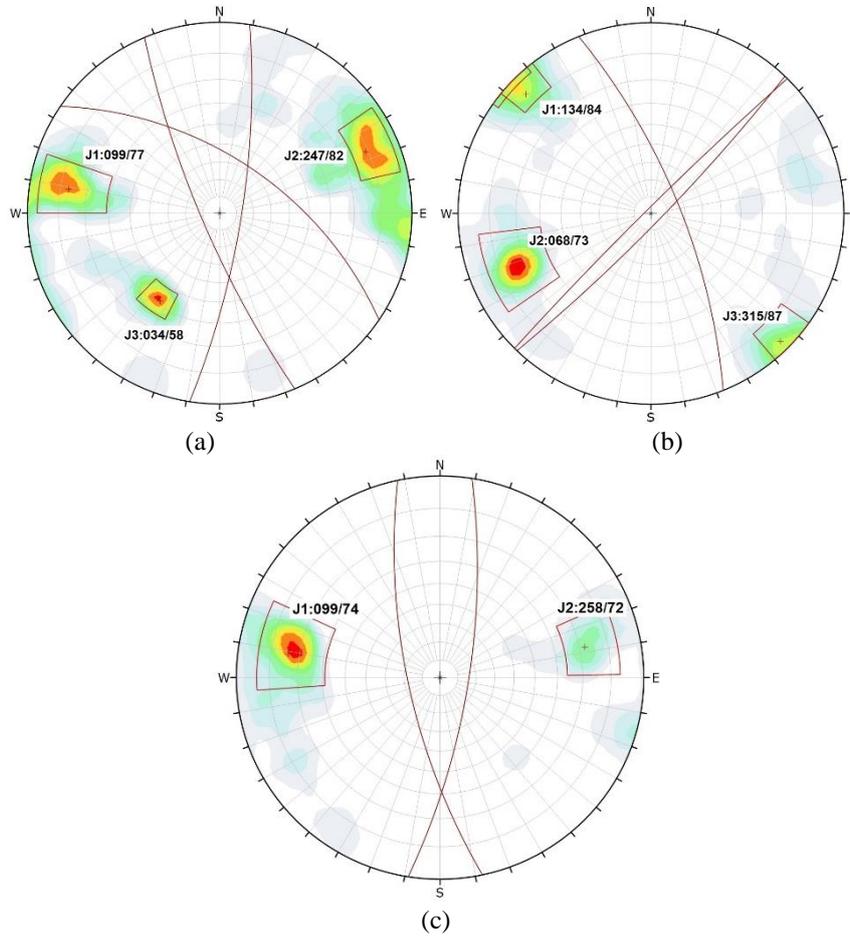


Fig. 4. Familias de discontinuidades en cada talud: (a) Talud 1; (b) Talud 2; (c) Talud 3.

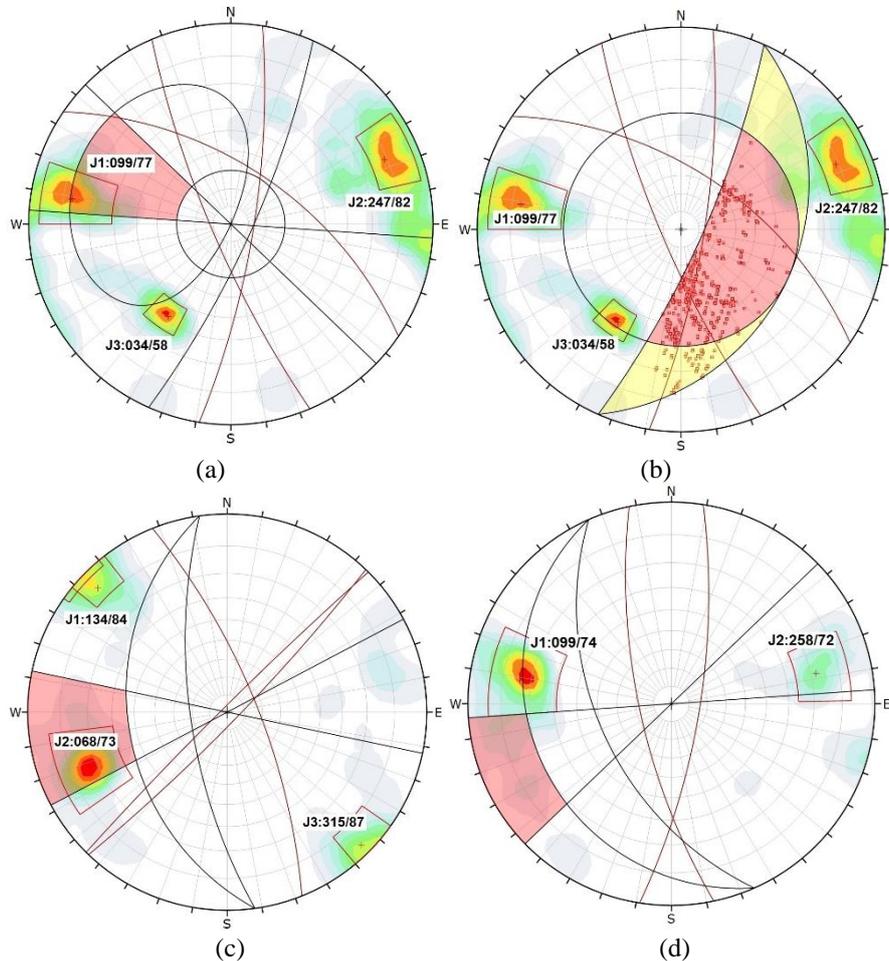


Fig. 5. Análisis cinemático: (a) Talud 1, posible falla planar J1; (b) Talud 1, posible falla por cuña J1 –J2; (c) Talud 2, posible falla de vuelco por flexión J2; (d) Talud 3, posible vuelco por flexión J1 (aunque el porcentaje es bajo se ha considerado).

3.4 Visualización de los taludes en el metaverso

En los informes y trabajos de investigación es posible replica el experimento utilizando los parámetros de geometría y geotecnia que se presentan en la parte metodológica y de resultados del trabajo. En este estudio vamos un paso más allá y se ha incluido los resultados a un repositorio de imágenes 3D en la red. Este repositorio se puede ver en modo semi – inmersivo a través de la realidad virtual con la ayuda de visores VR. En la **Tabla 6** se adjuntan los enlaces a de acceso a los tres taludes en el repositorio 3D.

Tabla 6. Escaneo y visualización de taludes.

Talud N°	Enlace www	Código QR
1	https://sketchfab.com/3d-models/talud-1-1d94292e7d8c4828832190167a8d984f	
2	https://sketchfab.com/3d-models/talud-2-4683ef56d7eb44b99034b57a02951de3	
3	https://sketchfab.com/3d-models/talud-3-692c9f0a5f594aa8aafdf2d9baefa7b5	

Con el avance tecnológico se ha visto un auge en la aplicación de herramientas que permiten visualizar mejor áreas y problemáticas que antes suponían un verdadero reto en la geotecnia. Tal es el caso del levantamiento de información en las que la observación directa incide directamente sobre los resultados a obtenerse.

La información digitalizada mediante modelación generada en campo es una forma económica de contar con datos importantes al alcance de la mano y que además permiten corroborar información geotécnica levantada manualmente con la recolectada con medios digitales (Yang et al., 2022). Actualmente los ingenieros geotécnicos, geólogos y de campo realizan el levantamiento de información de forma manual, no obstante, el tiempo que se requiere en campo puede verse optimizado con el uso de herramientas como la fotogrametría y la realidad virtual pues permiten visualizar el talud en escala real, es así que muy probablemente en unos años ya se puedan realizar análisis preliminares directamente en campo con el uso de modelos digitales generados in situ (Yang et al., 2022).

Precisamente este tipo de interpretación es un aporte significativo para la ingeniería geotécnica puesto que no solo permite visualizar el talud en escala real, recopilar y

validar información sino incluso corregir datos mediante la medición y toma de datos en un modelo fiel a las condiciones actuales del macizo.



Fig. 6. Los resultados pueden analizarse en la web y de forma semi – inversa utilizando gafas de realidad virtual.

4 Discusión

Con la finalidad de combinar distintas metodologías se tomaron campañas de levantamientos mediante estaciones geomecánicas que permitan analizar la estabilidad de los taludes de macizo rocoso en ciertos tramos de la vía en estudio.

El trabajo de campo se combinó con el trabajo de oficina mediante el procesamiento de fotografías en el Software, lo cual dio como resultado la nube de puntos base para la medición y toma de características en partes de los taludes que son de difícil acceso en campo. Al realizar la medición de orientaciones (DipDir/Dip) mediante puntos de control tanto en campo con la aplicación para Android Clino como en el Software Cloud Compare, el error obtenido fue menor a 10° , lo cual subjetivamente en el presente trabajo se ha tomado como aceptable.

Partiendo del análisis realizado en el talud 1, se determina una posible falla planar causada por la familia J1 y esta misma familia podría causar incluso una falla por cuña en la intersección con la familia de discontinuidades J2. La metodología SMR da como resultado una posible falla planar en J1 y J2, mientras que por cuña y volteo entre estas dos familias son parcialmente estables. Sin embargo, mediante la metodología de Qslope el talud es estable, esto puede justificarse pues en este método no se consideran algunos aspectos como en la metodología SMR. En el caso del talud 2, este tiene el ángulo de buzamiento menor de los taludes estudiados, al igual que el talud 1, presenta falla planar en su familia de juntas J2, así como también vuelco por flexión en su familia

J1, sin embargo, no presenta falla por cuña y en cuanto al análisis realizado con metodología Qslope, esta no fue concluyente al encontrarse en la zona de transición. El caso del talud 2 es la muestra de que es importante cotejar los análisis mediante distintas metodologías puesto que los resultados pueden no ser concluyentes.

Para el talud 3, se determinaron dos tipos de falla posible, la primera de tipo planar en las juntas J1 y J2 (es decir en las dos familias encontradas en su estructura) y el segundo tipo de falla que corresponde a vuelco por flexión también en J1. Se ha considerado que la familia de juntas J1 podría sufrir falla por vuelco por flexión en el caso del talud 3, sin embargo, su porcentaje de planos críticos (12.5%) es relativamente más bajo que en los otros taludes analizados.

El método SMR da como resultado que para ciertas condiciones de falla los taludes son parcialmente estables, esto podría considerarse favorable, sin embargo, analizando estos con las otras dos metodologías permite corroborar que efectivamente los taludes son Inestables o Estables de una manera más concluyente. De manera que se visibilice la importancia de combinar diferentes métodos de análisis y así determinar la estabilidad junto con el modo de falla que se podría presentar. Todos los resultados obtenidos han sido contrastados entre sí, a partir de esto se observa que lo obtenido con SRM y el análisis cinemático son relativamente similares, no obstante, el método Qslope arroja resultados diferentes e incluso no concluyentes en comparación a lo determinado con las demás metodologías. La diferencia de estabilidad entre el análisis SMR y el cinemático con el análisis Qslope, podría justificarse debido a que los taludes estudiados no son taludes nuevos o recientemente excavados, teniendo en cuenta que la metodología Qslope fue concebida justamente para taludes nuevos. En la **Tabla 7** se muestra un resumen de los resultados de estabilidad determinados para cada talud, así como la estabilidad observada en campo de forma visual.

Tabla 7. Resumen de resultados de estabilidad para los taludes estudiados.

Talud	SMR	Qslope	Cinemático	Visual
1	Inestable	Estable	Inestable	Inestable
2	Inestable	Transición	Inestable	Estable
3	Inestable	Estable	Inestable	Inestable

A pesar de que las herramientas de teledetección permiten mejorar la calidad de análisis y clasificación del macizo, deben tenerse en cuenta las condiciones de ubicación de los taludes en donde va a implementarse.

El caso de estudio presentado por (Kong et al., 2021) muestra la generación de nubes de puntos 3D mediante fotogrametría en China y España, pero no es generada con fotografías sino con implementación de UAV (vehículo aéreo no tripulado, siglas en inglés) lo cual es de utilidad en zonas de difícil acceso como zonas de alta pendiente en

los macizos, los resultados obtenidos con esta metodología una cantidad mucho más extensa de puntos obtenidos.

Así también (Grechi et al., 2021) menciona que la fotogrametría no solamente puede implementarse para taludes de carretera sino también en otros casos de ingeniería civil como el análisis de canteras, pero el método para la adquisición de la nube de puntos no son fotografías en campo ni drones sino a partir de imágenes ópticas RGB e información térmica infrarroja. Mediante información térmica determina zonas en los bloques de los macizos rocosos que contienen discontinuidades y que presentan mayor tendencia a la falla, los cuales contrastan con la temperatura del macizo.

Existen varios estudios en la bibliografía en los que se implementan distintos métodos para generar la fotogrametría y la posterior nube de puntos (Francioni et al., 2021; Kong et al., 2020; Loiotine et al., 2019). Desde el enfoque del presente estudio es importante el resaltar lo económico que resulta realizar la toma de fotos digitales únicamente con el uso del celular o cámara digital estándar, lo cual resulta en una ventaja y disminución de tiempo además del costo.

Toda esta literatura difiere en la metodología de obtención de la nube de puntos 3D, sin embargo, su procesamiento y análisis de resultados implementan metodologías parecidas o iguales, como la estereográfica o métodos empíricos como los presentados en este trabajo.

5 Conclusiones

En el presente trabajo, se han combinado distintas metodologías de toma de datos y de análisis de estabilidad en los macizos rocosos. La toma de datos manual en campo sigue siendo parte fundamental en análisis de este tipo, ciertamente una aplicación de celular jamás reemplazará la medición manual realizada con una brújula tradicional, pero a manera de ir a la par con los avances tecnológicos, el realizar las mediciones de dirección y buzamiento de los taludes, así como de sus discontinuidades representa un menor gasto de recursos.

Lo anterior, conjugado con fotogrametría para realizar mediciones remotas en zonas de difícil acceso supone no solo una disminución del factor económico y un plus en cuanto a la seguridad para un ingeniero de campo, sino también de preservación en zonas como el Cajas, en donde no se permite perturbar la fauna y paisaje de la zona al ser un área protegida. En estas zonas resulta de gran ayuda la implementación de drones para el levantamiento de la información.

En los tres taludes se aplicaron las tres metodologías de análisis de estabilidad, sin embargo, el método Qslope al no considerar características como la orientación de las discontinuidades, produjo resultados un tanto diferentes e incluso no concluyentes (caso del Talud 2) por lo que se recomienda siempre realizar el análisis combinando distintas metodologías para tener una visión más clara y apegada a la realidad.

Tomando en cuenta los resultados podría considerarse que los tres taludes son susceptibles a distintos tipos de falla, siendo los tres taludes propensos a falla planar, el Talud 2 a vuelco por flexión en su familia J1 y en el caso del Talud 3 también lo es a falla por cuña.

De la misma forma, el combinar diferentes metodologías para el análisis de estabilidad de un macizo rocoso sin realizar un análisis de equilibrio límite puede parecer inconclusa, empero resulta de gran ayuda al momento de tener una visión más puntual en cuanto a estado preliminar de los mecanismos de falla en un talud.

Agradecimientos

Este trabajo es un Proyecto de titulación del programa de maestría en geotecnia de la Facultad en Ciencias de la Tierra de ESPOL, Universidad Politécnica en Guayaquil, Ecuador. El autor quiere agradecer el apoyo de su tutor Dr. Luis Jordá por su ayuda desinteresada a pesar de la diferencia de horario, a sus cotutores por la ayuda brindada. A mi esposo por su apoyo en todo este tiempo y a mi mamá por no dejarme sola durante.

Referencias

- Agisoft. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.4*.
- Alameda, P. M. (2014). *Aplicación de nuevas metodologías de adquisición de datos para el análisis de estabilidad de taludes : casos de estudio en materiales foliados de la Cordillera Bética*. Editorial de la Universidad de Granada.
- Alonso Chaves, F., García-Navarro, E., & Camacho EM^a Mantero, M. (2008). *Análisis de los tipos de inestabilidades del macizo rocoso de La Virgen de la Peña (Huelva, España) Analysis of the instabilities types in the Rock Massif of Virgen de la Peña (Huelva, Spain)*.
- Azarafza, M., Koçkar, M. K., & Zhu, H. H. (2022). Correlations of SMR-Qslope Data in Stability Classification of Discontinuous Rock Slope: A Modified Relationship Considering the Iranian Data. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(4), 1751–1764. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01991-w>
- Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description masses: International Society for Rock Mechanics. *International Journal Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15, 319–368.
- Barton, N., & Bandis, S. (1990). Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice. *Proc International Symposium on Rock Joints*.
- Barton, N., & Bar, N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. *ISRM Regional Symposium, EUROCK*, 157–162.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. In *Rock Mechanics* (Vol. 10).
- 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*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications_ A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering* (1st ed.).

- Buyer, A., Aichinger, S., & Schubert, W. (2020). Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization. *Engineering Geology*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105332>
- Carter, T. G., Diederichs, M. S., & Carvalho, J. L. (2008). Application of Modified Hoek-Brown Transition Relationships for Assessing Strength and Post Yield Behavior at Both Ends of the Rock Competence Scale. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 6, 325–335.
- Cerúsico, L. G., & Marcuzzi, J. J. (2011). *Caracterización geotécnica y análisis de la estabilidad de los macizos rocosos del camino de acceso al C° San Bernardo, Ciudad de salta*.
- Cervantes, J. (2003). Clasificación Geomecánica y Análisis de Estabilidad de Taludes del Macizo Rocoso Coris, Cártago, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 28, 125–127.
- Cloud Compare. (2016). *CloudCompare User's Manual for version 2.1*. www.cloudcompare.net
- C Wyllie, D., & W Mah, C. (2005). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (4 th). Taylor & Francis e-Library.
- 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>
- Elberg, M., Vivas, J., Fernández, V., Sosa, G., & González, L. (2011). Análisis numérico de las discontinuidades del macizo rocoso de la autopista Rafael Caldera en Venezuela Numerical analysis of the rock massif's discontinuities of the highway Rafael Caldera in Venezuela. In *Revista Ciencia e Ingeniería* (Vol. 32, Issue 2).
- Francioni, M., Calamita, F., Coggan, J., De Nardis, A., Eyre, M., Miccadei, E., Piacentini, T., Stead, D., & Sciarra, N. (2019). A multi-disciplinary approach to the study of large rock avalanches combining remote sensing, GIS and field surveys: The case of the Scanno landslide, Italy. *Remote Sensing*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/rs11131570>
- Francioni, M., Calamita, F., & Sciarra, N. (2021). The Evolution Of Methods For The Survey And Analysis Of Rock Slopes: A Review. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment, SpecialIssue1*, 87–95. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2021-01.S-08>
- Girardeau-Montaut, D. (2016). *CloudCompare Point Cloud Processing Workshop*. www.cloudcompare.org@CloudCompareGPL
- Grechi, G., Fiorucci, M., Marmoni, G. M., & Martino, S. (2021). 3d thermal monitoring of jointed rock masses through infrared thermography and photogrammetry. *Remote Sensing*, 13(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs13050957>
- Harrison, J. P. (1993). *Improved Analysis of Rock Mass Geometry using Mathematical and Photogrammetric Methods* [PhD Thesis]. University of London.
- Hoek, E. (2000). *Practical Rock Engineering*.
- Jordá-Bordehore, L., Alejano, L., Tomás, R., Loaiza, S. C., García, M. T., Galindo, R., Pérez-Rey, I., Riquelme-Guill, A., Cano, M., Borja-Bernal, C. P., & Medinaceli

- Torrez, R. (2021). Determination of the basic friction angle ϕ_b of joints using the field tilt test: Results of various “fast” tests on outcrops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 833(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012048>
- Jordá, L., Riquelme, A., Cano, M., & Tomás, R. (2017). Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 97, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.06.004>
- Kliche, C. A. (1999). *Rock Slope Stability*. SME.
- Kong, D., Wu, F., & Saroglou, C. (2020). Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds. *Engineering Geology*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105442>
- Kong, D., Wu, F., Saroglou, C., Sha, P., & Li, B. (2021). In-situ block characterization of jointed rock exposures based on a 3D point cloud model. *Remote Sensing*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/rs13132540>
- Kumar, S., & Kumar Pandey, H. (2021). Slope Stability Analysis Based on Rock Mass Rating, Geological Strength Index and Kinematic Analysis in Vindhyan Rock Formation. *Journal of the Geological Society of India*, 97(2), 145–150. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1645-y>
- Lato, M., Kemeny, J., Harrap, R. M., & Bevan, G. (2013). Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry. *Computers and Geosciences*, 50, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.014>
- Loiotine, L., Liso, I. S., Parise, M., & Andriani, G. F. (2019). Optimization of geostructural surveys in rock mass stability analyses using remote sensing techniques. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2019(Special Issue 1), 73–78. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2019-01.S-12>
- Migliazza, M., Carriero, M. T., Lingua, A., Pontoglio, E., & Scavia, C. (2021). Rock mass characterization by UAV and close-range photogrammetry: A multiscale approach applied along the vallone dell’elva road (Italy). *Geosciences (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/geosciences11110436>
- Ministerio del ambiente Ecuador. (2018). *Plan de Manejo del Parque Nacional Cajas*.
- Mira, A., Peyrés, A. A., & Gutiérrez, F. (2013). Caracterización geomecánica y análisis de estabilidad del talud sur del Macizo Rocosó de Monteagudo (Murcia). *Geogaceta*, 54. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4669.3522>
- Mohan, A., Singh, A. K., Kumar, B., & Dwivedi, R. (2021). Review on remote sensing methods for landslide detection using machine and deep learning. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(7). <https://doi.org/10.1002/ett.3998>
- Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.06.003>
- Pariseau, G. (2017). *Design Analysis in Rock Mechanics 3rd Edition*.
- Petroleum Experts. (2023). *FieldMove Clino*.

- Prado, B. (2009). *Creación de un paquete turístico “Camino del Inca, Tramo Parque Nacional Cajas.”* Universidad del Azuay.
- Puell, F. (2003). *Aplicación de criterios de rotura no lineales a la Estabilidad General de Taludes en Macizos Rocosos.*
- Riquelme, A. J., Tomás, R., & Abellán, A. (2016). Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.008>
- Rocscience. (2023). *DIPS User Guide Tutorials.* [https://www.Rocscience.Com/Help/Dips/Tutorials.](https://www.Rocscience.Com/Help/Dips/Tutorials)
- Romana. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*, 49–53.
- Romana, M. R. (1993). A geomechanical classification for slopes: slope mass rating. *Comprehensive Rock Engineering. Vol. 3*, 575–600. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-042066-0.50029-x>
- Rusdy, I., Al-Huda, N., Fahmi, M., & Effendi, N. (2019). Kinematic analysis and rock mass classifications for rock slope failure at USAID highways. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 13(4), 379–398. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2019.08192>
- Siddique, T., Masroor Alam, M., Mondal, M. E. A., & Vishal, V. (2015). Slope mass rating and kinematic analysis of slopes along the national highway-58 near Jonk, Rishikesh, India. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(5), 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.06.007>
- Steinmann, M. (1997). *The Cuenca basin of southern Ecuador tectono-sedimentary history and the Tertiary Andean evolution.* <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001843356>
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., & Ruffo, M. (2020). Evaluation of the stability of rocky slopes using 3D point clouds obtained from an unmanned aerial vehicle. *Revista de Teledeteccion*, 2020(55), 1–15. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>
- Tomás, R., Romana, M., & Serón, J. B. (2017). Review of the Current Status of the Geomechanic Classification Slope Mass Rating (SMR). *Boletín de La Sociedad Española de Mecánica Del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, 190, 25–32.
- Torres, C. (2008). Análisis de estabilidad de taludes en el macizo rocoso de la cantera Palma Sola mediante los sistemas de clasificación geomecánica RMR Rock Mass Rating y SMR Slope Mass Rating. *Geominas*, 36(46).
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D., & Saluja, S. S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks: Vol. III* (Trans Tech Publications, Ed.; First).
- Wallace, G. B., Slebir, E. J., & Anderson, F. A. (1970). Foundation Testing for Auburn Dam. *11 Th Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 461–498.
- Xu, Q., Ye, Z., Liu, Q., Dong, X., Li, W., Fang, S., & Guo, C. (2022). 3D Rock Structure Digital Characterization Using Airborne LiDAR and Unmanned Aerial Vehicle Techniques for Stability Analysis of a Blocky Rock Mass Slope. *Remote Sensing*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/rs14133044>

- Yang, B., Mitelman, A., Elmo, D., & Stead, D. (2022). Why the future of rock mass classification systems requires revisiting their empirical past. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 55(1). <https://doi.org/10.1144/qjegh2021-039>
- Zhang, Y., Yue, P., Zhang, G., Guan, T., Lv, M., & Zhong, D. (2019). Augmented reality mapping of rock mass discontinuities and rockfall susceptibility based on unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Remote Sensing*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/rs11111311>

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 02 de mayo de 2023, la estudiante Tania Gabriela Peralta Quizhpi con número de identificación 0105349831, de la Cohorte 4, presentó la propuesta de su tema de titulación al Comité Académico del programa. Posteriormente, con fecha 22 de mayo de 2023, el Comité revisó y aprobó la propuesta mediante la resolución FICT-CA-GEOTEC-019-2023, cumpliendo con los requisitos establecidos para la aprobación del tema.

A partir de dicha aprobación, la estudiante mantuvo 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, la estudiante presentó y sustentó 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 los taludes de la carretera Cuenca – Sayausí - Molleturo, Puerto Cajas, combinando técnicas remotas y empíricas**", realizado por la estudiante Tania Gabriela Peralta Quizhpi con número de identificación 0105349831, 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,



Firmado electrónicamente por:
DAVIDE BESENZON
VENEGAS

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