

# Análisis de estabilidad de la cueva volcánica El Mirador de los Túneles (Islas Galápagos, Ecuador) combinando métodos empíricos, numéricos, técnicas remotas y realidad virtual

Guido Rodríguez <sup>1</sup>, Maurizio Mulas <sup>1,\*</sup>, Silvia Loaiza <sup>1</sup> and Luis Jordá Bordehore <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador;

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España;

\* Correspondencia: mmulas@espol.edu.ec (M.M.)

**Citation:** Rodríguez, G.; Mulas, M.; Loaiza, S.; Jordá-Bordehore, L. Análisis de estabilidad de la cueva volcánica El Mirador de los Túneles (Islas Galápagos, Ecuador) combinando métodos numéricos, empíricos y técnicas remotas. *Remote Sens.* **2022**, *14*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: First name Last name

Received: date

Accepted: date

Published: date

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Resumen:** El Mirador de los Túneles es una cueva volcánica con forma de tubo y estructura sinuosa que se encuentra en las Islas Galápagos y que se ha formado como resultado del enfriamiento de flujos de lava cercanos a la superficie. Al ser un sitio turístico existe un gran número de personas que frecuenta esta formación natural a diario, sin embargo, las condiciones de seguridad no habían sido definidas por un estudio geotécnico integral. En este trabajo de investigación se ha realizado un análisis de estabilidad combinando metodologías empíricas en base a clasificaciones geomecánicas mediante el Índice Q de Barton y el recientemente creado Índice Geomecánico de Cavidades (CGI), y modelación numérica con el método de elementos finitos. Para la creación de las secciones de cálculo numérico y dimensiones de las diferentes partes críticas de la cueva se ha empleado una modelización tridimensional a través de la técnica remota fotogramétrica Structure from Motion (SfM). Para crear estos entornos de Realidad Virtual se ha aprovechado la fotogrametría y repositorios online (Sketchfab) y para visualizar recorridos el software Cospaces y Fotografía 360<sup>o</sup> (Google Street View y equivalentes). Los resultados del análisis mostraron que lo largo del túnel existen zonas puntuales con indicios de inestabilidad y hundimiento. Los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de los distintos métodos desarrollados lograron complementarse entre sí plasmando una representación ingenieril mucho más precisa y realista del medio ambiente subterráneo. Se presenta un gráfico que recoge las dos metodologías empíricas Índice Q de Barton y CGI añadiendo los Factores de Seguridad (FoS) obtenidos con la modelización.

**Palabras clave:** cueva volcánica, análisis de estabilidad, modelamiento numérico, fotogrametría, Factor de seguridad.

## 1. Introducción

Las investigaciones sobre la estabilidad de túneles de lava son relativamente pocos ya que principalmente los estudios se han centrado sobre cavidades kársticas [1,2]. Los túneles de lava pueden tener un ancho de varios metros y, por lo general, discurren grandes distancias por debajo de la superficie [3]. En general, las cuevas que perduran hasta la actualidad son a menudo las generadas en macizos rocosos de buena a excelente calidad [4]. La mayoría de las cavidades se encuentran en equilibrio, en un estado aparentemente elástico, a pesar de la caída previa de grandes bloques delimitados por discontinuidades [5].

En las islas Galápagos existen numerosos túneles de lava. Charles Darwin fue uno de los primeros en registrar túneles de lava en las Islas Galápagos en 1845 [6]. Estos túneles naturales se forman cuando una capa superior de lava que fluye se enfría y forma una costra mientras la lava fundida debajo de la superficie continúa fluyendo, a medida que

el flujo disminuye la lava se vaciará formando túneles de lava [7]. Debido a que se localizan generalmente a poca profundidad, son habituales en este tipo de cavidades los skylight, que son puntos de los túneles de lava que no han logrado cerrarse completamente [8]. Estas cavidades en algunos casos se sitúan muy cerca del sector urbano.

El área de estudio corresponde a El Mirador de los Túneles, ubicado al sur de Santa Cruz. El túnel alcanza una longitud estimada de 850 m en un sentido NW del área urbana de Puerto Ayora. El sector de Mirador tiene una larga historia de problemas geotécnicos. Se han reportado casos de hundimientos recientes de techos de cuevas en el transcurso de trabajos de construcción [9]. Lastimosamente, a los 90 m de recorrido se encuentra tapado por un relleno [10]. Se ha escogido este túnel de lava por varias razones: tiene una tipología muy común y por tanto representativa, es de fácil acceso para la toma de datos y se presentan riesgos para carreteras y casas.

Considerando las condiciones actuales del interior de la cueva, el objetivo del trabajo de investigación consistió en caracterizar geomecánicamente el interior del túnel de lava. Para esto fue necesario (i) la evaluación de la calidad de la masa rocosa combinando metodologías empíricas en base a clasificaciones geomecánicas; (ii) la modelación numérica del comportamiento geomecánico; y (iii) la aplicación de la técnica de fotogrametría digital SfM (Structure from Motion) para definir la geometría. Además, una de las aportaciones del trabajo es la presentación de resultados empleando Realidad Virtual, para que los análisis puedan ser cotejados por investigadores que no puedan acceder a la zona de estudio, estos recorridos virtuales, con diferentes grados de inmersión pueden ser aprovechados por las autoridades locales para proyectos de divulgación.

Hasta la fecha, solo encontramos pocas publicaciones sobre la geomecánica de las cuevas de Galápagos [4,11,12]. Son trabajos de investigación pioneros en el análisis de la estabilidad de cuevas volcánicas por métodos empíricos.

## 2. Materiales and Métodos

### 2.1 El Mirador de los Túneles (Galápagos, Ecuador)

#### 2.1.1 Contexto Geológico

El archipiélago de Galápagos es el producto de la actividad de hotspots ~1000 km al oeste de América del Sur y 100 km al sur del Centro de Extensión de Galápagos (GSC), una dorsal oceánica que separa las placas de Cocos y Nazca. [13]. El punto caliente de Galápagos representa un proceso de suministro de magma que ha existido durante más de 90 millones de años, mientras que la placa litosférica se ha movido miles de kilómetros en el mismo intervalo de tiempo, llevándose los volcanes generados por el punto caliente [14,15]. Entre las islas del archipiélago de Galápagos, San Cristóbal es la isla más antigua con ~4 millones de años y Fernandina es la isla más joven con ~0,5 millones de años [16].

Las lavas de Santa Cruz se pueden dividir en la serie Plataforma (Platforms serie), que son sedimentos marinos y la serie Escudo (Shield serie) que son flujos de lava basálticos [18]. Las lavas de la serie Plataforma son las más antiguas con una edad de 1,3 a 1,1 millones de años, mientras que las más jóvenes están representadas por la serie Escudo que oscilan entre  $590 \pm 27$  millones de años y  $24 \pm 11$  millones de años [16].

Santa Cruz es una isla con una altura máxima de 950 m sobre el nivel del mar constituida por un volcán escudo de forma elíptica. Los conos volcánicos monogenéticos están alineados a lo largo de la serie de fallas normales E-W, así como los sinkholes de más de 100 m de diámetro [19].

El sector meridional de la isla está caracterizado por la presencia de grandes flujos de lava de tipo "pahoehoe" y de tipo "aa". La presencia de un tipo o del otro está estrictamente relacionado a las variaciones de pendiente y a la viscosidad que tiene el magma en el lugar [20]. Los flujos de tipo pahoehoe están definidos por su alta fluidez y por su superficie lisa y plegada a manera de "cuerda" lo que permite comprender las direcciones principales de movimiento de los flujos. Los flujos de tipo "aa" están caracterizados por superficies

altamente irregulares y fragmentos de rocas muy vesiculares. Ambas tipologías de flujo de lavas pueden generar estructuras en su interior conocidas en bibliografía como túneles de lava (Figura 2a) o túmulos (de forma circular o sinusoidal elongada, con altura del orden del metro) [21].

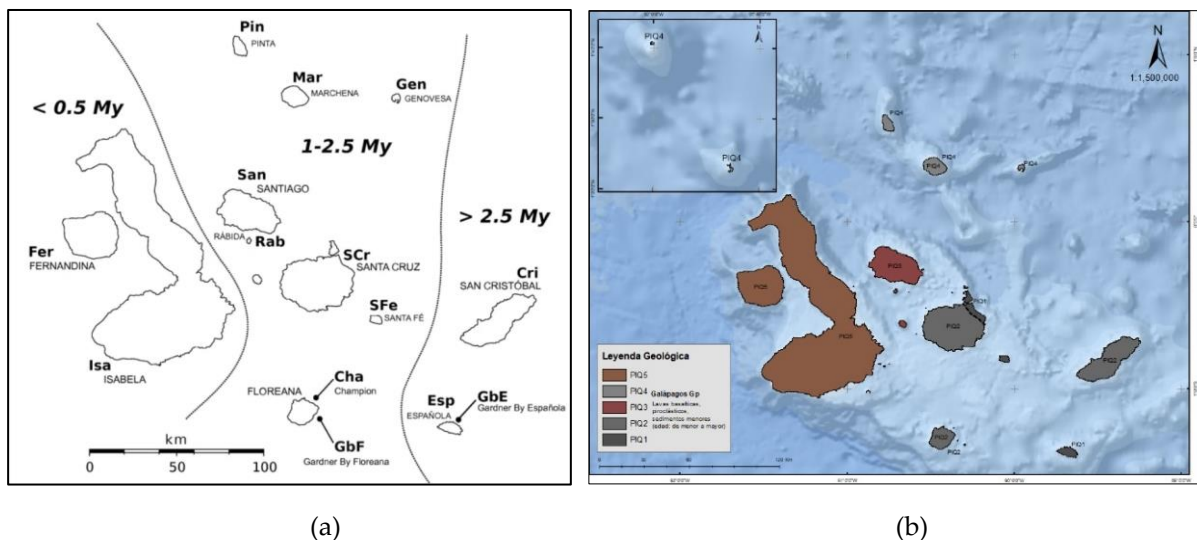


Figura 1. (a) Se proporciona la edad geológica aproximada del archipiélago (My = millones de años). El mapa de Galápagos es tomado de [17]. (b) Mapa geológico de las Islas Galápagos.

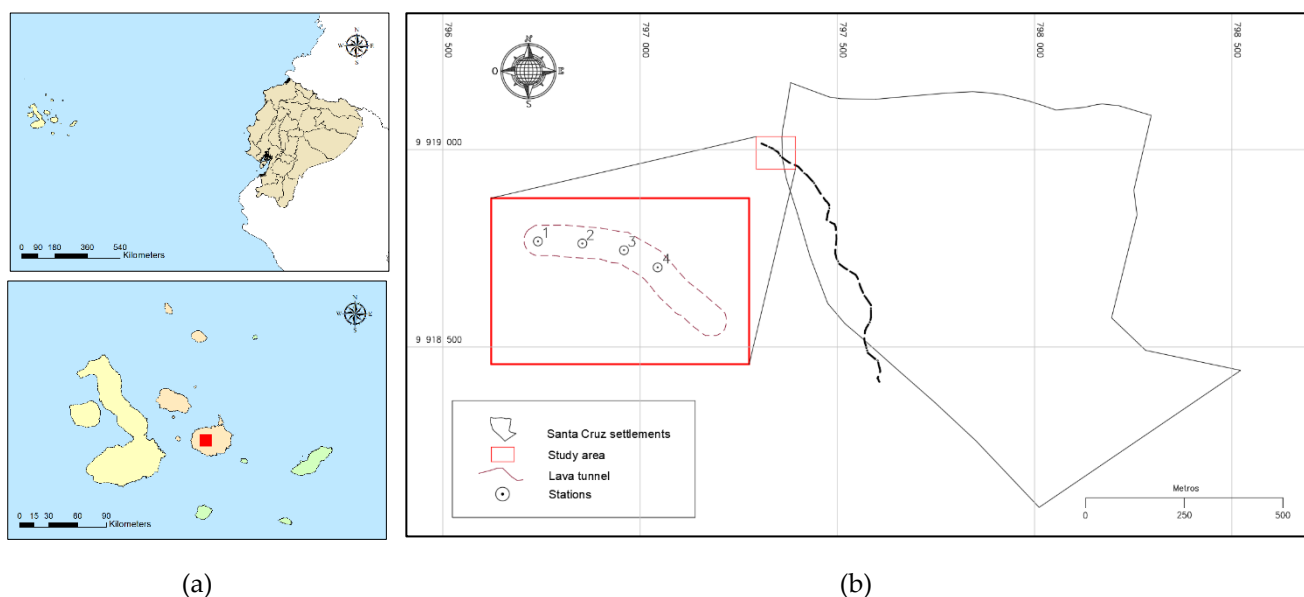
Las lavas del túnel son de composición basálticas caracterizados por su alta vesicularidad ( $\pm 40\%$ ) con vesículas aisladas entre ellas de tamaño medio de 2-3 mm de forma sub-redondeada (Figura 2b). Las muestras son de textura afírica con bajo porcentaje de cristalinidad (2-3%). La matriz aparece localmente meteorizada por procesos de palagonización debido presumiblemente a deposición en substrato húmedo [22].



Figura 2. Túnel de lava El Mirador de los Túneles. (a) Entrada principal. (b) Muestra de lava del sector Mirador.

### 2.1.2 Descripción del sitio

El túnel de lava "El Mirador de los Túneles" se ubica a 1,4 Km al noroeste del poblado de Puerto Ayora (Figura 3b) dentro de la jurisdicción del cantón Santa Cruz, provincia de Galápagos (Figura 3a) a 85 m sobre el nivel del mar. La altura media es de 5,9 m y el ancho de 5,5 m, y en promedio la sección transversal es de 27 m<sup>2</sup> [10].



**Figura 3.** Localización del área de estudio. (a) Islas Galápagos, Ecuador. (b) En color negro, trazo inferido del mapa El Mirador de los Túneles.

El Mirador de los Túneles presenta dos tramos principales. El primer tramo, ubicado cerca de la carretera principal, está abierto al público; y el segundo tramo se desarrolla por debajo del sector urbano, que no es fácilmente visitable.

El tramo turístico presenta sección transversal en forma de maní. En las paredes se presentan estrías (Figura 4a) que representan variaciones del caudal y periodos de estabilidad del flujo. A media altura se observa un principio de formación de techo que se vuelve más marcado en dirección SE. Antes de llegar al sector donde se encuentra el relleno existe una abertura en el techo que no logra cerrarse denominada skylight (Figura 4b). A nivel geotécnico es importante distinguir los skylight de los sinkholes. El tramo del túnel que se encuentra por abajo del sector urbano actualmente puede ser visitado solo en breves tramos, además de que es muy peligroso entrar.



**Figura 4.** Interior del túnel de lava El Mirador de los Túneles. (a) Estrías en las paredes del túnel. (b) Estructura tipo skylight.

## 2.2 Caracterización Geomecánica

### 2.2.1 Clasificaciones geomecánicas

Para evaluar la estabilidad del macizo rocoso, se ha recurrido al empleo de las clasificaciones geomecánicas y al análisis empírico. Esta forma de análisis se lleva aplicando de forma efectiva al diseño de túneles desde la década de 1970s. Las clasificaciones geomecánicas consisten en otorgar calificaciones a varios parámetros claves y obtener un índice (valor numérico) que representa la calidad de una masa rocosa. Pueden ser herramientas de ingeniería muy útiles, no solo porque proporcionan un punto de partida para el diseño del soporte del túnel, sino también porque obligan a los usuarios a examinar las propiedades del macizo rocoso de una manera muy sistemática [23]. Es importante comprender las limitaciones de los esquemas de las clasificaciones geomecánicas [24] y que su uso no reemplaza (ni puede) reemplazar algunos de los procedimientos de diseño más elaborados [23].

Los métodos empíricos de análisis de estabilidad están estrechamente ligados a estas clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos: se basan en el análisis retrospectivo (back-analysis) de numerosos casos prácticos en los cuales se ha analizado la estabilidad de un hueco, mediante una o varias de las clasificaciones [11]. Su utilidad radica en la facilidad de su aplicación y en los buenos resultados conseguidos en muchos casos [25].

En este trabajo se emplearon las clasificaciones geomecánicas más utilizadas actualmente que son el Índice Q [26] y el sistema RMR [27]. Además, se complementó el estudio con el recientemente creado Índice Geomecánico de Cavidades (CGI) [28] lo que permite la comparación y validación de los resultados de calidad de roca.

El CGI se inspiró en la metodología de clasificación geomecánica de Bieniawski [27] con la suma de variables ponderadas según rangos de análisis y cuyo resultado indica la calidad geomecánica del material evaluado. El modelo CGI ha sido implementado en cuevas de hierro cerca de áreas mineras que deben conservar su integridad física de acuerdo con la legislación brasileña vigente [28]. La fórmula CGI se demuestra en la siguiente expresión:

$$CGI = \alpha RMR + \beta HR + \gamma CS + \delta CT$$

Donde:

$\alpha$  RMR = Valor asignado a la clasificación del macizo rocoso






$\beta$  HR = Valor asignado al radio hidráulico

$\gamma$  CS = Valor asignado a la forma del techo

$\delta$  CT = Valor asignado al espesor del techo

Después de haber definido los valores de las cuatro variables del sistema se realiza la suma de las puntuaciones correspondientes. El valor del CGI oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto menor sea la susceptibilidad a la inestabilidad estructural. La Tabla 1 muestra las cinco clases de CGI y sus respectivos niveles de susceptibilidad a la inestabilidad estructural de los vanos.

**Tabla 1.** Clases de CGI y sus niveles de susceptibilidad a la inestabilidad estructural [28].

Susceptibilidad a la inestabilidad estructural	CGI	Color
Muy bajo	81 - 100	
Bajo	61 - 80	
Moderado	41 - 60	
Alto	21 - 40	
Muy alto	0 - 20	

### 2.2.2 Estaciones geomecánicas

Para este estudio se optó por una metodología de análisis basada en la realización de estaciones geomecánicas determinando in situ diversos parámetros geomecánicos, lo que permite estimar el RMR, Índice Q, GSI y otros parámetros de cálculo.

Las estaciones geomecánicas permiten valorar desde el punto de vista geotécnico una cavidad donde tenemos acceso hacia el interior y en muchos casos es inviable o se desaconseja efectuar sondeos y ensayos de laboratorio, ambos destructivos [29]. El número de estaciones y su ubicación dependen de las condiciones favorables del terreno (afloramientos existentes y accesibilidad) y la representatividad [30]. En cada estación se tomaron los datos que nos permitieron caracterizar adecuadamente el macizo rocoso, especialmente las discontinuidades y sus parámetros resistentes.

### 2.2.3 Análisis numérico

Mediante el análisis numérico tenso deformacional podemos determinar zonas sobrecargadas y movimientos del terreno.

Los modelos numéricos son programas informáticos que pueden simular el comportamiento mecánico de una unidad de roca sometida a un conjunto de entornos iniciales predefinidos tales como condiciones de contorno, tensiones in situ y geometría [31].

En este estudio, se determinaron los esfuerzos y se evaluaron los efectos de las alteraciones en la presión activa dentro de la caverna mediante el software Examine 2D considerando un único material. Examine 2D es un programa informático de elementos de contorno desarrollado para el análisis de tensión elástica bidimensional de excavaciones subterráneas [32]. Estos modelos realizados mediante elementos de contorno tienen ciertas limitaciones en casos de espesores más pequeños y aplicación de cargas.

En el análisis numérico del túnel de lava se escogió una de las secciones y se le asignaron valores de resistencia del macizo rocoso en base al criterio de Hoek-Brown para materiales basálticos (Tabla 2). En este criterio se combina tanto ensayos de laboratorio como observaciones de campo. Se ha utilizado el programa Rocdata de la casa Rocscience para el cálculo de los parámetros.

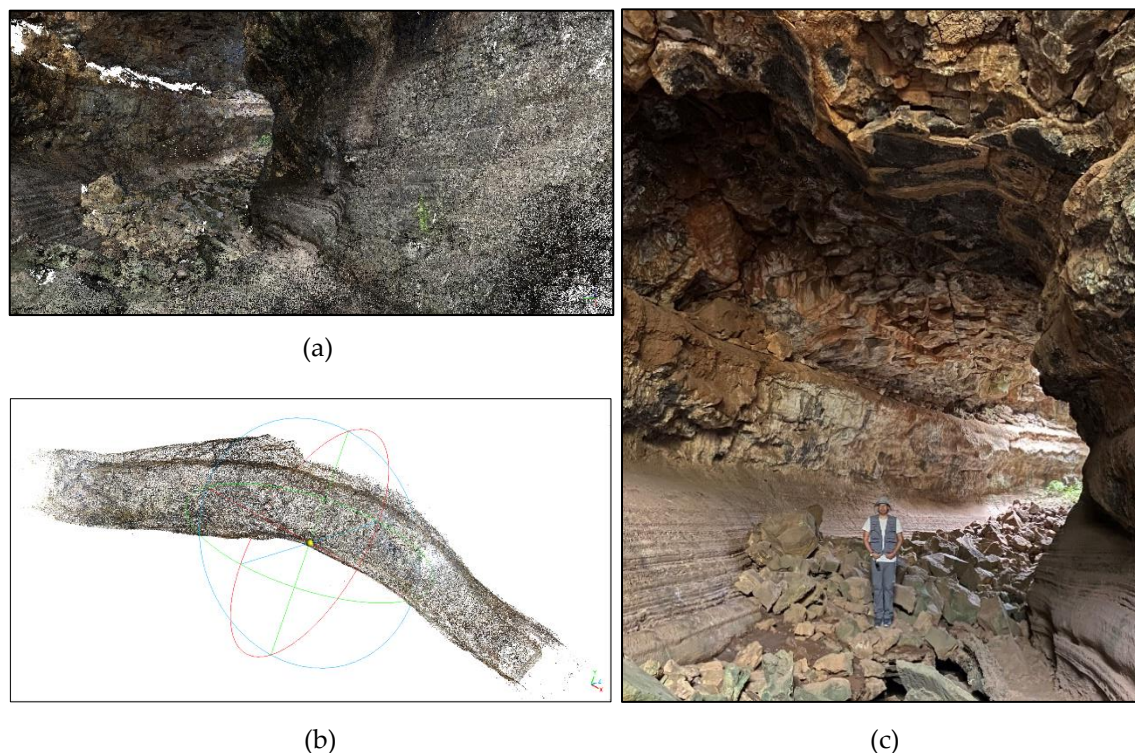
**Tabla 2.** Envolvente de Hoek- Brown. Parámetros y valores correspondientes.

Parámetro	Valor
$\sigma_{mac}$	25 MPa
GSI	55
mi	25
D	0
$\gamma$	0.028 MN/m <sup>3</sup>
Erm	6668 MPa
$\sigma_{tmass}$	-0.034 MPa

Note:  $\sigma_c$ , Resistencia a la compresión simple; GSI, Índice de resistencia geológica; mi, Constante de roca intacta; D, Disturbancia;  $\gamma$ , peso específico; Erm, módulo de deformación de macizo;  $\sigma_{tmass}$ , resistencia a tracción del macizo.

### 2.2.4 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica mediante la cual se puede obtener información volumétrica que describe las estructuras de la superficie aprovechando el paralaje, es decir, la diferencia en la posición aparente de un objeto, dada la perspectiva variable proporcionada por imágenes superpuestas capturadas desde diferentes puntos de vista [33]. El enfoque es más adecuado para imágenes con un alto grado de superposición que capturan la estructura tridimensional completa de la escena vista desde una amplia gama de posiciones o, como sugiere el nombre, imágenes derivadas de un sensor en movimiento [34].



**Figura 5.** (a) Nube de puntos 3D generada en Agisoft Metashape con vista al skylight. (b) Nube de puntos 3D generada en Cloud Compare. (c) Fotografía tomada en el interior del túnel de lava.

En comparación con otros métodos tradicionales de fotogrametría de corto alcance, la técnica Structure from Motion (SfM) tiene muchas ventajas, como alta eficiencia, flujos de trabajo flexibles y sin supervisión de expertos [35]. La técnica SfM permite obtener un conjunto de coordenadas xyz, o nube de puntos 3D, del macizo rocoso. Dicha información geométrica y óptica puede ser empleada para la extracción de parámetros que caracterizan el macizo rocoso o la detección de cambios de forma remota [36]. Por lo tanto, se eliminan los problemas de inaccesibilidad y sesgo en la recopilación de grandes cantidades de datos, dando como resultado resultados más representativos y precisos [37].

Para la generación del modelo 3D del interior del túnel de lava se tomaron un total de 2079 fotografías desde diferentes ángulos y puntos usando un iPhone 13. Para poder orientar y escalar la nube de puntos 3D, obtenida mediante SfM, es necesario tener las coordenadas precisas de algunos puntos de control, al menos tres, de la superficie del terreno de la zona cartografiada [38]. Con la ayuda del software Agisoft Metashape [39] se obtuvo la nube de puntos 3D. Todos los archivos de nube de puntos se exportaron a formato xyz para que el procesamiento se realice utilizando CloudCompare [40]. Los diferentes parámetros levantados a partir de las estaciones geomecánicas fueron comparados con los datos que se pudieron obtener del modelo para constatar su precisión.

### 3. Resultados

#### 3.1 Geometría de la cueva mediante fotogrametría

La reconstrucción tridimensional del túnel de lava fue realizada a partir de un conjunto de fotografías captadas desde las distintas estaciones geomecánicas del proyecto. Dichas estaciones fueron levantadas en campo por lo que algunos datos, dadas las condiciones de la cavidad, necesitaron ser tomados utilizando fotogrametría.

Previamente se estableció el lugar idóneo para la colocación de los puntos de control, se diseñó un tablero donde se colocaron tres marcas que sirvieron para la orientación y el escalado del modelo. De esta manera, con la medición de las distancias entre puntos se pudo calcular las coordenadas relativas, siendo el punto "1" el punto de partida (0,0,0).

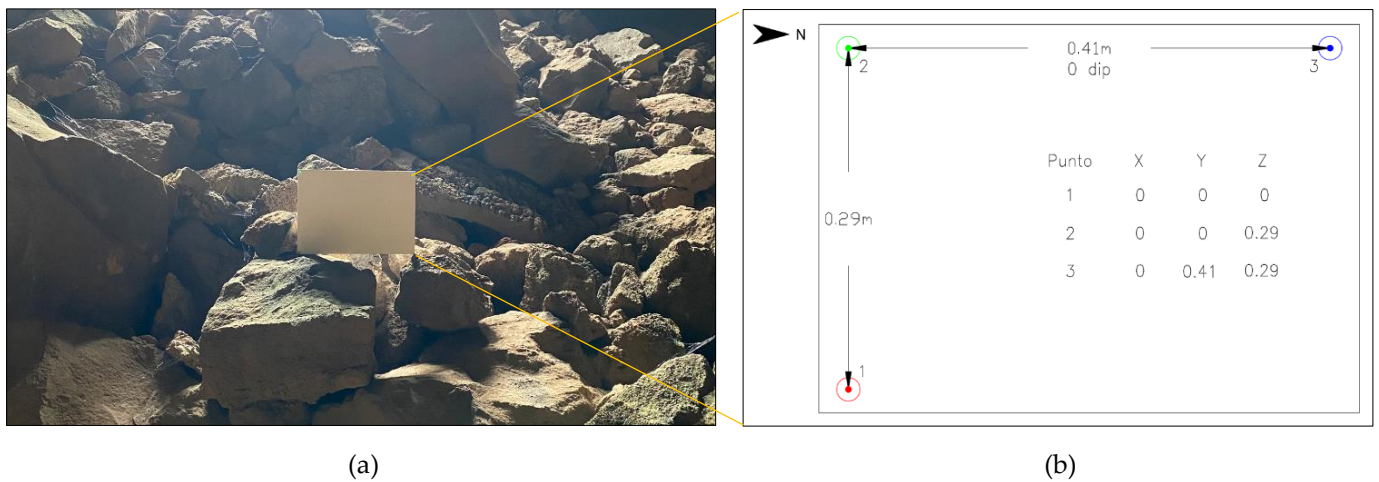


Figura 6. (a) Puntos de control fijados en el túnel. (b) Trazado de puntos de control para cálculo de modelo.

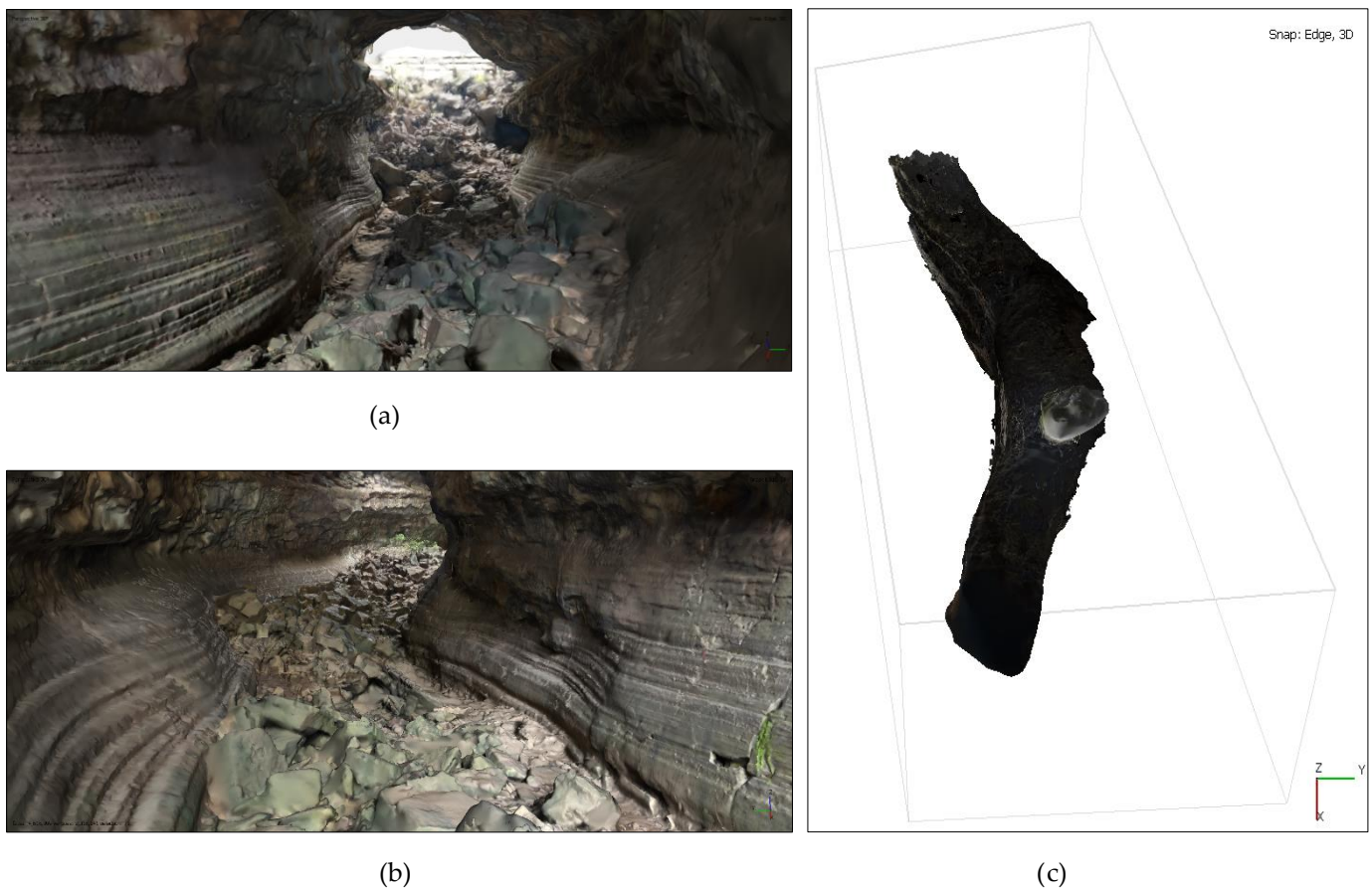
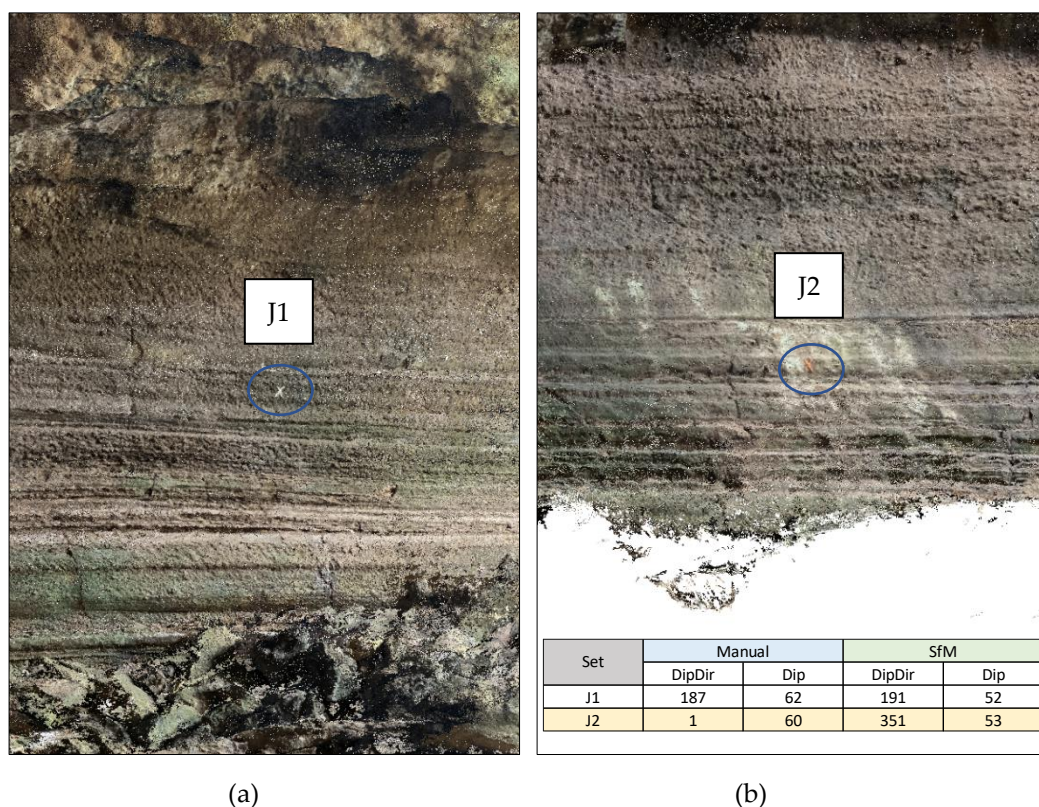


Figura 7. Modelo sombreado en 3D del túnel de lava estudiado. (a) Vista a entrada principal. (b) Vista a skylight. (c) Trazado del exterior del túnel.

Finalmente, se fijaron dos planos de control en el interior del túnel marcados con plastilina de distintos colores, esto para comprobar la correcta orientación de las discontinuidades, y determinar la diferencia que existe entre el levantamiento de datos en campo y la técnica SfM. Existe una diferencia de valores entre 6° y 10° que se puede manejar y validar el trabajo. Asimismo, no existen inconvenientes con la medición de las dimensiones de las discontinuidades debido a que el modelo se encuentra escalado.





**Figura 8.** Medición de discontinuidades en software Cloud Compare y comparación con datos tomados en campo.

En la Tabla 3, se muestran los parámetros de las clasificaciones geomecánicas que se han podido determinar a partir de la técnica SfM. Se presentan mejores resultados cuando las discontinuidades presentes en el modelo se ajustan a una escala adecuada para la toma de datos.

**Tabla 3.** Parámetros usados para caracterizar el macizo rocoso. Adaptado y modificado de [41].

Parámetro	Adquisición	Fuente de datos	SfM Descripción
Resistencia de la roca	UCS	Campo, laboratorio	No es posible determinar
Rock Quality Designation (RQD)	Núcleo de perforación, análisis geométrico	Campo, SfM	Es posible determinar siempre que existan fotografías de alta resolución para generación de modelo
Espaciamiento	Núcleo de perforación, análisis geométrico	Campo, SfM	Es posible determinar sin problemas
Persistencia	Análisis geométrico	Campo, SfM	Es posible determinar sin problemas
Apertura	Análisis geométrico	Campo, SfM	No es posible determinar cuándo se encuentra en escala milimétrica
Rugosidad	Análisis geométrico	Campo, SfM	Es posible determinar siempre y cuando sea por estimación visual
Relleno	Análisis geométrico	Campo, imágenes	No es posible determinar
Alteración	Inspección visual	Campo, imágenes	No es posible determinar
Agua subterránea	Inspección visual	Campo	No es posible determinar

### 3.2 Evaluación de la estabilidad mediante clasificaciones geomecánicas

Se ha utilizado el Índice Q de Barton [26], el sistema RMR de Bieniawski [27] y el Índice Geotécnico de Cavidades [28] durante el levantamiento in situ de las estaciones geomecánicas a lo largo de la cavidad subterránea. Se han establecido cuatro estaciones geomecánicas para evaluar la calidad del macizo rocoso, las mismas que se encuentran en el

tramo accesible a pie al NW antes del cruce de la carretera. El resto del túnel ha sido inferido debido a las diversas complicaciones que se presentan para acceder.

Los valores de calidad de roca y observaciones mapeadas para el Índice RMR de Bieniawski se resumen en la Tabla 4 donde la cueva volcánica presenta una calidad de roca media. Por otro lado, a partir de los valores obtenidos usando el Índice Q de Barton (Tabla 5) se ha determinado que el macizo rocoso corresponde a una calidad de roca pobre. Finalmente, la Tabla 5 muestra el resultado del mapeo de las variables CGI que corresponde a una susceptibilidad a la inestabilidad estructural moderada (Figura 9).

**Tabla 4.** Determinación del Índice RMR a partir de las estaciones geomecánicas definidas.

Parámetros	Estaciones				
	1	2	3	4	
RMR1	3	12	4	4	
RMR2	16	10	18	16	
RMR3	8	8	10	9	
RMR4	Persistence	2	4	4	4
	Aperture	1	1	1	1
	Roughness	3	3	3	3
	Infilling	6	6	6	6
	Weathering	5	6	6	5
RMR5	15	15	15	15	
RMR básico	59	65	67	63	
RMR corregido	49	55	57	53	

Note: RMR1, Uniaxial Compression Strength (UCS); RMR2, Rock Quality Designation (RQD); RMR3, Spacing of discontinuities; RMR4, Condition of discontinuities; RMR5, Ground water.





**Tabla 5.** Determinación del Índice Q a partir de las estaciones geomecánicas definidas.

Parámetros	Estaciones			
	1	2	3	4
RQD (%)	78	50	90	80
Jn	2 x 9	18	18	9
Jr	3	3	3	3
Ja	2	1	2	3
Jw	1	1	1	1
SRF	5	5	5	5
Q	1.30	1.67	1.50	1.77
<b>Descripción o calidad</b>	Poor	Poor	Poor	Poor

Note: RQD, Rock Quality Designation; Jn, Joint set number; Jr, Joint roughness number; Ja, Joint alteration number; Jw, Joint water reduction; SRF, Stress reduction factor.

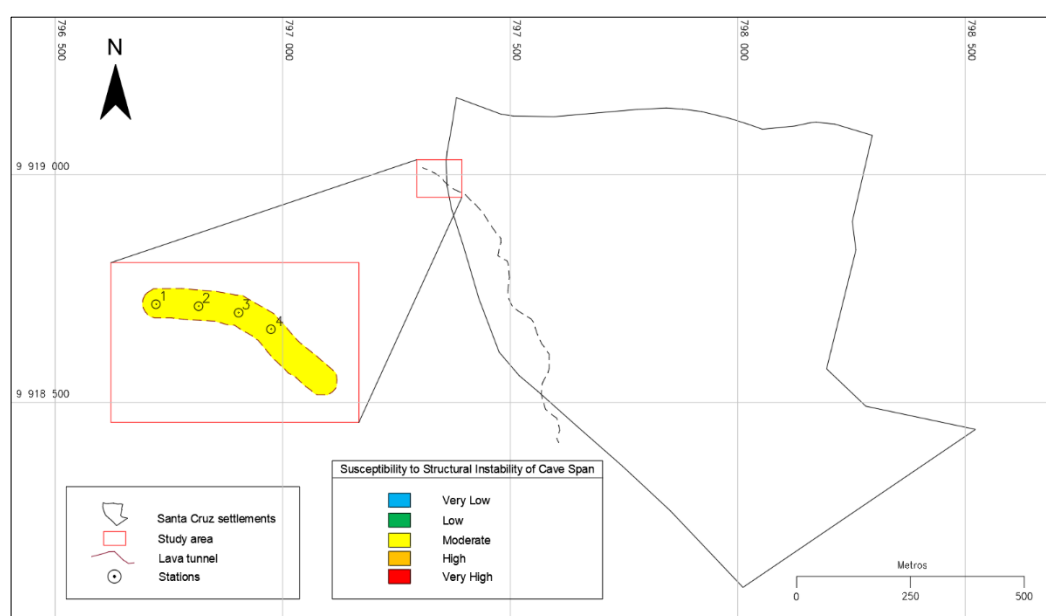
**Tabla 6.** Determinación del CGI a partir de las estaciones geomecánicas definidas.

Parámetros	Estaciones				
	1	2	3	4	
RMR	RMR Bieniawski	49	55	57	53
	Descripción	Regular	Regular	Regular	Regular
	CGI Puntaje	39	39	39	39
HR	Hydraulic Radius	2.39	2.61	2.37	2.76
	Descripción	Large	Large	Large	Large
	CGI Puntaje	0	0	0	0

CS	Shape				
		Descripción	Planar	Arch	Arch
	CGI Puntaje	6	10	10	10
CT	Ceiling Thickness	1	3.60	1.50	2
	Descripción	Small	Regular	Small	Small
	CGI Puntaje	0	3	0	0
CGI		45	52	49	49
<b>Clase de CGI</b>					

Note: RMR, Rock Mass Rating; HR, Hydraulic Radius; CS, Ceiling Shape; CT, Ceiling Thickness.

316



317

**Figura 9.** Zonificación del túnel de lava según la evaluación geomecánica aplicando el método CGI en las estaciones geomecánicas del túnel.

318

319

De esta manera, cada una de las metodologías de análisis aplicadas se han complementado entre sí. Existen desprendimientos antiguos, pero no se aprecian grandes inestabilidades a excepción de algunos bloques justo en la entrada como en la parte donde se sitúan las estaciones 2 - 3 y que deberán ser monitoreados.

320

321

322

323

### 3.3 Evaluación de la estabilidad mediante análisis empírico

324

Para el análisis de estabilidad de la cueva volcánica se ha empleado un gráfico específico donde se introduce en el eje de las 'X' los valores obtenidos del Índice Q, el RMR o el CGI dependiendo del caso; y en el eje de las 'Y' el valor del unsupported span. Los puntos generados indican el estado en el que se encuentra el túnel de lava para cada estación levantada.

325

326

327

328

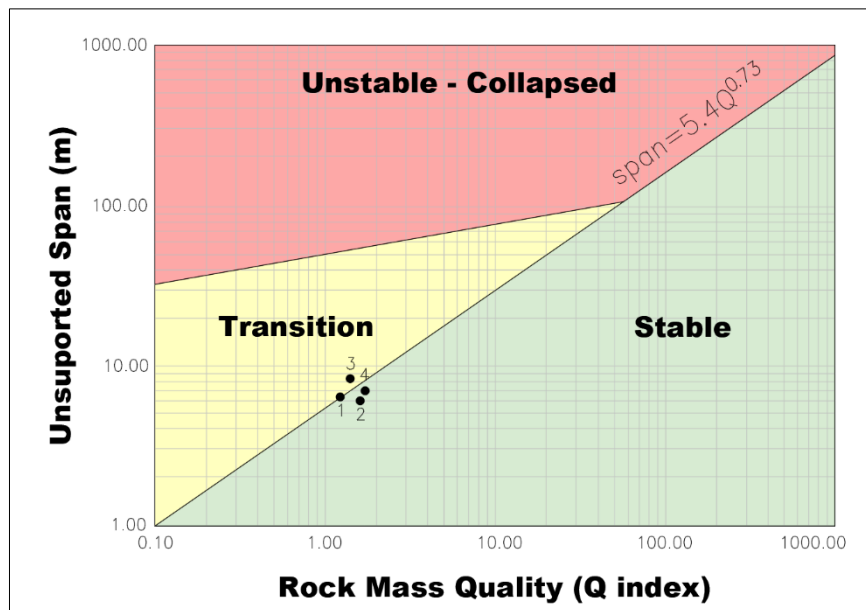
329

En la Figura 10, es posible evidenciar que todas las secciones analizadas se encuentran entre la zona estable y la de transición. El resultado se debe a que el ancho del túnel es bastante amplio y el Índice Q presenta valores bajos.

330

331

332



333

Figura 10. Representación gráfica de la estabilidad del túnel de lava para cada estación geomecánica en relación a valores del Índice Q. Adaptado y modificado de [5].

334

335

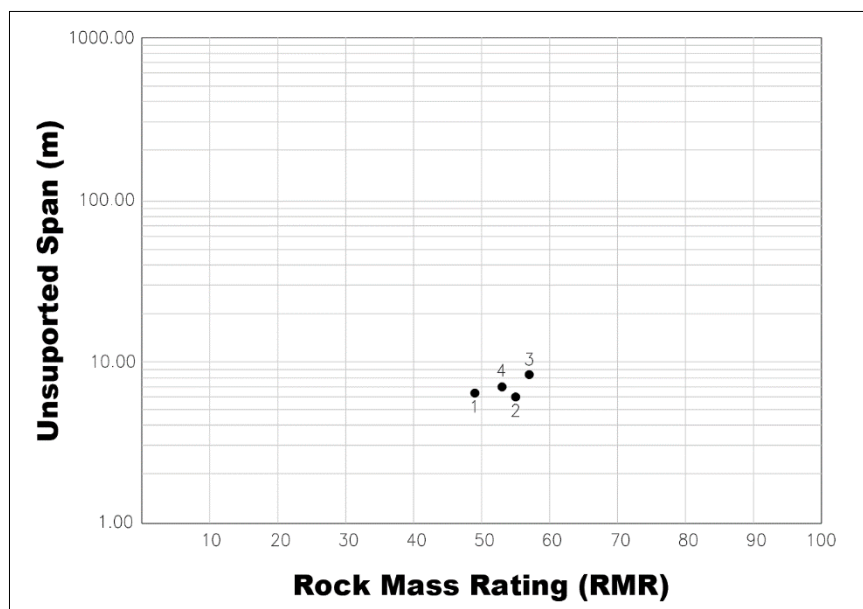
En la Figura 11 y 12, se presentan las secciones analizadas para el RMR y para el CGI, respectivamente. Los valores del RMR oscilan entre 49-57 y los valores del CGI oscilan entre 45-52. A partir de los puntos estacionados en el gráfico se asume que, el túnel es globalmente estable, pero se aprecia la caída de bloques y lascas inestables en el techo.

336

337

338

339



340

Figura 11. Representación gráfica de la estabilidad del túnel de lava para cada estación geomecánica en relación a valores del RMR. Adaptado y modificado de [12].

341

342

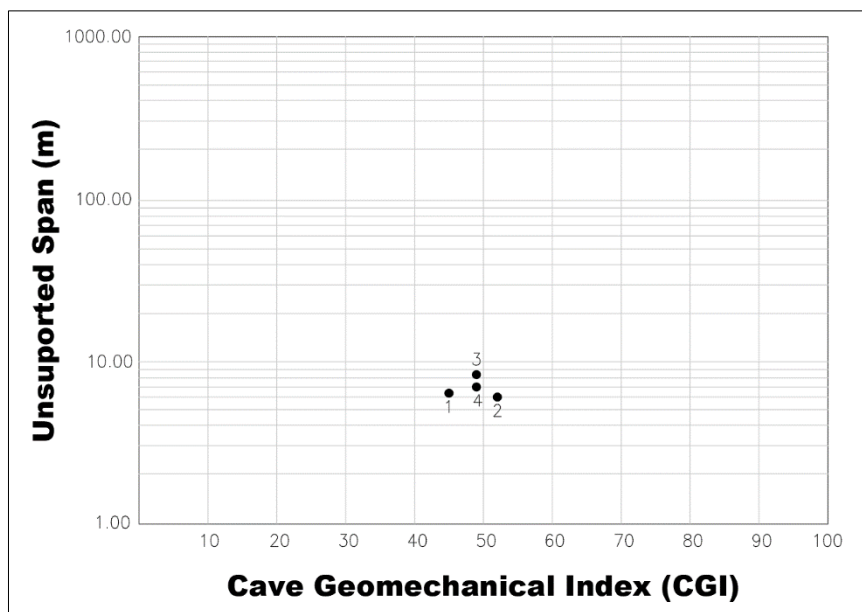


Figura 12. Representación gráfica de la estabilidad del túnel de lava para cada estación geomecánica en relación a valores del CGI. Adaptado y modificado de [12].

### 3.4 Análisis tenso deformacional

Se ha realizado el cálculo de elementos finitos en la sección donde se ha levantado la estación geomecánica 3. Dado que el régimen es elástico se escogió el programa Examine 2D que trabaja con elementos de contorno; y se han considerado diferentes escenarios para comparar.

En la Figura 13, se muestran los resultados del modelamiento sin considerar sobrecargas en la superficie. Los desplazamientos totales son despreciables, y desde el punto de vista elástico la cavidad está estabilizada. Sin embargo, se aprecian enormes bloques inestables en la entrada que se mantienen in situ únicamente por la rugosidad e imbricación de las discontinuidades. De la generación del gráfico de strength factor, es posible deducir que salvo zonas muy puntuales donde se acumulan tensiones no se esperan efectos tensionales en el túnel.

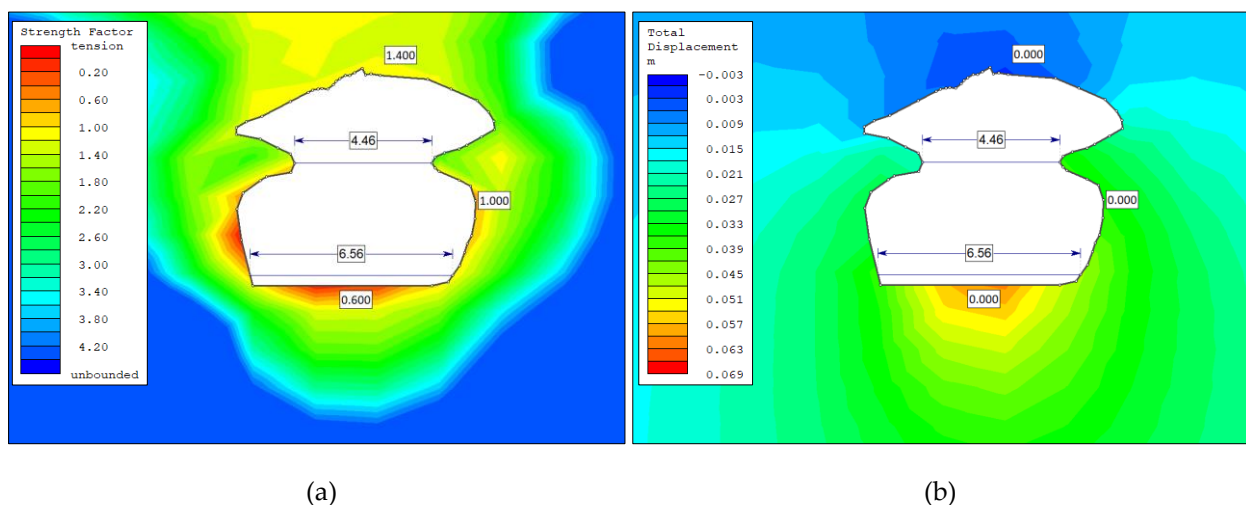
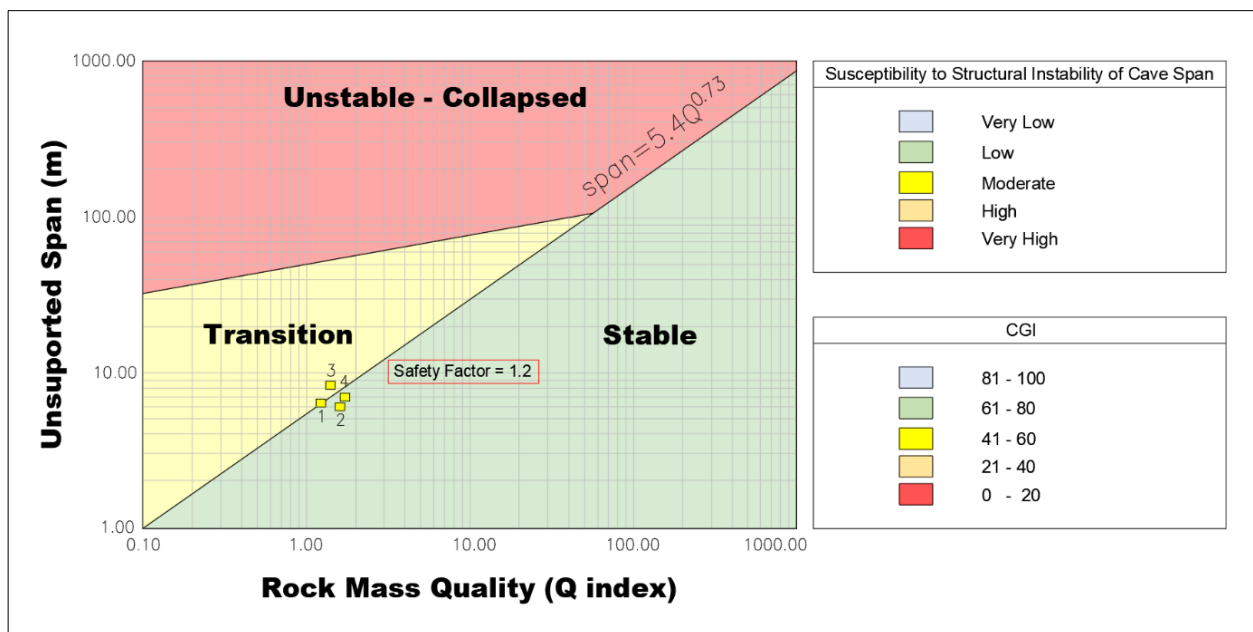


Figura 13. Modelamiento de la estación 3 del túnel de lava. (a) Strength factor tension. (b) Desplazamientos totales.

En la Figura 14, se presenta un gráfico que muestra la correlación de información para la estación geomecánica 3. Dicha estación presenta un factor de seguridad de 1.2 y valores medios o moderados de CGI. Se espera que el modo de fallo sea el de caída de bloques tal y como se aprecia en el terreno.

362  
363  
364  
365



366

Figura 14. El gráfico muestra las dos metodologías Índice Q de Barton y CGI con la adición del Factor de Seguridad. Adaptado y modificado de [5].

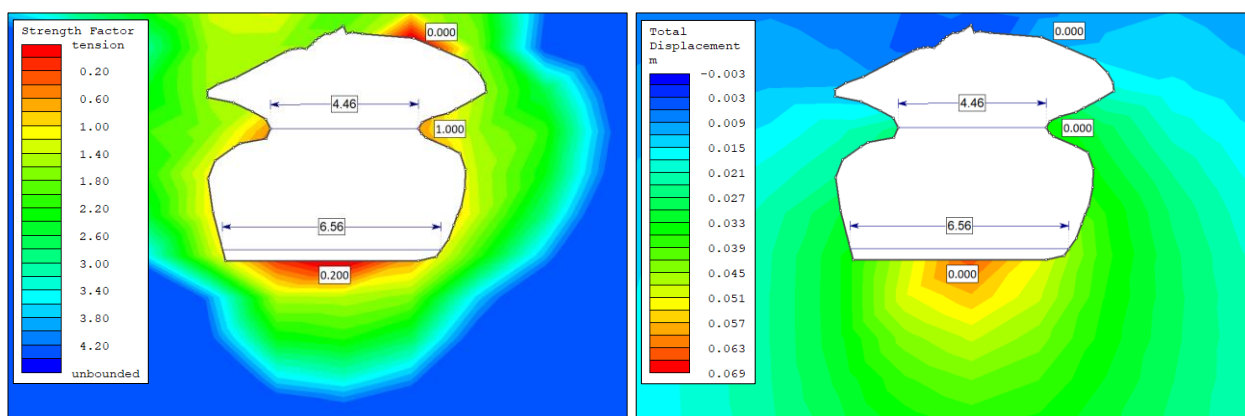
367  
368

Se ha realizado una segunda modelización donde se determinaron los escenarios más desfavorables para el desarrollo del modelo. Para ello se ha fijado la clave en menos de 1m manteniendo todos los demás parámetros idénticos.

369  
370  
371

En la Figura 15 se aprecia que no hay desplazamientos. Las tensiones alrededor de la cavidad son pequeñas y solo hay concentraciones puntuales de tensión en los hastiales y parte del techo de la cueva.

372  
373  
374



375

(a)

(b)

376

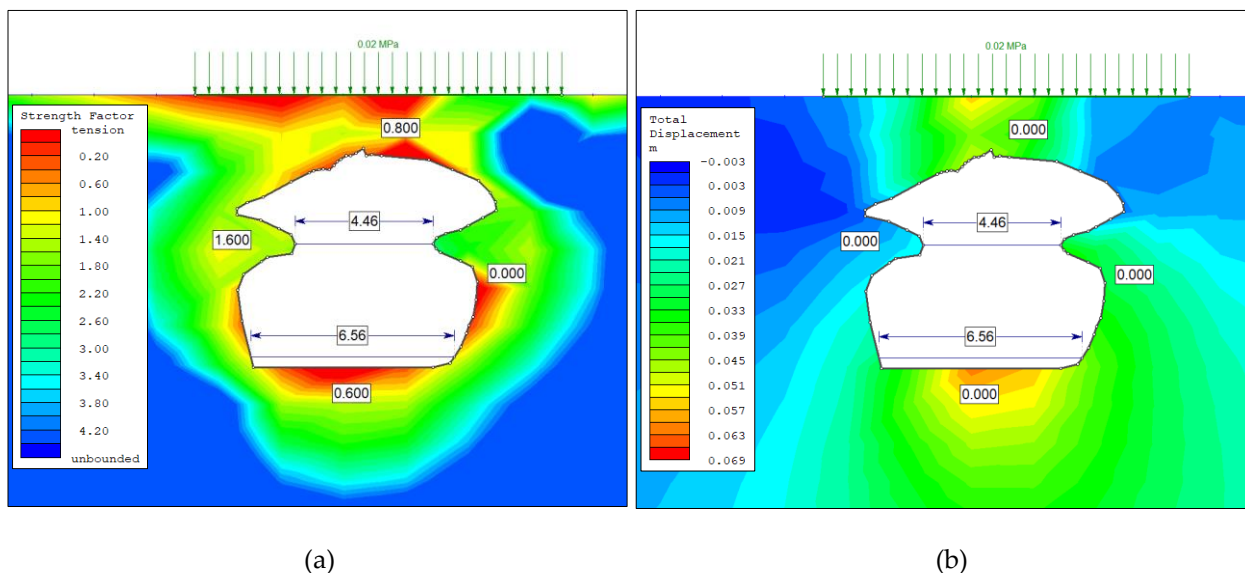
Figura 15. Modelamiento de la estación 3 del túnel de lava con clave menor a 1m. (a) Strength factor tension. (b) Desplazamientos totales.

377  
378

Se ha simulado una carga de 20 KN/m<sup>2</sup>. Esta carga se ha repartido por la superficie a modo de losa en toda la cavidad para analizar su interacción.

379  
380

Del análisis de la Figura 16 se determina que con la sobrecarga simulada no existen desplazamientos relevantes y las tensiones alrededor de la cueva son mayores que los escenarios anteriores con énfasis en ciertas zonas alrededor de los hastiales y el techo. Sin embargo, se puede decir que la cueva sigue siendo estable.



**Figura 16.** (a) Strength factor tension con una sobrecarga de 0,02 MPa. (b) Desplazamientos totales con sobrecarga de 0,02 MPa.

#### 4. Conclusiones

La aplicación de un estudio de tipo geotécnico permitió definir las condiciones de estabilidad y seguridad en las que se encuentra el túnel de lava El Mirador de los Túneles. Con el levantamiento de información en campo y la metodología aplicada para su análisis se ha determinado que no se advierten problemas de inestabilidad. Eso sí, hay que considerar que existen zonas específicas a lo largo del túnel donde la seguridad no está del todo garantizada.

Con la técnica fotogramétrica SfM se ha podido generar un modelo geométrico que permitió la adquisición de datos que fueron difíciles de tomar in situ y que sirvieron para completar los parámetros establecidos en las clasificaciones geomecánicas. Es importante mencionar que las técnicas remotas no sustituyen al levantamiento de campo y la toma manual, sino que son complementarias a estas.

Se han elaborado diferentes gráficos que se compararon con los métodos empíricos usados. Los valores resultantes a partir del Índice Q presentaron el menor puntaje en comparación con el RMR y el CGI sin embargo fueron los que mejor se ajustaron a las condiciones del túnel y a los modelos numéricos desarrollados.

Finalmente, se observaron algunas aperturas en el techo y desprendimientos de roca antiguos, por tanto, deberán realizarse monitoreos constantes y restringir el paso de los visitantes.

**Author Contributions:** Conceptualization, G.R., M.M., S.L. and L.J.B.; methodology, G.R. and L.J.B.; software, G.R. and L.J.B.; validation, G.R. and L.J.B.; formal analysis, G.R.; investigation, G.R., M.M. and L.J.B.; writing—original draft preparation, G.R.; writing—review and editing, G.R., M.M., S.L. and L.J.B.; supervision, M.M., S.L. and L.J.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

**Funding:** This research is part of a master thesis of the Geotechnics Master Program of the Faculty of Engineering in Earth Sciences (FICT, acronym in Spanish) of ESPOL Polytechnic University in Guayaquil, Ecuador.

**Data Availability Statement:** The data presented in this study are available in article and supplementary material. 417  
418

**Acknowledgments:** This work has been made possible thanks to support from ESPOL Polytechnic University. The authors would like to thank two anonymous reviewers for their constructive comments and the editorial office for the editorial handling. 419  
420  
421

The research has been granted from Polytechnical University of Madrid through the Innovative Project: flipped classroom and virtual volcanoes UPM 2022. "Volcanes virtuales: aula invertida de geotecnia de materiales volcánicos a través de entornos virtuales y TICs" Proyecto de Innovación Educativa UPM IE22.0404. 422  
423  
424  
425

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. 426

## Referencias 427

- (1) Barton, N. Unsupported Underground Openings. In *Rock Mechanics Discussion Meeting, Befe, Swedish Rock Mechanics Research Foundation, Stockholm*; 1976; pp 61–94. 428  
429
- (2) Waltham, T.; Bell, F. G.; Culshaw, M. G.; Knez, M.; Slabe, T. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*; Springer, 2005; Vol. 382. 430  
431
- (3) Huff, W. D.; Owen, L. A. *Volcanic Landforms and Hazards*; Elsevier, 2015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09512-9>. 432  
433
- (4) Jordá Bordehore, L.; Toulkeridis, T. Stability Assessment of Volcanic Natural Caves–Lava Tunnels–Using Both Empirical and Numerical Approach, Case Studies of Galapagos Islands (Ecuador) and Lanzarote Island (Canary–Spain). In *ISRM International Symposium-EUROCK 2016*; OnePetro, 2016. 434  
435  
436
- (5) Jordá Bordehore, L. Stability Assessment of Natural Caves Using Empirical Approaches and Rock Mass Classifications. *Rock Mech. Rock Eng.* **2017**, *50* (8), 2143–2154. 437  
438
- (6) Halliday, W. R. A Short History of Vulcanospeleology. In *Ninth International symposium on vulcanospeleology*; 1999. 439
- (7) Espinasa, L.; Garvey, R.; Espinasa, J.; Fratto, C. A.; Taylor, S.; Toulkeridis, T.; Addison, A. Cave Dwelling Onychophora from a Lava Tube in the Galapagos. *Subterr. Biol.* **2015**, *15*. 440  
441
- (8) Jordá Bordehore, R.; Navas Guzman, L.; Jordá Bordehore, R.; Romero Crespo, P. L.; Durán Valsero, J. J. Turismo Subterráneo En Ecuador. *El karst y el hombre las cuevas como Patrim. Mund.* **2016**. 442  
443
- (9) Constantin, S.; Toulkeridis, T.; Moldovan, O. T.; Villacís, M.; Addison, A. Caves and Karst of Ecuador–State-of-the-Art and Research Perspectives. *Phys. Geogr.* **2019**, *40* (1), 28–51. 444  
445
- (10) Gallardo, G.; Toulkeridis, T. *Cuevas Volcánicas y Otras Atracciones Espeleológicas*; 2008. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3404.4561>. 446  
447
- (11) Jordá Bordehore, L.; Toulkeridis, T.; Romero Crespo, P. L.; Jordá Bordehore, R.; García Garizabal, I. Stability Assessment of Volcanic Lava Tubes in the Galápagos Using Engineering Rock Mass Classifications and an Empirical Approach. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2016**, *89*, 55–67. 448  
449  
450
- (12) Bastidas, G.; Soria, O.; Mulas, M.; Loaiza, S.; Bordehore, L. J. Stability Analysis of Lava Tunnels on Santa Cruz Island (Galapagos Islands, Ecuador) Using Rock Mass Classifications: Empirical Approach and Numerical Modeling. *Geosciences* **2022**, *12* (10), 380. 451  
452  
453
- (13) Geist, D.; Naumann, T.; Larson, P. Evolution of Galápagos Magmas: Mantle and Crustal Fractionation without Assimilation. *J. Petrol.* **1998**, *39* (5), 953–971. 454  
455
- (14) Hoernle, K.; van den Bogaard, P.; Werner, R.; Lissinna, B.; Hauff, F.; Alvarado, G.; Garbe-Schönberg, D. Missing History (16–71 Ma) of the Galápagos Hotspot: Implications for the Tectonic and Biological Evolution of the Americas. *Geology* **2002**, *30* (9), 795–798. 456  
457  
458
- (15) Werner, R.; Hoernle, K.; Barckhausen, U.; Hauff, F. Geodynamic Evolution of the Galápagos Hot Spot System (Central East 459



- Pacific) over the Past 20 My: Constraints from Morphology, Geochemistry, and Magnetic Anomalies. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* **2003**, *4* (12). 460  
461
- (16) White, W. M.; McBirney, A. R.; Duncan, R. A. Petrology and Geochemistry of the Galápagos Islands: Portrait of a Pathological Mantle Plume. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **1993**, *98* (B11), 19533–19563. 462  
463
- (17) Štefka, J.; Hoeck, P. E. A.; Keller, L. F.; Smith, V. S. A Hitchhikers Guide to the Galápagos: Co-Phylogeography of Galápagos Mockingbirds and Their Parasites. *BMC Evol. Biol.* **2011**, *11* (1), 1–19. 464  
465
- (18) Bow, C. S. *The Geology and Petrogeneses of the Lavas of Floreana and Santa Cruz Islands: Galapagos Archipelago*; University of Oregon, 1979. 466  
467
- (19) D'Ozouville, N.; Deffontaines, B.; Benveniste, J.; Wegmüller, U.; Violette, S.; de Marsily, G. DEM Generation Using ASAR (ENVISAT) for Addressing the Lack of Freshwater Ecosystems Management, Santa Cruz Island, Galapagos. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112* (11), 4131–4147. 468  
469  
470
- (20) Gregg, T. K. P. Patterns and Processes: Subaerial Lava Flow Morphologies: A Review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **2017**, *342*, 3–12. 471  
472
- (21) Calvari, S.; Pinkerton, H. Formation of Lava Tubes and Extensive Flow Field during the 1991–1993 Eruption of Mount Etna. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **1998**, *103* (B11), 27291–27301. 473  
474
- (22) Mulas, M.; Cioni, R.; Andronico, D.; Mundula, F. The Explosive Activity of the 1669 Monti Rossi Eruption at Mt. Etna (Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **2016**, *328*, 115–133. 475  
476
- (23) Hoek, E. *Practical Rock Engineering*; 2000. 477
- (24) Palmstrom, A.; Broch, E. Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Reference to the Q-System. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2006**, *21* (6), 575–593. 478  
479
- (25) Alejano Monge, L.; Ramírez Oyanguren, P. *Mecánica de rocas : fundamentos e ingeniería de taludes*; Red DESIR: Madrid, 2004. 480
- (26) Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mech.* **1974**, *6* (4), 189–236. 481  
482
- (27) Bieniawski, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*; John Wiley & Sons, 1989. 483  
484
- (28) Brandi, I.; Barbosa, M.; Barata, A.; De Paula, R.; Correa, T.; Lima, H.; Osborne, R. Cave Geomechanical Index (CGI). Classification and Contribution to the Conservation of Natural Caves in the Iron Mines. *Geoconservation Res.* **2020**, *3* (2), 134–161. 485  
486  
487
- (29) Jordá, L.; Tomás, R.; Arlandi, M.; Abellán, A. *Manual de Estaciones Geomecánicas y Descripción de Macizos Rocosos En Afloramientos*. Madrid, España 2016. 488  
489
- (30) Carrión-Mero, P.; Briones-Bitar, J.; Morante-Carballo, F.; Stay-Coello, D.; Blanco-Torrens, R.; Berrezueta, E. Evaluation of Slope Stability in an Urban Area as a Basis for Territorial Planning: A Case Study. *Appl. Sci.* **2021**, *11* (11), 5013. 490  
491
- (31) Kainthola, A.; Singh, P. K.; Wasnik, A. B.; Sazid, M.; Singh, T. N. Finite Element Analysis of Road Cut Slopes Using Hoek and Brown Failure Criterion. *Int J Earth Sci Eng* **2012**, *5* (5), 1100–1109. 492  
493
- (32) Rocscience. RS2 9.0–Rock and Soil 2-Dimensional Analysis Program. Rocscience Inc. Toronto 2017. 494
- (33) Anderson, K.; Westoby, M. J.; James, M. R. Low-Budget Topographic Surveying Comes of Age: Structure from Motion Photogrammetry in Geography and the Geosciences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. SAGE Publications Sage UK: London, England 2019, pp 163–173. 495  
496  
497
- (34) 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. 498  
499
- (35) An, P.; Fang, K.; Jiang, Q.; Zhang, H.; Zhang, Y. Measurement of Rock Joint Surfaces by Using Smartphone Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Sensors*. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21030922>. 500  
501

- 
- (36) Tomás-Jover, R.; Guill, A. J. R.; González, M. C.; Fernández, A. A.; Jordá, L. Structure from Motion (SfM): Una Técnica Fotogramétrica de Bajo Coste Para La Caracterización y Monitoreo de Macizos Rocosos. In *Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno: 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica: A Coruña, 19, 20 y 21 de octubre de 2016*; Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, 2016; pp 209–216. 502  
503  
504  
505
- (37) Tung, W. Y.; Nagendran, S. K.; Ismail, M. A. M. 3D Rock Slope Data Acquisition by Photogrammetry Approach and Extraction of Geological Planes Using FACET Plugin in CloudCompare. In *IOP conference series: earth and environmental science*; IOP Publishing, 2018; Vol. 169, p 12051. 506  
507  
508
- (38) Jordá Bordehore, L.; Riquelme, A.; Tomás, R.; Cano, M. Análisis Estructural y Geomecánico En Zonas Inaccessibles de Cavernas Naturales Mediante Técnicas Fotogramétricas: Aplicación En La Entrada de La Cueva de Artá (Mallorca). *El karst y el hombre las cuevas como Patrim. Mund.* **2016**, 528. 509  
510  
511
- (39) Manual, A. M. U. Professional Edition, Version 1.6. *Agisoft LLC* **2018**. 512
- (40) Rajendra, Y. D.; Mehrotra, S. C.; Kale, K. V.; Manza, R. R.; Dhupal, R. K.; Nagne, A. D.; Vibhute, A. D. Evaluation of Partially Overlapping 3D Point Cloud's Registration by Using ICP Variant and CloudCompare. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2014**, 40 (8), 891. 513  
514  
515
- (41) 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. 516  
517  
518