

Análisis de Estabilidad y Riesgos Asociados a las Cuevas Volcánicas de las Islas Galápagos: comparación de Métodos Empíricos y Numéricos

Gilmar Bastidas ¹, Oliver Soria ¹, Maurizio Mulas ^{1,*} and Luis Bordehore ^{2,*}

¹ 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; ggbastid@espol.edu.ec, osoria@espol.edu.ec, mmulas@espol.edu.ec

² Universidad Politécnica de Madrid; jorda@upm.es

* Correspondence: MM mmulas@espol.edu.ec, LJ ljorda@upm.es

Resumen: Las cavidades o tubos de lava presentes en las Islas Galápagos, se formaron por el enfriamiento diferencial del flujo basálticos de los volcanes que rodean estas islas. En el presente artículo se realizó un análisis de estabilidad para conocer el grado de seguridad de diferentes tubos de lava utilizando 3 métodos: dos empíricos basados en clasificaciones geomecánicas y uno tensodeformacional (criterio de Hoek y Brown). La metodología que se utilizó consistía en las siguientes fases: (i) recopilación de información basada en mapeos geomecánicos existentes, (ii) clasificación geomecánica del macizo rocoso mediante el índice de Q de Barton y el Clasificación Geomecánica; (iii) calificación del estado de equilibrio utilizando el índice geotécnico de cavidades (IGC); (iv) modelamiento numérico aplicando los criterios de Hoek y Brown; (v) comparación de metodología y discusión de los resultados. Los datos obtenidos indican que las metodologías utilizadas para evaluar la estabilidad de los tubos de lava presentan alta confiabilidad, ya que permitieron caracterizar los diferentes tubos de lava. Como “producto” final de la investigación se elaboró un gráfico en el que se superponían las observaciones empíricas y los factores de seguridad obtenidos con el análisis numérico (tensodeformacional), clasificando a los tubos de lava como Estables y no Estables. Se puede concluir que las metodologías de caracterización utilizadas en este artículo pueden ser aplicadas a casos similares y viene a llenar un hueco en análisis rápido preliminar del grado de estabilidad y riesgo de colapso de las cuevas.

Palabras claves: Riesgo, índice Q, Clasificación del macizo rocoso, Índice Geomecánico de Cuevas, Geotecnia de Cuevas.

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

Academic Editor: Firstname Lastname

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/>).

1. Introducción

Las cuevas siempre han sido parte fundamental para el desarrollo de la civilización, ya que, en ellas, se alojaban los primeros humanos que habitaron el planeta tierra (L. Bordehore, 2017). En los últimos años, las cuevas se han convertido en un punto de atracción turística, ya sea por su entorno o por la gran variedad de materiales que suelen existir dentro de las mismas.

Las Islas Galápagos son uno de los destinos turísticos más reconocidos internacionalmente, dado a su gran diversidad de fauna, flora y cuevas de origen volcánico, por lo que ha sido declarado Patrimonio de la Humanidad desde 1979 (Grenier, 2007).

Estas 13 islas, se generaron por un punto caliente, con una génesis similar a la de las islas Hawái (Addison, 2011). En las islas existen varios volcanes en forma de escudo, donde la mayoría de ellos se encuentran actualmente inactivos (L. Bordehore & Toulkeridis, 2016; Geist et al., 2008). Los productos principales relacionados a la actividad eruptiva son flujos de lava tipo pahoehoe o de tipo AA (Vallejo, 2011). El enfriamiento

diferencial del flujo de magma basáltico ha originado localmente cavidades de longitud de kilómetros y altura métricas, conocidas como tubos de lava (Montañez & Sánchez, 2021). Actualmente, el desarrollo de la urbanización de las Islas Galápagos se encuentra en apogeo, por ende, se necesitan nuevos estudios de estabilidad de las cavidades existentes.

En los últimos años se han realizado diversos estudios (Luis Bordehore et al., 2016; Calvari, S., & Pinkerton, 1999; Mulas et al., 2016; Waltham, A. C., & Park, 2002), llegando a analizar el peligro por erupciones laterales y recrear mapas de zonificación de acuerdo al nivel de peligro en cuevas y túneles de lava. Estos análisis de estabilidad son fundamentales ya que las cuevas son visitadas por turistas y por investigadores (arqueólogos, paleontólogos, etc.).

La estabilidad de los tubos de lava, pueden ser evaluadas mediante clasificaciones geomecánicas y métodos empíricos. Estas técnicas consisten en un conjunto de valores numéricos asignados a la masa de roca, los cuales, vistos desde un punto de vista ingenieril, se puede cuantificar y valorar la estabilidad de los túneles, minas y cuevas sin soportes, entre otras clases de cavidades subterráneas (R Romero Crespo, 2016). Los métodos de clasificación geomecánica más utilizados son: el índice de Q de Barton (Barton & Grimstad, 2004 and 2014), y Clasificación Geomecánica (RMR)(Bieniawski, 1989 and 2011), los cuales han sido aplicados alrededor del mundo para evaluar obras de ingeniería subterránea. Estos métodos de clasificación son aceptables para evaluar la estabilidad de cuevas subterráneas, y han sufrido ligeras modificaciones a través de los tiempos. (Barton & Bieniawski, 2008; Cornejo, 1996; Grimstad & Barton, 1993; Hoek, 2007; Romana-Ruiz, 2001).

La clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989 y 1973) define el macizo rocoso, como una de cinco clases según la geología estructural y la caracterización de resistencia. Esto lo realiza considerando la suma de seis factores principales: la resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso, el valor RQD, el espaciamiento entre juntas, estado de las diaclasas, y la presencia de agua subterránea. De estas las dos clasificaciones más populares para analizar las obras subterráneas es el índice Q la más aplicada a la estabilidad de cuevas (L. Bordehore, 2017).

La integridad de las cuevas se evalúa por medio del Índice geomecánico de cuevas (CGI) (Brandi et al., 2021). Este modelo considera la combinación de cuatro variables: i) Clasificación Geomecánica (RMR), ii) Radio hidráulico (RH), iii) Forma del techo (CS), iv) Espesor del Techo (CT). Cada una de estas variables tiene un peso asignado, los cuales se suman acorde a los rangos o intervalos numéricos obtenidos del análisis del macizo.

Bordehore et al., (2016), realizaron una comparación entre el ancho de las cuevas y el índice Q, en donde se determinó una función para establecer si una cueva es Estable o Inestable. En este trabajo se analizará la estabilidad de cuevas de lava ubicadas en los sectores del Mirador y Bellavista de la isla Santa Cruz (Galápagos), usando tres métodos de clasificación geomecánica (RMR, índice Q y CGI) con el fin de evaluar la capacidad de los túneles a soportar cargas verticales.

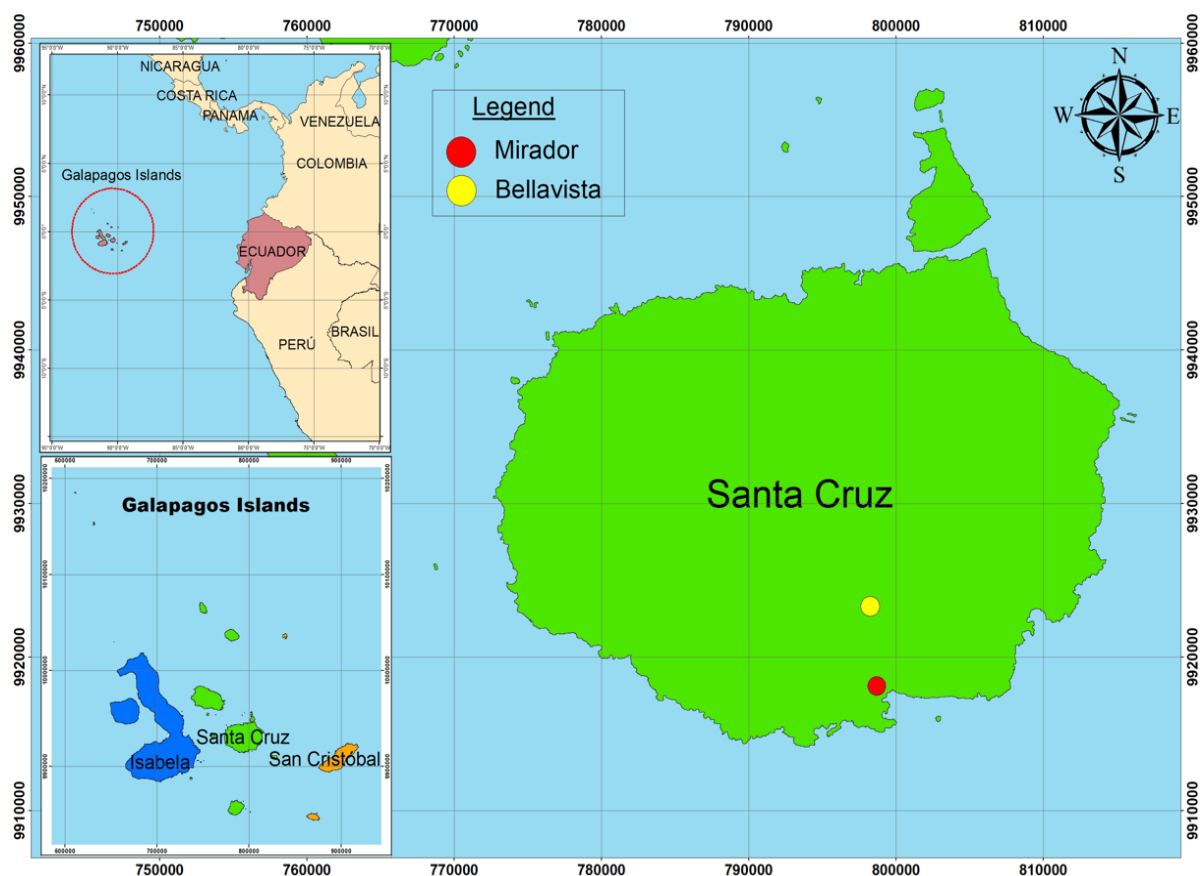


Figura 1. Ubicación de las islas Galápagos y los tubos de lava estudiados (sector Mirador y Bellavista).

2. Métodos

La presente investigación se desarrolló con información recopilada de un informe previo (TECH, 2019), en el que se realizó un análisis de riesgos asociados a los túneles de lava en la cueva Mirador ubicada en el sector del Mirador y de las cuevas Gallardo y Galla-Zoila, ubicadas en el sector de Bellavista de las islas Santa Cruz. En cada una de estas cuevas se siguió los siguientes procedimientos:

1. Visita a la cueva: Datos geométricos, Estación geomecánica para determinación de Compresión simple de la roca, propiedades de las discontinuidades, índice de calidad, GSI etc. Observación y toma de datos de eventuales de inestabilidades
2. Trabajo de gabinete:
 - 2.1 Determinación de los índices de calidad del macizo: RMR, Q, IGC.
 - 2.2 Determinación de las propiedades del macizo como un medio continuo: criterio de Hoek y Brown.
 - 2.3 Elaboración de modelos tensodeformacionales por elementos finitos y elementos de contorno (según el caso).
 - 2.4 discusión y comparación de resultados (en global).

La información de mapeos geomecánicos se obtuvo primariamente ubicando y caracterizando los túneles de lavas. Se determinó el espacio existente en las cavidades naturales subterránea, y con ello se realizó una representación gráfica de la geometría de los respectivos túneles. Se hicieron levantamiento de información local para localizar todas las entradas a los túneles, levantamiento topográfico, geológico y vulcanológico y finalmente geofísico.

Después se caracterizó la geomecánica del material rocoso, incluyendo la determinación de las propiedades físico – mecánicas de la roca intacta. También se realizaron mapeos geomecánicos en diferentes estaciones dentro de los túneles, con la finalidad de recolectar los parámetros: como grado de meteorización, presencia de agua subterránea, espaciado y orientación de las discontinuidades, estado de juntas.

Por último, se zonifico el área en función al grado de peligrosidad, debido a la existencia de los túneles de lava.

La clasificación geomecánica del macizo rocoso se determinó de acuerdo con 3 clasificaciones:

- **Clasificación geomecánica del macizo rocoso mediante el índice de Q de Barton y RMR**

Los sistemas de clasificación RMR e Índice Q Barton, se utilizaron para determinar la calidad de macizo rocoso, de esta forma, se pudo establecer un lenguaje común entre geólogos, ingenieros y constructores.

- **Calificación del estado de equilibrio de las cuevas utilizando CGI**

Otro método de caracterización geomecánica de cuevas, utilizado para evaluar la susceptibilidad a la inestabilidad estructural el CGI. Este parámetro indica las cualidades geomecánicas existentes en la roca.

El CGI es una combinación de cuatro variables:

i) **RMR** el cuál es la clasificación geomecánica de Bieniawski, que permite evaluar la calidad del macizo rocoso. A las variables que intervienen en este parámetro se les asigna un peso numérico, cuya suma da como resultado una valoración geomecánica. El resultado de este sistema de clasificación de calidad geomecánica del macizo rocoso, es dividido en 5 clases, cuyos valores son utilizados como parámetros de entrada dentro del índice geotécnico de cavidades.

Tabla 1. Índice de masa rocosa (RMR) de Bieniawski (1989) utilizado en el CGI.

| Suma | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | < 20 |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| Número de clase | I | II | III | IV | V |
| Descripción | Muy Bueno | Bueno | Regular | Pobre | Muy Pobre |

ii) **Radio hidráulico**, un parámetro que es el resultado de la razón entre el área y perímetro de la cueva. Este parámetro ha sido usado inicialmente en la dinámica de fluidos, sin embargo, también ha sido utilizado para el análisis de la estabilidad de las estructuras subterráneas desde 1977 por D.H Laubscher (Milne, 1997).

Tabla 2. Radio Hidráulico de CGI.(Brandt et al., 2021)

| Rango | 1.83 – 3 m | 0.92 – 1.82 m | 0.00- 0.91 m |
|-------|------------|---------------|--------------|
| Tipo | Largo | Regular | Pequeño |

iii) **Forma del Techo (CS)**, es una variable cualitativa que permite verificar si la geometría del techo de los vanos de las cuevas es favorables o desfavorables para la posible formación de bloques. Para determinar la forma de los vanos para el parámetro CGI, se midieron mediante laser en 3D las secciones 63 vanos de 27 estudios de cuevas, dando como resultado tres tipos: arco, planar y arco invertido.

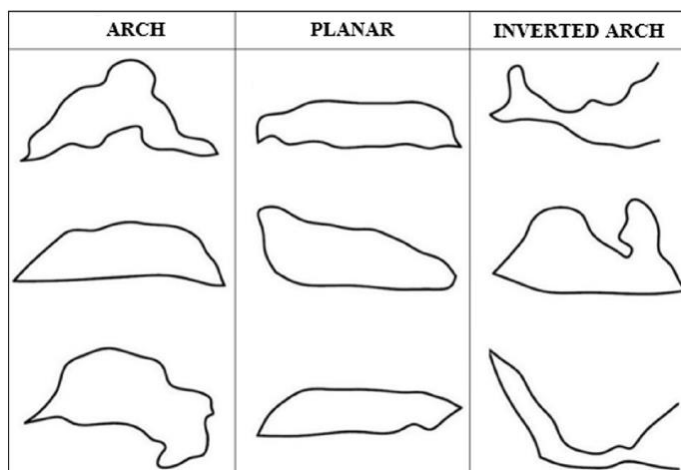


Figura 2. Tipo de secciones de las 3 clases de la variable Forma del techo. (Brandi et al., 2021)

iv) **Espesor del Techo (CT)**, un parámetro geotécnico que representa la profundidad que existe entre la superficie del terreno y el techo de las cuevas. Los valores asignados a este parámetro pueden ser clasificados acordes a la **Tabla 3**.

Tabla 3. Espesor del techo de CGI. (Brandi et al., 2021)

| Rango | 7.65 – 10 m | 3.32 – 7.64 m | 0.00- 3.31 m |
|--------|-------------|---------------|--------------|
| Clases | Largo | Regular | Pequeño |

Cada una de las variables mencionadas generan diferentes resultados en la clasificación CGI. La fórmula utilizada es la siguiente:

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

Donde:

αRMR = Peso asignado al Clasificación Geomecánica

βHR = Peso asignado al radio hidráulico

γCS = Peso asignado al Forma del techo

δCT = Peso asignado al Espesor del techo

La suma de los cuatro pesos da como resultado una ponderación máxima de 100, el cual representa el mejor escenario, el cual es una baja susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Por otro lado, un valor de cero represente el peor escenario, es cual es que la cueva es Inestable estructuralmente.

Una extensa bibliografía relacionada al cálculo de los valores de los pesos a utilizar en la clasificación IGC, puede ser consultado en (Brandi et al., 2021) Clasificación and Contribución para la Conservación de Cuevas naturales de las Minas de Hierro.

3. Resultados

Las cuevas Mirador, Gallardo y Galla-Zoila, han sido analizadas por tres métodos empíricos y de clasificación geomecánicas (RMR, índice Q y CGI). Las características geomecánicas requeridas para el análisis del Índice Q, muestran que los valores de RQD obtenidos varían desde 50-80 para la cueva Mirador o Kubler; 75-100 para cueva Gallardo y desde 50-100 en cueva Galla Zoila (**Tabla 4**). El Índice Q presenta valores comprendidos entre 0.83-3.00 para cueva Mirado o Kubler, 0.68-7.33 para cueva Gallardo y 0.83-17 para cueva Galla Zoila. Los valores de RMR, para la cueva Mirador Kubler se encuentran en el

orden de 57-67, para cueva Gallardo 44-61 y para cueva Galla Zoila desde 41 a 69 (Tabla 5). Los subparámetros del método CGI, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 4. Parámetros geomecánicos característicos del índice Q y dimensiones de estudios de tubos de lava en las Islas Galápagos, Ecuador.

| Ubicación | | Sector | Dimensiones | Calidad del macizo rocoso Índice Q | | | | | | Código | Descripción Visual | |
|--------------------|------------------|--------|-------------|------------------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------------|-----------|
| País | Cueva | | | Ancho (m) | RQD (%) | J _n | J _r | J _a | J _w | | | SRF |
| Galápagos, Ecuador | Mirador o Kubler | EG#1 | 6.4 | 78 | 2x9 | 3 | 2 | 1 | 5 | 1.30 | 1 | Estable |
| | | EG#2 | 6.3 | 50 | 2x9 | 3 | 2 | 1 | 5 | 0.83 | 2 | Estable |
| | | | 6.3 | 50 | 2x9 | 3 | 1 | 1 | 5 | 1.67 | 2 | Estable |
| | | EG#3 | 8.4 | 90 | 2x9 | 3 | 2 | 1 | 5 | 1.50 | 3 | Estable |
| | | | 8.4 | 90 | 2x9 | 3 | 1 | 1 | 5 | 3.00 | 3 | Estable |
| | | EG#4 | 7 | 80 | 9 | 3 | 3 | 1 | 5 | 1.78 | 4 | Estable |
| Galápagos, Ecuador | Gallardo | EG#1 | 11 | 82 | 2x9 | 3 | 4 | 1 | 5 | 0.68 | 5 | Estable |
| | | EG#2 | 5.8 | 82 | 9 | 3 | 4 | 1 | 2.5 | 2.73 | 6 | Estable |
| | | EG#3 | 5 | 82 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 6.83 | 7 | Estable |
| | | EG#4 | 5.8 | 85 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 7.10 | 8 | Estable |
| | | EG#5 | 5 | 75 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 6.25 | 9 | Estable |
| | | EG#6 | 8.9 | 88 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 7.33 | 10 | Estable |
| | | EG#7 | 8 | 88 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 7.33 | 11 | Estable |
| | | EG#8 | 6.4 | 88 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 7.33 | 12 | Estable |
| | | EG#9 | 8 | 88 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 7.33 | 13 | Estable |
| | | EG#10 | 8.5 | 100 | 9 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1.67 | 14 | Inestable |
| | | EG#11 | 10 | 100 | 9 | 3 | 4 | 1 | 5 | 1.67 | 15 | Inestable |
| | | EG#12 | 4.8 | 100 | 9 | 3 | 4 | 1 | 5 | 3.33 | 16 | Estable |
| | | | 6 | 100 | 9 | 3 | 4 | 1 | 2.5 | 3.33 | 16 | Estable |
| | | EG#13 | 6.6 | 100 | 9 | 3 | 4 | 1 | 2.5 | 3.33 | 17 | Inestable |
| | | EG#14 | 6.5 | 95 | 9 | 3 | 4 | 1 | 2.5 | 3.17 | 18 | Estable |
| EG#15 | 7 | 95 | 2x9 | 3 | 2 | 1 | 5 | 1.58 | 19 | Estable | | |
| Galápagos, Ecuador | Galla Zoila | EG#1 | 4.3 | 85 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 14.2 | 20 | Estable |
| | | EG#2 | 4.8 | 80 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 13.33 | 21 | Estable |
| | | EG#3 | 2.7 | 75 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 12.5 | 22 | Estable |
| | | EG#4 | 3.2 | 75 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 12.5 | 23 | Estable |
| | | EG#5 | 4.5 | 87 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 14.5 | 24 | Estable |
| | | EG#6 | 4.5 | 60 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 10 | 25 | Estable |
| | | EG#7 | 3.3 | 60 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 10 | 26 | Estable |
| | | EG#8 | 4.5 | 100 | 9 | 3 | 1 | 1 | 1 | 33.33 | 27 | Inestable |
| | | EG#9 | 4 | 65 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 10.83 | 28 | Estable |
| | | EG#10 | 4.5 | 65 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 10.83 | 29 | Estable |
| | | EG#11 | 3.7 | 75 | 9 | 3 | 3 | 1 | 1 | 8.33 | 30 | Inestable |
| | | EG#12 | 4.2 | 75 | 9 | 1 | 4 | 1 | 1 | 2 | 31 | Inestable |
| | | EG#13 | 3.6 | 100 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 17 | 32 | Estable |
| | | EG#14 | 2.7 | 100 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 17 | 33 | Estable |
| | | EG#15 | 3.1 | 100 | 9 | 3 | 2 | 1 | 2.5 | 7 | 34 | Estable |
| | | | 3.1 | 100 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 | 17 | 34 | Estable |
| EG#16 | 2.57 | 50 | 2x9 | 3 | 4 | 1 | 2.5 | 0.83 | 35 | Estable | | |

210
211
212

213
214

Tabla 5. Parámetros característicos geomecánicos de la RMR y estudios de dimensiones de tubos de lava en las Islas Galápagos, Ecuador.

| Ubicación | | Sector | Dimensiones | Clasificación Geomecánica RMR | | | | | | Código | Descripción Visual | |
|--------------------|------------------|--------|-------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------------------|------------------|
| País | Cueva | | | Ancho (m) | RMR ₁ | RMR ₂ | RMR ₃ | RMR ₄ | RMR ₅ | | | RMR _b |
| Galápagos, Ecuador | Mirador o Kubler | EG#1 | 6.4 | 3 | 16 | 8 | 15 | 15 | 57 | 1 | Estable | |
| | | EG#2 | 6.3 | 12 | 10 | 8 | 19 | 15 | 64 | 2 | Estable | |
| | | | 6.3 | | | | | | | | 2 | Estable |
| | | EG#3 | 8.4 | 4 | 18 | 10 | 20 | 15 | 67 | 3 | Estable | |
| | | | 8.4 | | | | | | | 3 | Estable | |
| | | EG#4 | 7 | 4 | 16 | 9 | 18 | 15 | 62 | 4 | Estable | |
| Galápagos, Ecuador | Gallardo | EG#1 | 11 | 3 | 16 | 10 | 10 | 10 | 49 | 5 | Estable | |
| | | EG#2 | 5.8 | 3 | 16 | 10 | 10 | 10 | 49 | 6 | Estable | |
| | | EG#3 | 5 | 3 | 16 | 10 | 10 | 10 | 49 | 7 | Estable | |
| | | EG#4 | 5.8 | 3 | 17 | 9 | 10 | 4 | 43 | 8 | Estable | |
| | | EG#5 | 5 | 3 | 15 | 11 | 10 | 4 | 43 | 9 | Estable | |
| | | EG#6 | 8.9 | 2 | 17 | 10 | 11 | 4 | 44 | 10 | Estable | |
| | | EG#7 | 8 | 2 | 17 | 10 | 11 | 4 | 44 | 11 | Estable | |
| | | EG#8 | 6.4 | 2 | 17 | 10 | 11 | 4 | 44 | 12 | Estable | |
| | | EG#9 | 8 | 3 | 17 | 10 | 11 | 7 | 48 | 13 | Estable | |
| | | EG#10 | 8.5 | 3 | 20 | 11 | 11 | 5 | 50 | 14 | Inestable | |
| | | EG#11 | 10 | 3 | 20 | 11 | 11 | 7 | 52 | 15 | Inestable | |
| | | EG#12 | 4.8 | 3 | 20 | 11 | 11 | 7 | 52 | 16 | Estable | |
| | | | 6 | 3 | 20 | 11 | 11 | 7 | 52 | 16 | Estable | |
| | | EG#13 | 6.6 | 3 | 20 | 11 | 11 | 7 | 52 | 17 | Inestable | |
| | | EG#14 | 6.5 | 3 | 19 | 16 | 12 | 7 | 57 | 18 | Estable | |
| EG#15 | 7 | 3 | 19 | 10 | 22 | 7 | 61 | 19 | Estable | | | |
| Galápagos, Ecuador | Galla Zoila | EG#1 | 4.3 | 4 | 16 | 20 | 20 | 4 | 59 | 20 | Estable | |
| | | EG#2 | 4.8 | 4 | 16 | 20 | 20 | 4 | 59 | 21 | Estable | |
| | | EG#3 | 2.7 | 4 | 15 | 20 | 20 | 4 | 58 | 22 | Estable | |
| | | EG#4 | 3.2 | 4 | 15 | 21 | 21 | 7 | 62 | 23 | Estable | |
| | | EG#5 | 4.5 | 2 | 17 | 19 | 19 | 10 | 63 | 24 | Estable | |
| | | EG#6 | 4.5 | 2 | 12 | 19 | 19 | 10 | 50 | 25 | Estable | |
| | | EG#7 | 3.3 | 2 | 12 | 19 | 19 | 10 | 50 | 26 | Estable | |
| | | EG#8 | 4.5 | 2 | 20 | 16 | 16 | 7 | 56 | 27 | Inestable | |
| | | EG#9 | 4 | 2 | 13 | 12 | 12 | 7 | 41 | 28 | Estable | |
| | | EG#10 | 4.5 | 2 | 13 | 12 | 12 | 7 | 41 | 29 | Estable | |
| | | EG#11 | 3.7 | 2 | 15 | 14 | 14 | 7 | 53 | 30 | Inestable | |
| | | EG#12 | 4.2 | 4 | 15 | 18 | 18 | 7 | 51 | 31 | Inestable | |
| | | EG#13 | 3.6 | 4 | 20 | 20 | 20 | 10 | 69 | 32 | Estable | |
| | | EG#14 | 2.7 | 4 | 20 | 20 | 20 | 10 | 69 | 33 | Estable | |
| | | EG#15 | 3.1 | 4 | 20 | 20 | 20 | 10 | 69 | 34 | Estable | |
| | | | 3.1 | | | | | | | | 34 | Estable |
| EG#16 | 2.57 | 4 | 10 | 18 | 18 | 7 | 46 | 35 | Estable | | | |

Tabla 6. Parámetros característicos geomecánicos del CGI y estudios de dimensiones de tubos de lava en las Islas Galápagos, Ecuador.

221
222

| Ubicación | Sector | Dimensiones | | | | Índice Geomecánico de Cuevas | | | | Código | Tipo | | | | | | |
|--------------------|--------------------|-------------|-----------|---------|------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|--------|------|--------------|--------|-----------|---------|-----------|-----------|
| | | Cueva | Ancho (m) | Luz (m) | Área (m ²) | Perímetro (m) | Radio Hidráulico (m) | Forma del Techo | Espesor del Techo (m) | | | RMR Peso (%) | CTPeso | HR Peso | CS Peso | CGI | |
| Galápagos, Ecuador | Mirador o Kubler | EM01 | 6.4 | 19 | 121.6 | 50.8 | 2.394 | Planar | 1 | 30 | 0 | 0 | 4 | 34 | 1 | Estable | |
| | | EM02 | 6.3 | 19 | 119.7 | 50.6 | 2.366 | Planar | 3.6 | 45 | 2 | 0 | 4 | 51 | 2 | Estable | |
| | | EM03 | 8.4 | 24.8 | 208.32 | 66.4 | 3.137 | Arco | 1.5 | 45 | 0 | 0 | 10 | 55 | 3 | Estable | |
| | Galápagos, Ecuador | EM04 | 7 | 48 | 336 | 110 | 3.055 | Planar | 1 | 45 | 0 | 0 | 4 | 49 | 4 | Estable | |
| | | | 11 | 25 | 275 | 72 | 3.819 | Planar | 5 | 30 | 2 | 0 | 4 | 36 | 4 | Estable | |
| | | Gallardo | EG01 | 5.8 | 61 | 353.8 | 133.6 | 2.648 | Arco | N/A | 30 | N/A | 0 | 10 | N/A | 5 | N/A |
| | | | | 5 | N/A | N/A | N/A | N/A | Planar | N/A | N/A | 30 | N/A | N/A | 4 | N/A | 6 |
| | | | EG03 | 5.8 | 100 | 580 | 211.6 | 2.741 | Planar | N/A | 30 | N/A | 0 | 4 | N/A | 7 | N/A |
| | | | EG04 | 5 | 50 | 250 | 110 | 2.273 | Planar | N/A | 30 | N/A | 0 | 4 | N/A | 8 | N/A |
| | | | EG05 | 8.9 | 47 | 418.3 | 111.8 | 3.742 | Planar | 10 | 30 | 5 | 0 | 4 | 39 | 9 | Inestable |
| | | | EG06 | 8 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 10.5 | 30 | 5 | N/A | 10 | N/A | 10 | N/A |
| | | | EG07 | 6.4 | N/A | N/A | N/A | N/A | Planar | 9.8 | 30 | 5 | N/A | 4 | N/A | 11 | N/A |
| | | | EG08 | 6.4 | N/A | N/A | N/A | N/A | Planar | 10.5 | 30 | 5 | N/A | 4 | N/A | 12 | N/A |
| | | | EG09 | 8 | N/A | N/A | N/A | N/A | Planar | 9.8 | 30 | 5 | N/A | 4 | N/A | 13 | N/A |
| | | | EG10 | 8.5 | 55 | 467.5 | 127 | 3.681 | Planar | 5.6 | 30 | 2 | 0 | 4 | 36 | 14 | Inestable |
| Galápagos, Ecuador | Galla Zoila | EG11 | 10 | N/A | N/A | N/A | N/A | Planar | 5.6 | 30 | 2 | N/A | 4 | N/A | 15 | N/A | |
| | | EG12 | 4.8 | 40 | 192 | 89.6 | 2.143 | Arco | 5.6 | 30 | 2 | 0 | 10 | 42 | 16 | Estable | |
| | | 6 | 40 | 240 | 92 | 2.609 | Arco | 5.6 | 30 | 2 | 0 | 10 | 42 | 16 | Estable | | |
| | | EG13 | 6.6 | N/A | N/A | N/A | N/A | Planar | 5.5 | 30 | 2 | N/A | 4 | N/A | 17 | N/A | |
| | | EG14 | 6.5 | 80 | 520 | 173 | 3.006 | Arco | 5.3 | 30 | 2 | 0 | 10 | 42 | 18 | Estable | |
| | | EG15 | 7 | 40 | 280 | 94 | 2.979 | Arco | 2 | 45 | 0 | 0 | 10 | 55 | 19 | Estable | |
| | | 7 | 40 | 280 | 94 | 2.979 | Arco | 3.8 | 45 | 2 | 0 | 10 | 57 | 19 | Estable | | |
| | | EG-G-001 | 4.3 | 40 | 172 | 88.6 | 1.941 | Arco | 14.6 | 30 | 5 | 0 | 10 | 45 | 20 | Estable | |
| | | EG-G-002 | 4.8 | 40 | 192 | 89.6 | 2.143 | Arco | 14.7 | 30 | 5 | 0 | 10 | 45 | 21 | Estable | |
| | | EG-G-003 | 2.7 | 40 | 108 | 85.4 | 1.265 | Arco | 18.8 | 30 | 5 | 15 | 10 | 60 | 22 | Estable | |
| | | EG-G-004 | 3.2 | 40 | 128 | 86.4 | 1.481 | Arco | 15.2 | 45 | 5 | 15 | 10 | 75 | 23 | Estable | |
| | | EG-G-005 | 4.5 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 12.2 | 45 | 5 | N/A | 10 | N/A | 24 | N/A | |
| | | EG-G-006 | 4.5 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 9.6 | 30 | 5 | N/A | 10 | N/A | 25 | N/A | |
| | | EG-G-007 | 3.3 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 12.8 | 30 | 5 | N/A | 10 | N/A | 26 | N/A | |
| | | EG-G-008 | 4.5 | 10 | 45 | 29 | 1.552 | Arco | 13.1 | 30 | 5 | 15 | 10 | 60 | 27 | Inestable | |
| EG-G-009 | 4 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 9.7 | 30 | 5 | N/A | 10 | N/A | 28 | N/A | | | |
| EG-G-010 | 4.5 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 4.7 | 30 | 2 | N/A | N/A | N/A | 29 | N/A | | | |
| EG-G-011 | 3.7 | 30 | 111 | 67.4 | 1.647 | Arco | 9.9 | 30 | 5 | 15 | 10 | 60 | 30 | Inestable | | | |
| EG-G-012 | 4.2 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 10.6 | 30 | 5 | 0 | 10 | 45 | 31 | Inestable | | | |
| EG-G-013 | 3.6 | 40 | 144 | 87.2 | 1.651 | Planar | 11.4 | 45 | 5 | 15 | 4 | 69 | 32 | Estable | | | |
| EG-G-014 | 2.7 | N/A | N/A | N/A | N/A | Arco | 7.5 | 45 | 2 | N/A | 10 | N/A | 33 | Estable | | | |
| EG-G-015 | 3.1 | 40 | 124 | 86.2 | 1.439 | Arco | 2.6 | 45 | 0 | 15 | 10 | 70 | 34 | Estable | | | |
| EG-G-016 | 2.57 | 40 | 102.8 | 85.14 | 1.207 | N/A | 3.5 | 30 | 2 | 15 | N/A | N/A | 35 | N/A | | | |

223

Sucesivamente se realizó un análisis comparativo entre los valores de índice Q, RMR y CGI versus Luz libre

En la figura 3, se presentan las cuevas que clasifican como Estables, transición e Inestables de acuerdo con los resultados obtenidos en el índice de Q (L. Bordehore, 2017), se aprecia que la mayoría de las estaciones clasifican como Estables. La Figura 3 muestra cuevas que en la realidad se aprecian o definen visualmente como Inestables (círculo con relleno) pero están en el gráfico claramente en la zona Estable. Eso es preocupante pues no es un análisis que esté del lado de la seguridad. Por tanto, hay que revisar bien la metodología y puntajes considerados en otras cavidades semejantes. La Figura 4 es poco concluyente ya que al ser el RMR un índice lineal y no logarítmico como el Q muestra todas las cuevas en un rango o espectro muy reducido, por tanto, difícil de sectorizar. La figura 5 por su parte tampoco es muy concluyente, pues muestra índices CGI altos, mayores de 60 con cuevas Inestables y a la inversa índices bajos, en el entorno de 35 con cuevas Estables.

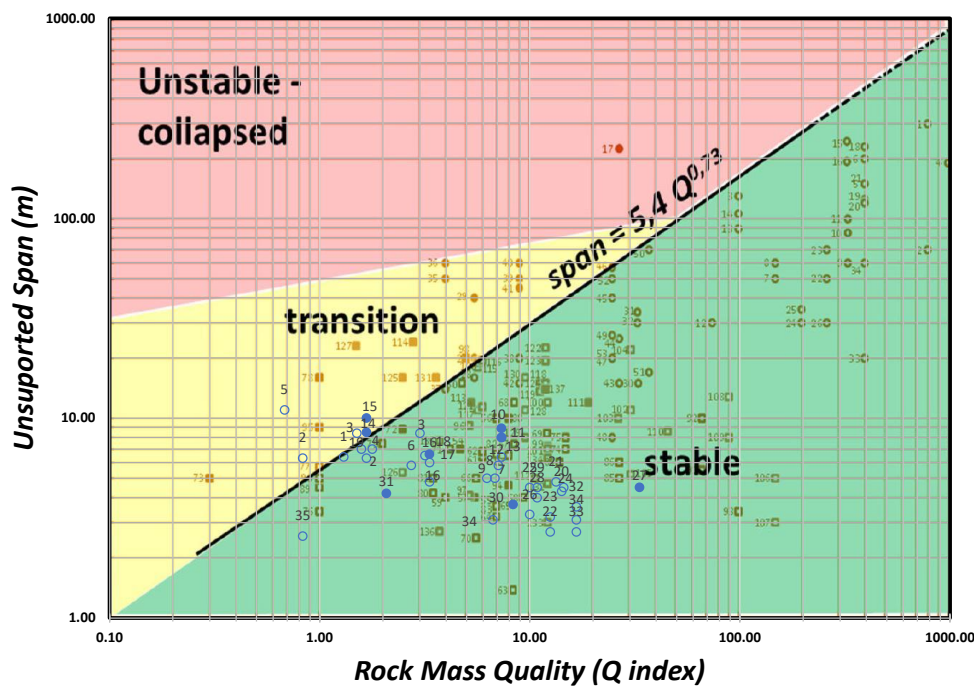
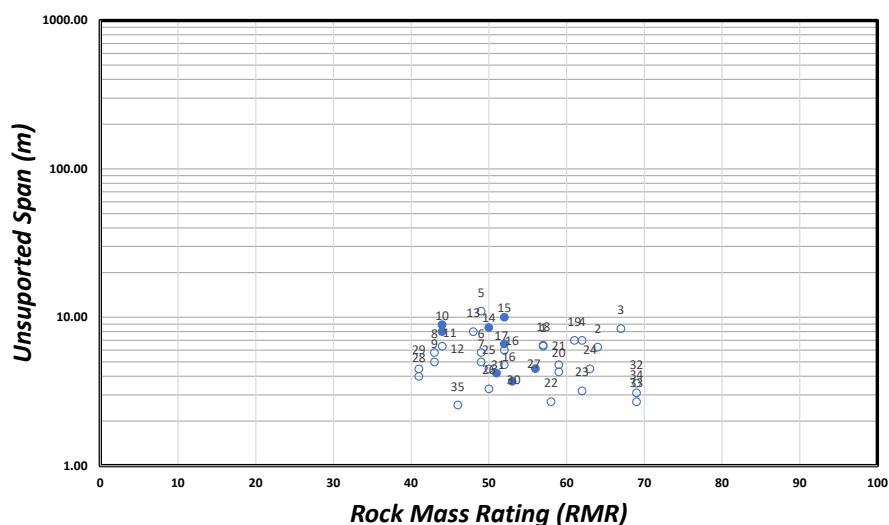


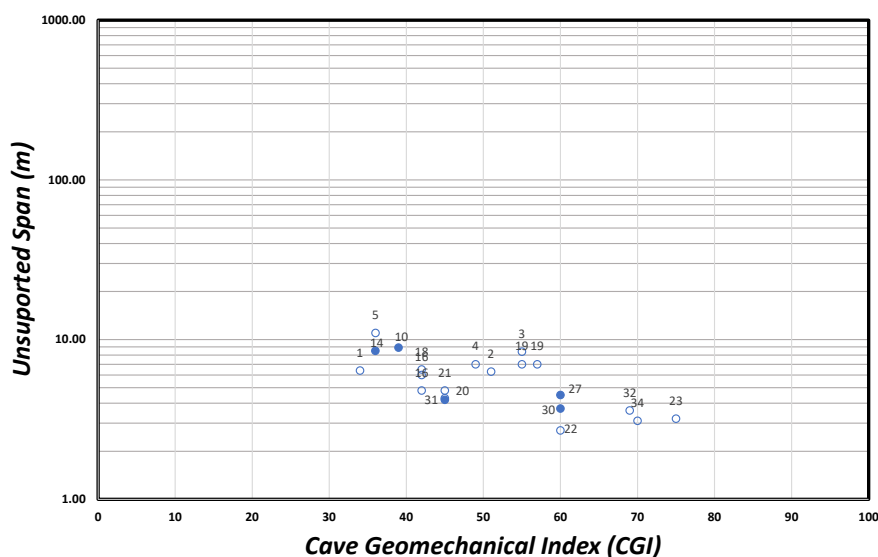
Figura 3. Gráfico de Índice Q vs Luz Libre, análisis de la estabilidad de los túneles de lava. Los círculos sin relleno representan que la Cueva es Estable, los círculos con relleno azul representan que la Cueva es Inestable (L. Bordehore, 2017).



245

Figura 4. Análisis de RMR vs Luz libre de los túneles de lava. Los círculos sin relleno representan que la Cueva es Estable, los círculos con relleno azul representan que la Cueva es Inestable.

246
247



248

Figura 5. Análisis de CGI vs Luz Libre de los túneles de lava. Los círculos sin relleno representan que la Cueva es Estable, los círculos con relleno azul representan que la Cueva es Inestable.

249
250

Se ejecutó un análisis numérico mediante elementos de contorno con en el programa Examine2D (Rocscience, 2007), para corroborar el estado de las cuevas en relación con la Figura 7, los resultados de los factores de seguridad obtenidos se resumen en la Tabla 7, junto con las características de las cuevas analizadas.

251
252
253
254

Para el análisis del estado de la cueva, se consideraron cuatro cuevas: Mirador o Kubler EG#2, Gallardo EG#6, Galla-Zoila EG#12, Galla-Zoila EG#13. Los resultados indicaron que la cueva Galla-Zoila EG#13, ubicada en la zona Estable acorde a la Figura 7, tiene un factor de seguridad igual a 2. Sin embargo, mientras las cuevas se acercan a la zona de transición, el factor de seguridad se reduce, como es el caso de Gallardo EG#6 (factor de seguridad que va entre 1.2), Galla-Zoila EG#12 (factor de seguridad entre 0.2 y 1.2) y Mirador o Kubler EG#2 (factor de seguridad entre 0.2 y 0.6).

255
256
257
258
259
260
261

Tabla 7. Parámetros de entrada utilizados en el programa Examine 2D.

262

| Cueva | Ancho (m) | Altura (m) | Espesor del Techo (m) | Peso Unitario de sobrecarga (MN/m3) | Em (MPa) | Coefficiente de Poisson | Fuerza Intacta Compacta (MPa) | GSi | mi | D | F. S |
|-----------------------|-----------|------------|-----------------------|-------------------------------------|----------|-------------------------|-------------------------------|-----|----|---|-----------|
| Mirador o Kubler EG#2 | 6.3 | 6.6 | 3.6 | 0.026 | 12000 | 0.32 | 45 | 79 | 25 | 0 | 0.2 - 0.6 |
| Gallardo EG# 6 | 8.9 | 7.5 | 10 | 0.028 | 6668 | 0.32 | 37.3 | 60 | 25 | 0 | 1.2 |
| Galla-Zoila EG#12 | 4.2 | 2.6 | 10.6 | 0.028 | 6668 | 0.32 | 27.5 | 70 | 25 | 0 | 0.2 - 1.2 |
| Galla-Zoila EG#13 | 3.6 | 2.6 | 11.4 | 0.028 | 6668 | 0.32 | 27.5 | 80 | 25 | 0 | 2 |

263

Es importante señalar que deberíamos diferenciar Factor de Seguridad ante el “colapso” de la cueva y factores de seguridad ante el desprendimiento de algunas lajas. Si nos fijamos en las imágenes a y c de la **Figura 6**, vemos en general que la cueva tiene unos factores de seguridad por encima de 1 (colores verdes). Pero hay puntos concretos en los que puede haber pequeños efectos tensionales y lajas que se desprendan. Eso no compromete la estabilidad global del tubo de lava, sino que pone de manifiesto que puede haber pequeñas inestabilidades localizadas que es preciso monitorear. Los factores de seguridad obtenidos se han superpuestos en la **Figura 8**. Se puede observar que las cuevas más centradas en la zona Estable tienen factores de seguridad más elevados que los ubicados en las zonas cercanas a transición.

264

265

266

267

268

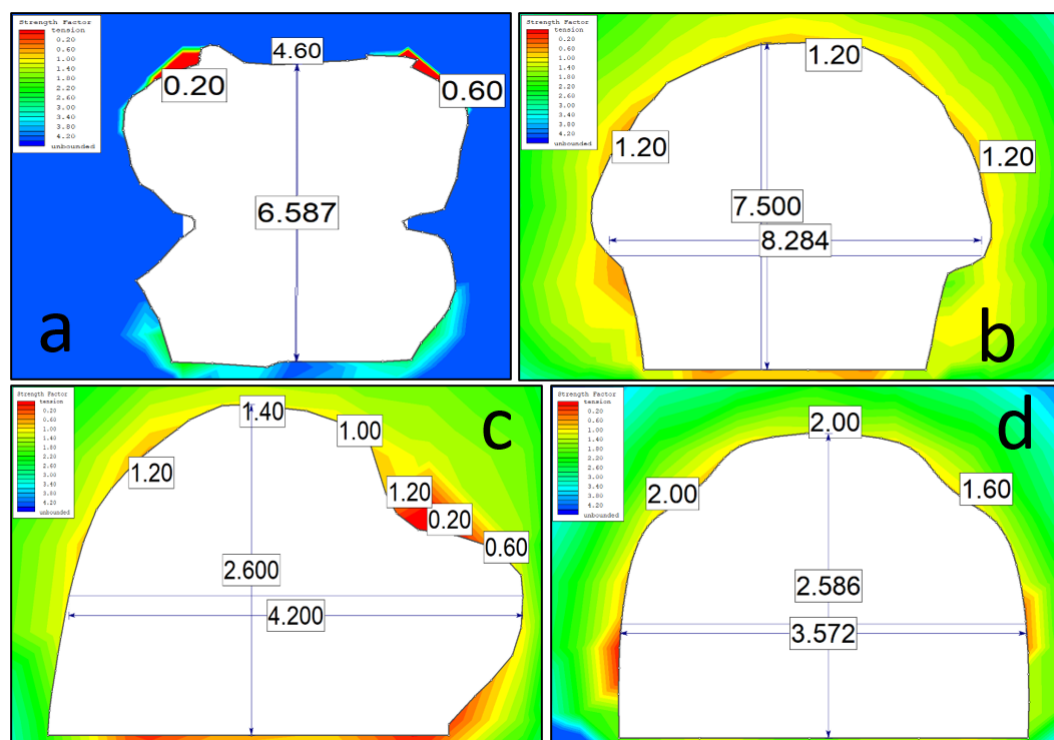
269

270

271

272

273



274

Figura 6. Análisis en EXAMINE 2D: a) cueva Mirador o Kubler EG#2; b) cueva Gallardo EG#6; c) cueva Galla-Zoila EG#12; d) Cueva Galla-Zoila EG#13

275

276

4. Discusión

Con los valores obtenidos, se determinó la estabilidad de las cuevas, este análisis se ha resumido en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Comparación de métodos de análisis de estabilidad de cuevas.

| Cueva | Índice Q | CGI | Modelo Numérico | Descripción Visual |
|-----------------------|------------|------------|-----------------|--------------------|
| Mirador o Kubler EG#1 | Estable | Inestable | N/A | Estable |
| Mirador o Kubler EG#2 | Estable | Transición | Inestable | Estable |
| Mirador o Kubler EG#3 | Transición | Transición | N/A | Estable |
| Mirador o Kubler EG#4 | Estable | Transición | N/A | Estable |
| Gallardo EG#1 | Transición | Inestable | N/A | Estable |
| Gallardo EG#2 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#3 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#4 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#5 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#6 | Estable | Inestable | Estable | Estable |
| Gallardo EG#7 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#8 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#9 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Gallardo EG#10 | Transición | Inestable | N/A | Inestable |
| Gallardo EG#11 | Transición | N/A | N/A | Inestable |
| Gallardo EG#12 | Estable | Transición | N/A | Estable |
| Gallardo EG#13 | Estable | N/A | N/A | Inestable |
| Gallardo EG#14 | Estable | Transición | N/A | Estable |
| Gallardo EG#15 | Estable | Transición | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#1 | Estable | Transición | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#2 | Estable | Transición | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#3 | Estable | Estable | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#4 | Estable | Estable | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#5 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#6 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#7 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#8 | Estable | Estable | N/A | Inestable |
| Galla Zoila EG#9 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#10 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#11 | Estable | Estable | N/A | Inestable |
| Galla Zoila EG#12 | Estable | Transición | Inestable | Inestable |
| Galla Zoila EG#13 | Estable | Estable | Estable | Estable |
| Galla Zoila EG#14 | Estable | N/A | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#15 | Estable | Estable | N/A | Estable |
| Galla Zoila EG#16 | Estable | N/A | N/A | Estable |

* Los valores de CGI entre 40-60 se clasifican como Transición, los valores de CGI superiores a 60 se consideran Estables y los valores de CGI inferiores a 40 se consideran Inestables.

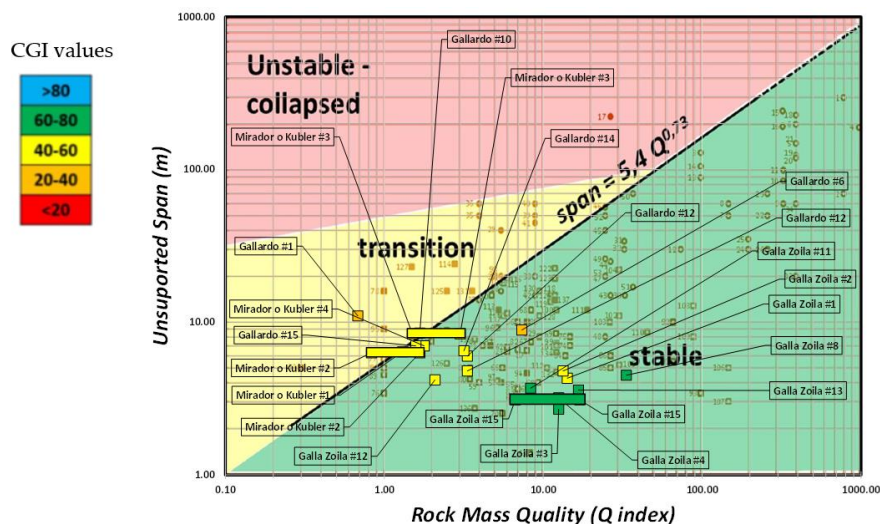
* El Modelo Número se analiza de la siguiente manera: si $FS > 1$, el tubo de lava se considera Estable, sin embargo, si $FS < 1$ el tubo de lava se considera Inestable.

* El Índice Q se analiza en función de la Figura 3, los valores se clasifican en Estable, Transición e Inestable según la zona en la que se encuentren.

La **Figura 7** sintetiza los resultados obtenidos con las dos metodologías geomecánicas: la del índice Q y la del CGI sobre la imagen generalista para cuevas de toda índole kársticas y volcánicas, Jordá (2017). Lo esperable es que coincidan Q y CGI tal y como vemos de algunas cuevas, por ejemplo, valores de CGI en verde (60-80) dentro de la zona verde, Estable del gráfico, así como cuevas en amarillo – naranja (CGI 60 – 20) en las zonas

de transición del gráfico (amarillo en la Figura Q – Luz). Lo que plantea problemas y son resultados que están del lado de la inseguridad es el hecho de encontrar cuevas Inestables o que se predicen Inestables que caen en la zona verde – Estable del gráfico Q-Luz.

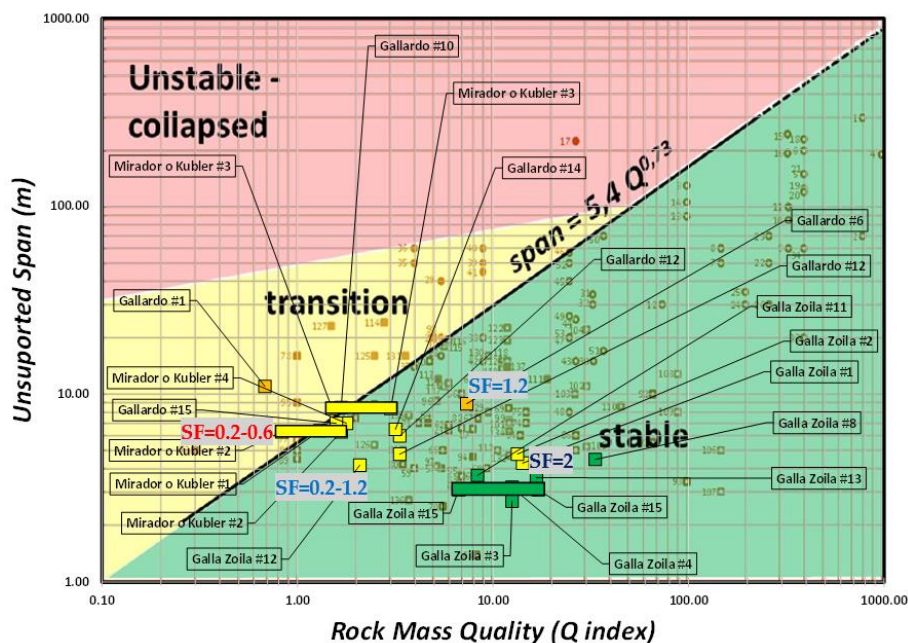
289
290
291
292



293

Figura 7. Comparación entre valores de CGI, Índice Q y estabilidad de las cuevas.

294



295

Figura 8. Factores de seguridad en las cuevas analizadas.

296

Por otro lado, en la Figura 8 se muestran sobreimpresos en el grafico Q – Luz, los valores de Factor de Seguridad de los 4 modelos numéricos realizados aparecen Factores de Seguridad crecientes hacia la esquina inferior derecha (que es lo esperable) – lo que implica en ambos enfoques mayor estabilidad. El FOS o SF inferior a 1 aparece en la zona de transición, y dos FS de 1.2 paralelos a la línea límite y un valor FS de 2 lejos de esta. Estos puntos analizados sugieren que podrían trazarse isolíneas de Factor de seguridad, como ya planteaban Jorda y Toulkeridis (2016). La línea de trabajo que vendrá será realizar muchos más cálculos para trazar estas zonas y enriquecer la base de datos.

297
298
299
300
301
302
303
304
305

Los resultados obtenidos del análisis de estabilidad en función del índice Q , CGI, modelado numérico y mediante inspección visual han sido sintetizados en la **Tabla 8**. El análisis realizado en función del índice Q , muestra mayor similitud con la descripción visual de la estabilidad de las cuevas.

5. Conclusiones

Las metodologías utilizadas exhibieron diferentes puntos de vistas para el análisis de estabilidad de tubos de lava. Los gráficos de comparación de los métodos realizados mostraron semejanzas con respecto a la descripción visual, sin embargo, el método de estabilidad en función del índice Q , fue el más cercano a la descripción realizada en campo.

Los valores obtenidos del CGI, fueron menos conservadores que los obtenidos mediante el índice Q , la inspección visual y los realizados por métodos numéricos, además en algunas de las cuevas, no se obtuvieron los parámetros de entrada requeridos para su análisis por este método.

Basados en los resultados obtenidos, la mejor opción para analizar la estabilidad de los tubos de lava fue el método de clasificación geomecánica el índice Q , ya que dichos valores están mejor respaldados por los datos de la inspección visual y los modelos numéricos, además tienen concordancia con los resultados obtenidos del CGI.

Author Contributions: “Conceptualization, GB, OS, MM AND LJ.; methodology, GB, OS and L.; software, GB, OS and LJ; validation, GB, OS and LJ.; formal analysis, GB and OS.; investigation, GB, OS, MM and LJ.; writing—original draft preparation, GB and OS.; writing—review and editing, GB, OS, MM and LJ.; supervision, MM AND LJ.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”.

Funding: This research is part of the master thesis of the Geotechnics master of the Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) de la Escuela Superior Politecnica del Litoral (ESPOL) de Guayaquil - Ecuador”.

Acknowledgments: The authors are grateful for the help of the Research department of ESPOL.

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

Bibliografía

- Addison, A. (2011). *Galápagos - Caving the Equator*. National Speleological Society. 339
- Barton, N., & Bieniawski, Z. (2008). RMR and Q-setting records straight. *Tunnelling international, tunnelonline.info*,. 340
- Barton, N., & Grimstad, E. (2004). *The Q System following thirty years of development and application in tunnelling projects*. In: Schubert W (ed) *Eurorock 2004 and 53rd geomechanics Colloquium, Austrian Society for Rock Mechanics - International Society for Rock Mechanics (ISRM)*. 341
- Barton, N., & Grimstad, E. (2014). *Q-system-An illustrated guide following forty years in tunnelling*. www.nickbarton.com 342
- Bieniawski. (1989). Engineering Rock Mass Classification. In *Engineering Rock Mass Classification*. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64994-7> 343
- Bieniawski, Z. (1973). *Engineering Classification of jointed rock masses*. 344
- Bieniawski, Z. (1974). *Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling*. In: National Academy of Sciences (ed.) *Advances in rock mechanics 2(A), National Academy of Sciences, Washington DC*. 345
- Bieniawski, Z. (1979). *The geomechanics classification in rock engineering applications*. In: *Reprinted from Proceedings of the 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics. ISRM, Montreux. Balkema, Boston*. 346
- Bieniawski, Z. (1997). *Quo vadiss Rock Mass Classification*. Viena, Erock 97. Workshop Felsbau. 347
- Bieniawski, Z. (2011). *Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección*. 348
- Bordehore, L. (2017). Stability Assessment of Natural Cuevas Using Empirical Approaches and Rock Mass Classifications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(8), 14. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1216-0> 349
- Bordehore, L., & Toulkeridis, T. (2016). Stability assessment of volcanic natural Cuevas - Lava tunnels - Using both empirical and numerical approach, case studies of Galapagos Islands (Ecuador) and Lanzarote Island (Canary - Spain). *ISRM International Symposium - EUROCK 2016*, 835–839. <https://doi.org/10.1201/9781315388502-144> 350
- Bordehore, Luis, Toulkeridis, T., Romero-Crespo, P. L., Jordá-Bordehore, R., & García- Garizabal, I. (2016). Stability assessment of volcanic lava tubes in the Galápagos using engineering rock mass classifications and an empirical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 89, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.08.005> 351
- Brandi, I. V., Barbosa, M. R., Barata, A., Paula, R. G. De, Correa, T., Mota, H., Lima, D., Osborne, R. A., Vale, S. A., Lima, N., & Gerais, M. (2021). *Cueva Geomechanical Index (CGI). Classification and Contribution to the Conservation of Natural Cuevas in the Iron Mines*. 3(2), 134–161. <https://doi.org/10.30486/gcr.2021.1908888.1033> 352
- Calvari, S., & Pinkerton, H. (1999). Lava tube morphology on Etna and evidence for lava flow emplacement mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90(3-4), 263–280. 353
- Cornejo L, S. E. (1996). *Manual de Túneles interurbanos de carretera*. Gobierno Vasco. 354
- Geist, D., Diefenbach, B., A., F., J., D., Kurz, M., Harpp, K., & Blusztajn, J. (2008). *Construction of the Galápagos platform by large submarine volcanic terraces*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 345
- Grenier, C. (2007). Conservación contra natura. Las Islas Galápagos. In *Conservación contra natura. Las Islas Galápagos*. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.5519> 346
- Grimstad, E., & Barton, N. (1993). *Updating of the Q-System fr NTM*. In *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete- Moderns Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes. (EdsKompen, Opshal and Berg)*. Norwegian Concrete Association, Oslo. 347
- Hoek, E. (2007). *Practical rock Engineering. Set of courses notes. Shear strength of discontinuities*. 4-Dec-2014. www.rocsience.com/education/hoek_s_corner 348
- Milne, D. M. (1997). *Underground design and deformation based on surface geometry*. British Columbia. Vancouver. 349
- Montañez, S., & Sánchez, J. (2021). *Tubos de lava en las Islas Galápagos y sus posibilidades de ser considerados como análogos para potenciales refugios en la Luna o Marte*. 350

-
- Mulas, M., Cioni, R., Andronico, D., & Mundula, F. (2016). The explosive activity of the 1669 Monti Rossi eruption at Mt. Etna (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 115-133. 381
382
- R Romero Crespo, P. J. B. L. M. G. R. y A.-Z. A. M. J. B. (2016). Stability assessment of shallow limestone Cuevas through an empirical approach: application of the stability graph method to the Castañar Cueva study site (Spain). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (4). pp. 1469-1483. 383
384
385
- Rocscience. (2007). *Examine 2D 8.0. Quick start tutorial*. 386
- Romana-Ruiz, M. (2001). Recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles. 2001, 19–28. 387
- TECH, E. P. D. S. E. (2019). *Análisis de Zonas de Peligro por presencia de Túneles de Lava y Sistemas de grietas naturales en una zona de desarrollo urbano de puerto Ayora y Bellavista*. 388
389
- Vallejo, S. (2011). *Distribución de Cenizas Volcánicas Holocénicas-Tardías en la costa del Ecuador*. 267. 390
- Waltham, A. C., & Park, H. D. (2002). *Roads over lava tubes in Cheju Island, South Korea*. *Engineering geology*, 66(1-2), 53-64. 391
392