

# Aplicación de sistemas de clasificación geomecánica en una mina turística para el establecimiento de estrategias dentro del modelo 3G

Maribel Aguilar-Aguilar <sup>1,2,\*</sup>, María Jaya-Montalvo <sup>1,2</sup>, Oscar Loor-Oporto <sup>3</sup>, Héctor Andrade-Ríos <sup>3</sup>, Fernando Morante-Carballo <sup>1,4,5</sup> and Paúl Carrión-Mero <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), ESPOL Polytechnic University, Guayaquil 09015863, Ecuador

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL Polytechnic University, Guayaquil 09015863, Ecuador

<sup>3</sup> Bira Bienes Raíces S.A. (BIRA S.A.), Zaruma 071350 Zaruma, Ecuador

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, ESPOL Polytechnic University, Guayaquil 09015863, Ecuador

<sup>5</sup> Geo-Recursos y Aplicaciones GIGA, ESPOL Polytechnic University, Guayaquil 09015863, Ecuador

\* Correspondencia: maesagui@espol.edu.ec; Tel.: +593-98-286-3190.

**Resumen:** Los problemas de estabilidad en los macizos rocosos son una de las principales causas de eventos de hundimiento en áreas mineras subterráneas. Zaruma, en el Sur de Ecuador, se caracteriza por su riqueza mineral, en la que el 65% de la población depende directamente de la actividad minera artesanal. Sin embargo, la extracción de minerales, sin consideraciones técnicas y en muchos casos ilegal, ha impactado negativamente la estabilidad de los túneles generados bajo el casco urbano de la ciudad, reportándose eventos de hundimiento en los últimos años. El objetivo de este estudio es caracterizar geomecánicamente la galería principal de la mina turística "El Sexmo" utilizando dos métodos clásicos de clasificación geomecánica para la configuración de un modelo que cumpla con las 3G's (Geoturismo, Geoconservación y Geoeducación) y apoye la cultura de la sostenibilidad en todas las áreas del sector. La metodología consiste en i) el diseño de estudio de campo, ii) levantamiento geológico-geomecánico del macizo rocoso de la mina turística utilizando Rock Mass Rating (RMR) y el Índice Q-Barton, y iii) modelo 3G para el desarrollo sostenible. Los resultados revelan que el 100% del macizo rocoso de la mina turística presenta una calidad de roca clasificada como "Media" (clase III) por el método RMR, mientras que por el método Q-Barton el 92,9% del macizo rocoso obtiene una calidad "Mala", excepto la estación S05 calificada como "Muy mala". Además, el estudio propone medidas de sostenimientos para tres estaciones específicas basadas en las evaluaciones de Q-Barton, que incluyen hormigón proyectado y bulonaje, así como capas de hormigón proyectado ancladas a cerchas metálicas. La mina tiene más de 500 años y mantiene características geológicas para geoeducación en geotecnia minera. Los problemas técnicos y sociales exigen una estrategia innovadora, que en este trabajo se centra en el modelo 3G basado en la quintuple hélice de innovación. En específico, el modelo se basa en cinco pilares, i) identificación de los impactos potenciales del geoturismo (capacidad de carga), diseño de planes de geoconservación, la inclusión de nuevas tecnologías de inmersión y aprendizaje automático (sistema educativo), ii) la inclusión del geoturismo dentro de los planes académicos y fortalecer los vínculos entre los otros actores de los cuatro subsistemas (sistema político), iii) impulsar el desarrollo geoproductos y servicios de turismo sostenible (sistema económico), iv) programas de voluntariado (sistema natural) y v) participación de la comunidad mediante herramientas como talles o foros (sistema social).

**Citation:** To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Last-name

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



**Copyright:** © 2023 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/>).

**Palabras Clave:** conservación; minería artesanal; minería ilegal; MAPE; geopatrimonio minero; geoturismo; geoducción; Zaruma.

## 1. Introducción

Las cavidades son espacios abiertos subterráneos que pueden ser de origen natural y artificial [1]. La detección de estas estructuras son un desafío y juega un rol importante en la evaluación de la estabilidad del terreno [2]. Un tipo de cavidad son las generadas por la actividad minera, que se convierten en una amenaza si no han sido construidas con criterios técnicos [3].

Las galerías mineras, también conocidas como minas subterráneas, tienen varios impactos significativos en el medio ambiente y las comunidades locales. Entre ellos se encuentran el hundimiento del terreno [4,5], contaminación del agua [6–8], contaminación del aire [9], destrucción del hábitat [10], generación de desechos [11] e impactos sociales y económicos [12]. En especial, la extracción subterránea de minerales genera hundimientos y deformaciones de la superficie, que deben ser considerados en la planificación del uso del suelo [13]. La información sobre las zonas de peligros naturales asociados con los impactos de la actividad minera es esencial y sirven como base para la gestión sostenible de los recursos naturales, empleadas por los formuladores de políticas [14].

En respuesta para mitigar los impactos negativos y garantizar legados positivos para las comunidades locales, las empresas mineras de todo el mundo generalmente deben lograr una rehabilitación de alta calidad y devolver el sitio a un estado que respalde un uso de la tierra posterior a la actividad minera [15]. Las minas abandonadas pueden representar un riesgo significativo para la seguridad pública y los derrumbes asociados pueden ocurrir debido a una variedad de factores, como procesos geológicos, falta de mantenimiento o actividad humana [16]. Existen muchos casos de colapsos regionales y locales relacionado con minas abandonadas, algunos ejemplos son “La mina de Creta” (Francia) [17], Mina “Castle Fields” (Reino Unido) [18], minas de cámaras y pilares de caliza (Países bajos) [19], minas de sal (Ucrania) [20], mina de yeso (Estados Unidos) [21], minas de material de construcción como toba y puzolana (Italia) [22] y mina de siderita “Bodovalle” (España) [23].

Un paso significativo hacia la minería sostenible serían los usos no tradicionales de la mina subterránea y las tierras circundantes [24], como el almacenamiento de energía [25,26], eliminación de desechos domésticos e industriales [27], sistemas de estacionamiento inteligente en pozos verticales [28,29], instalaciones de experimentación científica [30], agricultura subterránea [31], ciudades ecológicas subterráneas [32] y rehabilitación de minas subterráneas con fines turísticos y recreativos [33].

Varias minas abandonadas pueden tener características atractivas, así como beneficios educativos, culturales y tecnológicos [34]. La conservación y regeneración de las características naturales, artificiales y sociales de los sitios mineros abandonados puede atraer el desarrollo turístico [33,35] y generar implicaciones positivas en la economía local [36].

Históricamente, las primeras formas de geoturismo se pueden rastrear en la visita a cuevas y minas [37]. El geoturismo definido como una forma de turismo basada en la comprensión y adquisición del conocimiento geológico fue propuesto por primera vez en 1995 [37–39]. Una componente del geoturismo es el Geoturismo Subterráneo [36] cuyo objetivo es explorar las características geológicas singulares en espacios subterráneos que incluye visitas a cuevas naturales, cavernas, así como túneles, minas y otras estructuras subterráneas hechas por el hombre [40–42]. En específico, el geoturismo subterráneo se ha convertido en una oportunidad para desarrollo sostenible de los sitios mineros [43] y proporciona una alternativa para las comunidades locales después de que finaliza la actividad minera [44]. Sin embargo, el geoturismo de sitios mineros es un desafío ya que

generalmente se encuentran en áreas remotas, presentan desechos antropogénicos de la actividad minera, carecen de servicios (mantenimiento), albergan fuentes de contaminación, problemas de inestabilidad del macizo rocoso [18] y son el hábitat de especies silvestres [45,46].

La estabilidad a largo plazo de las minas abandonadas normalmente involucra efectos dependientes del tiempo, incluyendo la fluencia y el deterioro gradual de las rocas (meteorización) [47,48]. Existen muchas investigaciones relacionadas a la falla y la estabilidad a largo plazo de los antiguos sitios de ingeniería subterránea, entre ellos se destaca el trabajo de Salmi, E.F. y Sellers, E.J. [49] que desarrollaron un índice empírico conocido como Abandoned Mine Instability Index (AMII), para permitir una evaluación rápida y preliminar de la inestabilidad geotécnica y los peligros de hundimiento en áreas post-mineras. El estudio de Gao et al., [50] de la antigua caverna subterránea de Longyou que aplicaron la teoría de la mecánica de rocas para evaluar su estabilidad y proponer un programa de protección. Adicionalmente, el estudio sobre las cavernas subterráneas antiguas de Heidong [51] donde realizaron la evaluación de la calidad de la roca circundante mediante Rock Mass Rating (RMR) y Q-Barton Index, identificando los tipos y mecanismo de falla de las construcciones de ingeniería antiguas.

Las clasificaciones geomecánicas son métodos empíricos que permiten realizar una evaluación preliminar del comportamiento de los macizos rocosos, cuya información genera el diseño adecuado de proyectos de ingeniería conceptual de macizos rocosos [52]. Los sistemas más utilizados para estimar las condiciones de estabilidad y las medidas de sostenimiento para muchas construcciones subterráneas son el Rock Mass Rating (RMR) [53], Q [54], Geological Strength Index (GSI) [55], Mining Rock Mass Rating (MRMR) [56] y Rock Mass index (RMi) [57]. Aunque existen varias clasificaciones de macizos rocosos, el uso de más de una clasificación es muy recomendable para tener una comprensión integral de la roca huésped y predecir el comportamiento del suelo [58].

Los sistemas de clasificaciones geomecánicas generan debate entre los geocientíficos debido a que presentan limitaciones por las incertidumbres subjetivas que poseen en su valoración [59]. Sin embargo, la clasificación geomecánica es la única base práctica para el diseño de proyectos relacionados con estructuras subterráneas complejas [58]. Principalmente, la calidad de los materiales de los macizos rocosos en las excavaciones subterráneas no puede medirse exclusivamente mediante pruebas de resistencia, sino que requieren de metodologías con enfoques holísticos que consideren varios parámetros geológicos [57].

La necesidad de reducir la subjetividad ha provocado que se generen varios estudios dedicados a comparar sistemas de clasificación y proponer enfoques de evaluación mejorados. Algunos ejemplos es el estudio de Santa, C.; Gonçalves, L. y Chaminé, H.I. [60] que presenta la comparación de las versiones GSI de 1998 y 2013, y muestra las condiciones del sistema más conservador. Además, la investigación comparativa de Hashemi, M., Moghaddas, S., Ajalloeian, R. [61] que utiliza los sistemas RMR, Q, RMi y GSI, y propone dos nuevas correlaciones para la clasificación del macizo rocoso. Finalmente, la aplicación de la teoría de Fuzzy Set [59] en el índice Rock Mass Excavability (RME) para seleccionar una técnica de tunelización adecuada y que brinda la posibilidad de utilizarlo en todos los sistemas de clasificación de ingeniería de rocas basados en índices.

La Minería Artesanal y de Pequeña Escala (ASM, por sus siglas en inglés), es un tipo de actividad caracterizada por mano de obra intensiva y baja tecnología, que comparada con la Minería a Gran Escala (LSM) tecnificada, impacta significativamente en el medio ambiente, genera peligros geológicos y compromete el bienestar de la humanidad [62,63]. La ASM produce entre el 15 y el 20 % de la producción mundial de minerales [64]. Sin embargo, este tipo de minería está marcada por problemas sociales, ambientales y políticos (por ejemplo, [65–67]), cuya mitigación está siendo investigada con mayor intensidad en la última década (por ejemplo, [68–74]).

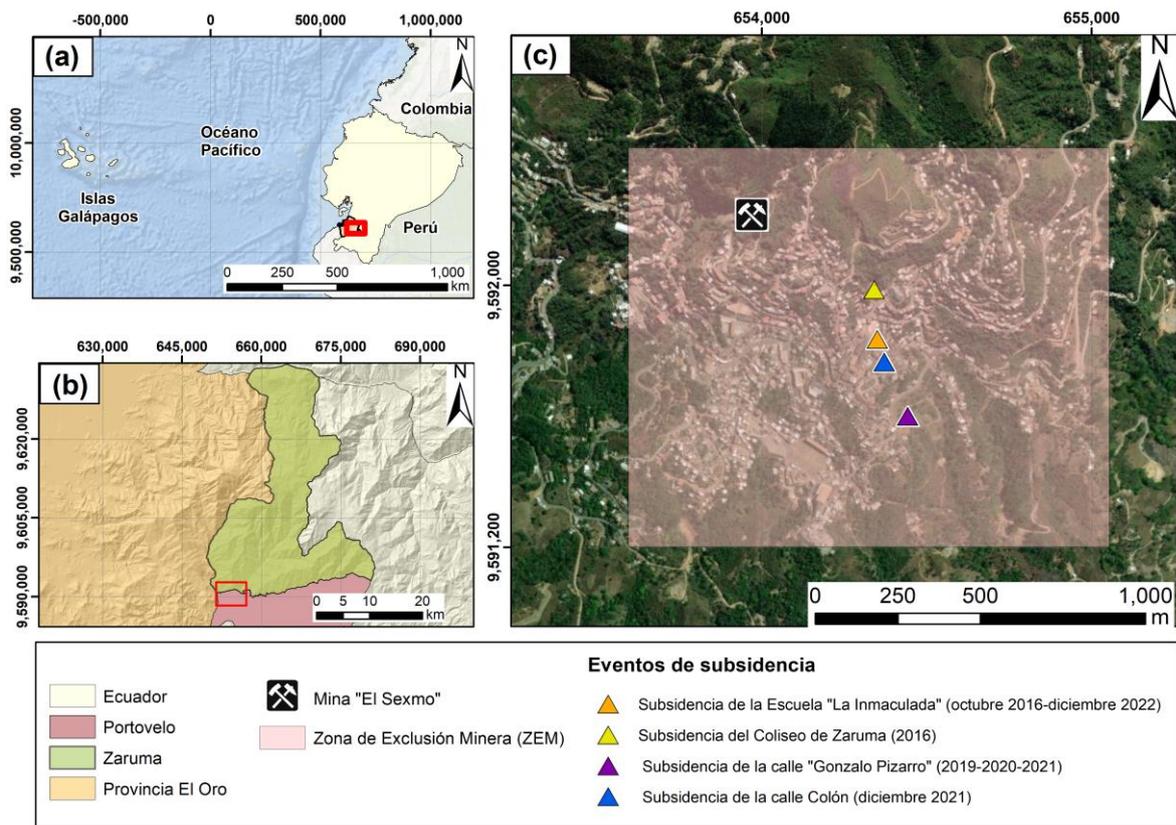
Zaruma es una ciudad minera ubicada al Suroeste del Ecuador y alberga un patrimonio geológico-minero singular [75,76]. El potencial aurífero del sector [77–79] ha permitido

el desarrollo de una intensa actividad minera de tipo ASM a través de diferentes tipos de explotaciones. Así, en el entorno de Zaruma, la minería ilegal ha producido subsidencias en diversos sectores relacionado con la presencia de cavidades y pikes abandonados, en especial en el casco urbano [80]. Muchas de estas cavidades no se encuentran inventariadas, son de difícil acceso y constituyen un riesgo geológico.

En Zaruma se han producido siete fenómenos de subsidencia de importancia desde el 2016 al 2022 (Figura 1). El primero fue la escuela “La Inmaculada” con un cono de colapso de 23 m (2016), seguido del socavón del Coliseo de Zaruma (2016), la calle Gonzalo Pizarro (2019, 2020, 2021), socavón de la Avenida Colón (2021) [80,81], y el reciente evento recurrente del 2016 en la escuela “La Inmaculada” en el año 2022. Uno de los hundimientos con mayor impacto en la sociedad fue el colapso de la escuela “La Inmaculada”. Este evento detonó el incremento de las restricciones a la actividad minera bajo del área urbana a través del decreto de Zona de Exclusión Minera (ZEM) (Acuerdo Ministerial No. 2017-002), emitido por el organismo competente del estado ecuatoriano (Ministerio de Minería). Este decreto, modificado en 2017, prohíbe la actividad minera en un área de aproximadamente 1.77 km<sup>2</sup> del entorno de la ciudad de Zaruma.

La mina turística “El Sexmo” es un icono de la historia minera del Sur del Ecuador y constituye un complejo turístico desde el 2005. La galería habilitada para el turismo tiene una longitud de 405 m, con alturas que varían entre 1,8 y 6,3 m y un ancho de galería entre 2 y 3 m. La mina ofrece a una media de 9.000 turistas al año servicios como el recorrido subterráneo, una exposición de la historia de la mina, una tienda de regalos, exposiciones de minerales típicos de la zona y espacios verdes con mirador sobre la ciudad [75]. Sin embargo, se encuentra dentro de la ZEM y el monitoreo de las propiedades geotécnicas del macizo rocoso resulta esencial para garantizar la seguridad de los turistas. Adicionalmente, dentro de los servicios del complejo turístico, es necesario fortalecer los recursos de geoeeducación que exhiban el geopatrimonio minero y la geotecnia de forma amigable para la audiencia no técnica.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar geomecánicamente la galería principal de la mina turística “El Sexmo” mediante la aplicación de dos metodologías clásicas (RMR [53] y Q-Barton Index [82]) que permitan: i) la tramificación geomecánica subterránea, ii) la definición del método más conservador en la evaluación de calidad de roca en cavidades mineras y iii) establecimiento de medidas de sostenibilidad mediante la configuración de un modelo que cumpla las 3G’s (Geoturismo, Geoconservación, Geoeeducación) con el propósito de llegar en los diferentes ámbitos de la sociedad y contribución en los cinco subsistemas de la innovación.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio: (a) Ecuador en Sudamérica y el cantón Zaruma, (b) Provincia El Oro y cantón Zaruma, (c) Eventos de subsidencia Zaruma y ubicación de la mina turística "El Sexmo".

## 2. Materiales y Métodos

La metodología de estudio tiene un enfoque mixto que combina evaluaciones cualitativas y cuantitativas en una mina turística basadas en parámetros geológico-geomecánicos que permiten plantear estrategias de Geoturismo, Geoconservación, y Geoeducación en un marco de sostenibilidad. Las fases de estudio incluyen: i) diseño de estudio de campo, ii) caracterización geomecánica de macizo rocoso en galerías aplicando método Rock Mass Rating (RMR) [53] e Índice Q-Barton [82], y iii) establecimiento de un modelo 3G's para el desarrollo sostenible (Figura 2).

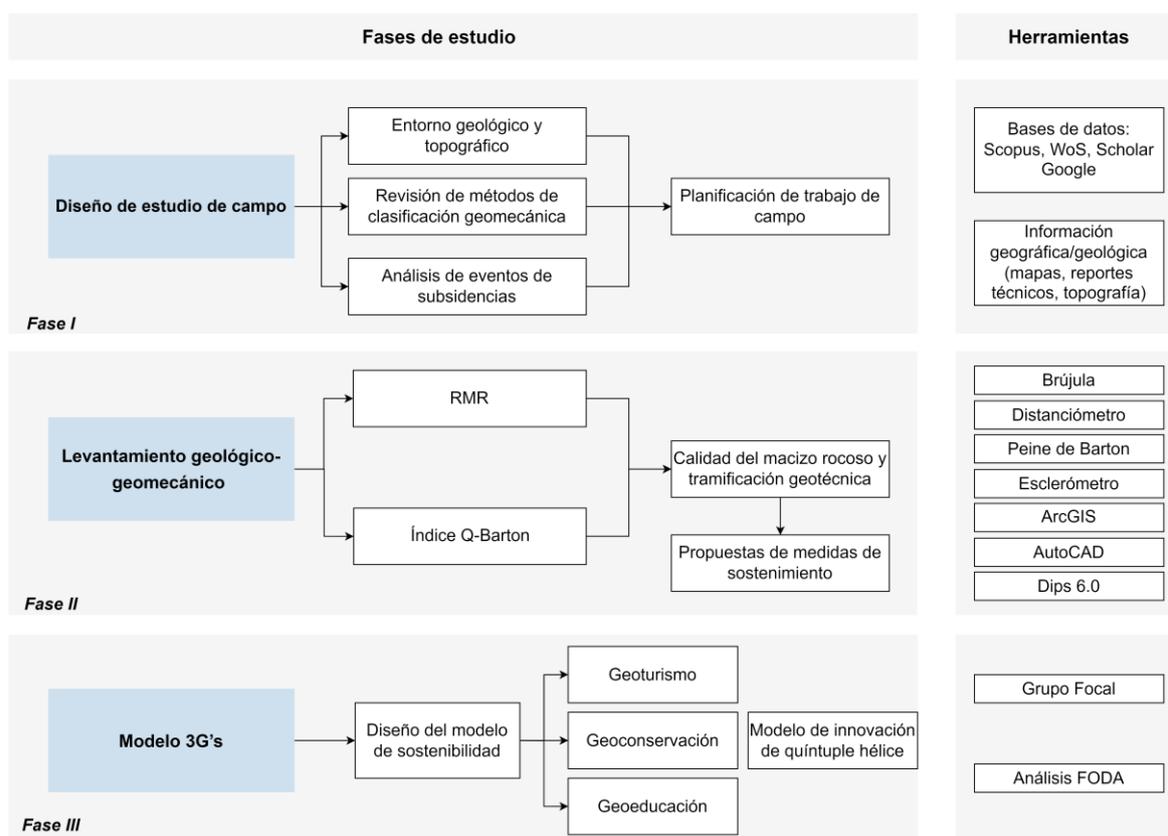


Figura 2. Esquema metodológico general del estudio.

### 2.1. Fase I: Diseño de estudio de campo

El estudio inicia con la evaluación de la problemática existente en base a la recopilación y revisión de estudios previos realizados en la zona, que incluye publicaciones científicas, reportes técnicos de organismos locales y demás literatura relacionados con el distrito minero Zaruma-Portovelo [83–86]. En concreto, en esta fase se analizó los datos geológicos-geotécnicos de proyectos de investigación desarrollados en la zona, mapas de topografía y levantamientos topográficos de galerías, así como información relevante de los eventos de subsidencia registrados hasta la fecha (área afectada, profundidad de galerías, medidas de estabilización empleadas). En base a esta información se planificaron las fases posteriores que comprenden el trabajo de campo y procesamiento de datos en softwares especializados.

### 2.2. Fase II: Levantamiento geológico-geomecánico

El levantamiento subterráneo se realizó en la galería principal habilitada para el turismo de la mina “El Sexmo” (404.8 m de longitud). En concreto, esta etapa se enfocó en el análisis geológico y geomecánico del macizo rocoso dividido en 15 estaciones (S) ubicadas en los principales cambios litológicos y de condiciones de las discontinuidades, fallas o vetas, así como zonas estabilizadas (Figura 3). Dentro de los parámetros evaluados, el estudio contempló el uso del martillo de Schmidt tipo N para realizar ensayo in-situ de Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS, por sus siglas en inglés), registrando los rebotes en campo tanto para juntas como para matriz. Adicionalmente, se seleccionaron tres puntos aleatorios para la recolección de muestras de roca (Figura 3) y posterior ensayo de laboratorio de peso específico de la roca aplicando método de densidad aparente con parafina. Cada estación fue evaluada por medio de dos metodologías específicas: i) Rock Mass Rating (RMR) [53], y ii) Índice Q-Barton [82]. El objetivo de estos métodos en el área fue zonificar la calidad de roca a profundidad, e identificar zonas que requieran medidas de estabilización.

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

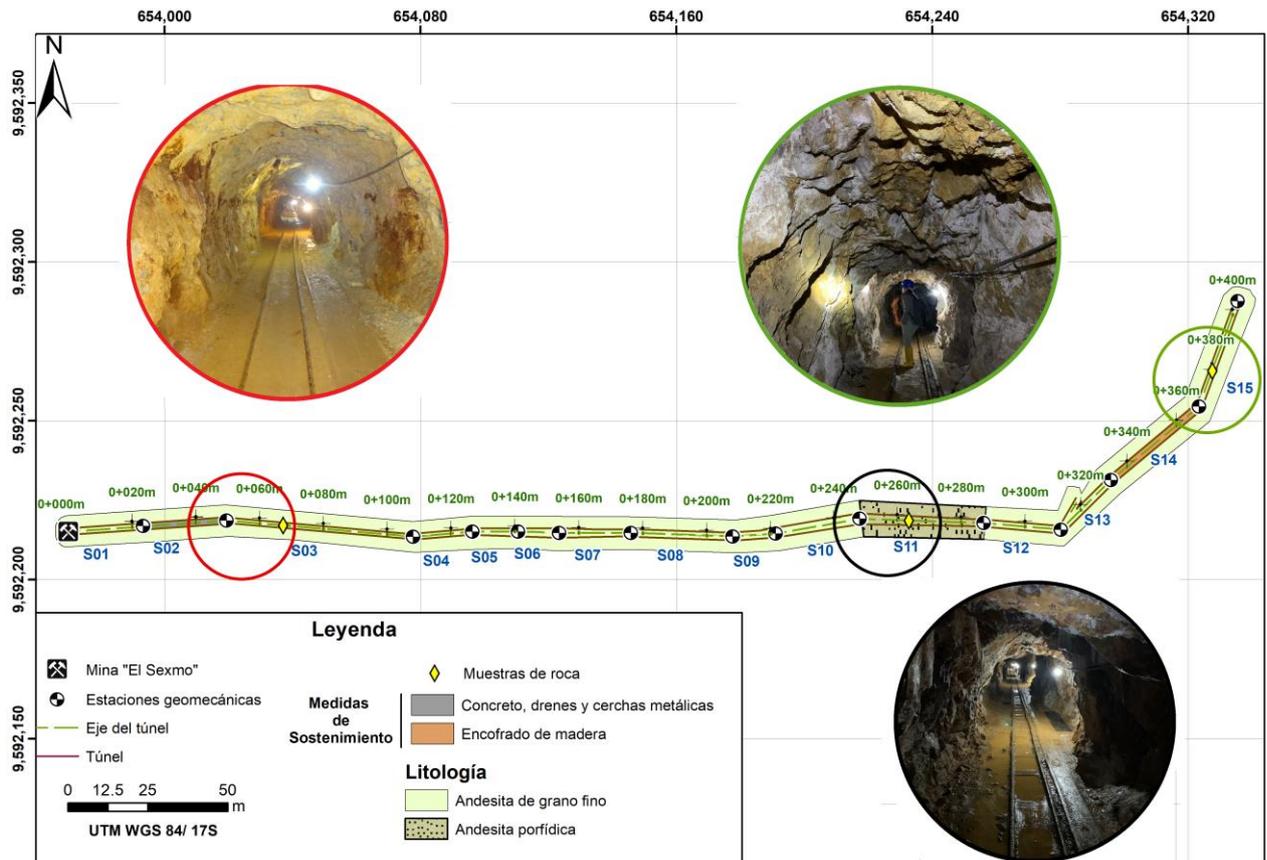


Figura 3. Ubicación de estaciones y puntos de muestreo en mina turística “El Sexmo”.

El primer método empleado en el estudio consistió en el RMR [53], un valor porcentual que se obtiene al sumar valoraciones según parámetros definidos que dependen del estado de la roca y discontinuidades. Los parámetros que se evalúan incluyen: resistencia a la compresión uniaxial, Rock Quality Designation RQD [87,88], espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, resistencia, intemperismo y filtraciones. Estos parámetros pueden obtener diferentes valoraciones de acuerdo con las características observadas en campo y las puntuaciones establecidas en el método (Tabla S1). El valor de RMR para el macizo rocoso se corrige de acuerdo con la orientación de las principales familias de discontinuidades analizadas, permitiendo obtener una valoración mucho más confiable. Con los resultados obtenidos, el macizo rocoso puede ser clasificado con calidad muy mala a muy buena (Tabla S2).

Finalmente se emplea el método propuesto por Barton et al., [82], el cual evalúa el comportamiento geomecánico de las rocas mediante la (Ecuación 1) y establece una clasificación cualitativa de su calidad (Tabla S3), mediante el uso de seis parámetros: RQD [87,88], relación entre la continuidad y rugosidad de los planos de fractura ( $J_r$ ), cantidad de sistemas de fracturas ( $J_n$ ), relación entre la alteración y el tipo de relleno de la discontinuidad ( $J_a$ ), humedad de los planos de fracturamiento ( $J_w$ ) y Stress Reduction Factor (SFR) (Tabla S4) [82].

$$Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF), \quad (1)$$

### 2.3. Fase III: Modelo 3G

Con base en la información obtenida de las fases previas, se diseñó un modelo de 3G's que permita establecer propuestas de manejo en los tres ejes Geoturismo, Geoconservación y Geoeducación. Se empleó como herramienta de investigación un grupo focal [89]

integrado por seis expertos en el área de minería artesanal y de pequeña escala, geoturismo, hidrogeología, geotecnia y ambiente. Se realizó un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas (FODA) [90,91] con el propósito de determinar los pilares fuertes y débiles, así como las oportunidades y amenazas potenciales de la inclusión de medidas de desarrollo de geoturismo subterráneo. Con base en el método cualitativo se generaron estrategias específicas con criterios de sostenibilidad que permitan la integración de geotecnia y geoconservación con participación de los cinco sistemas del modelo de quintuple hélice de la innovación de Carayannis y Campbell [92]. El modelo de quintuple hélice [92] promueve las interacciones entre sistema educativo, sistema económico, público basado en los medios y la cultura (sociedad civil) [93], el sistema político, y agrega como quinta hélice el 'entorno natural' con el fin de generar conocimiento y promover un desarrollo sostenible.

### 3. Resultados

#### 3.1. Levantamiento geológico-geomecánico

##### 3.1.1. Contexto geológico

La mina "El Sexmo" está formada por rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Celica del Cretácico tardío [94], representado por andesitas de tonalidad verdosa clara a oscura masivas y con fenocristales de plagioclasas. En la mina es posible identificar desde venillas hasta vetas rellenas con cuarzo y minerales de mena como pirita y calcopirita. Regionalmente, la mina es parte de un sistema asociado a vetas de sulfuración intermedias de  $Au \pm Ag \pm Cu$  [77] cuyo origen se debe al magmatismo de arco continental del Mioceno temprano [95], la mina se ha relacionado con alteraciones principalmente del tipo argílicas. Específicamente, en la estación 11, a 240 m a lo largo de la mina, se presenta un cambio litológico de andesita de grano fino de tonalidad gris verdosa con vetas de cuarzo a andesita porfídica de tonalidad gris verdosa oscura con plagioclasa y minerales anfíboles contenidos en una matriz de grano fino a medio, con vetillas rellenas de cuarzo.

##### 3.1.2. Estudio de discontinuidades

El macizo rocoso de la mina Turística "El Sexmo" fue analizado con base a las 15 estaciones definidas considerando variaciones geológicas, estructurales y geotécnicas. Cada tramo de estación evaluado incluyó medidas estructurales de las principales juntas (mínimo tres y máximo cinco juntas por estación de acuerdo con el procesamiento con el software Dips 6.0). El proceso evaluativo in-situ reflejó una tendencia similar en las propiedades físico-mecánicas de la roca y juntas. Sin embargo, estaciones puntuales, en las que se evidenció la presencia de vetas mineralizadas, fallas o agua fluyendo en el macizo rocoso, representan estaciones con propiedades físico-mecánicas variables tanto para la clasificación geomecánica RMR como Q-Barton. La Tabla 1 resume las puntuaciones promedio asignadas por cada estación considerando los parámetros establecidos de acuerdo con los métodos de clasificación geomecánica empleados.

Tabla 1. Puntuaciones asignadas por estación de acuerdo con RMR y Q-Barton.

303

Estación	$\frac{RQD}{UCS}$	$\frac{J_n}{RQD}$	$\frac{J_r}{Espaciado}$	$\frac{J_a}{Condiciones}$	$\frac{J_w}{Agua}$	$\frac{SRF}{Orientación}$	Peso Específico (Ton/m <sup>3</sup> )	UCS (MPa)
1	84 2	30 17	3 17.5	8 10.5	1 7	1 4	2.86	23
3	86 4	17	12.5	15.9	1 7	1 7		30
4	83 4	17	11	17.8	1 7	1 2		36
5	90 4	17	13.8	12.4	1 7	1 2		27.5
6	92 4	20	10.2	16.4	1 7	1 2		47.5
7	80 4	17	12	19.3	1 7	1 5		48
8	91 4	20	15	12.7	1 4	1 4		34
9	97 2	20	15	15.6	1 4	0.5 7		21.5
10	91 4	20	13.3	14.6	1 7	0.5 10		25
11	78 2	17	10.8	17.2	1 7	0.5 4		24
12	96 4	20	10	13.3	1 4	0.5 7		25
13	82 2	17	13.3	14.3	1 7	0.5 6		24
14	97 4	20	12.5	16.4	1 7	0.5 6		25
15	97 4	20	12	19.6	7	0.5 9		28

Por otro lado, el procesamiento Dips de las principales familias de discontinuidades por estación fueron analizadas de manera global considerando la longitud total de la galería turística (404.8m), en la que, de acuerdo con las concentraciones de densidad, se definieron tres juntas principales, dos vetas mineralizadas y tres fallas geológicas con tendencias estructurales predominantemente a favor de la dirección de la mina para cada tramo analizado (Figura 4). La mina en general presenta tres rumbos diferentes, en los que se puede evidenciar estructuras con buzamientos mínimos de 43° y máximos de 81°. El diagrama de roseta para juntas en la mina turística indica un rumbo dominante NE-SW (Figura 5).

304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313

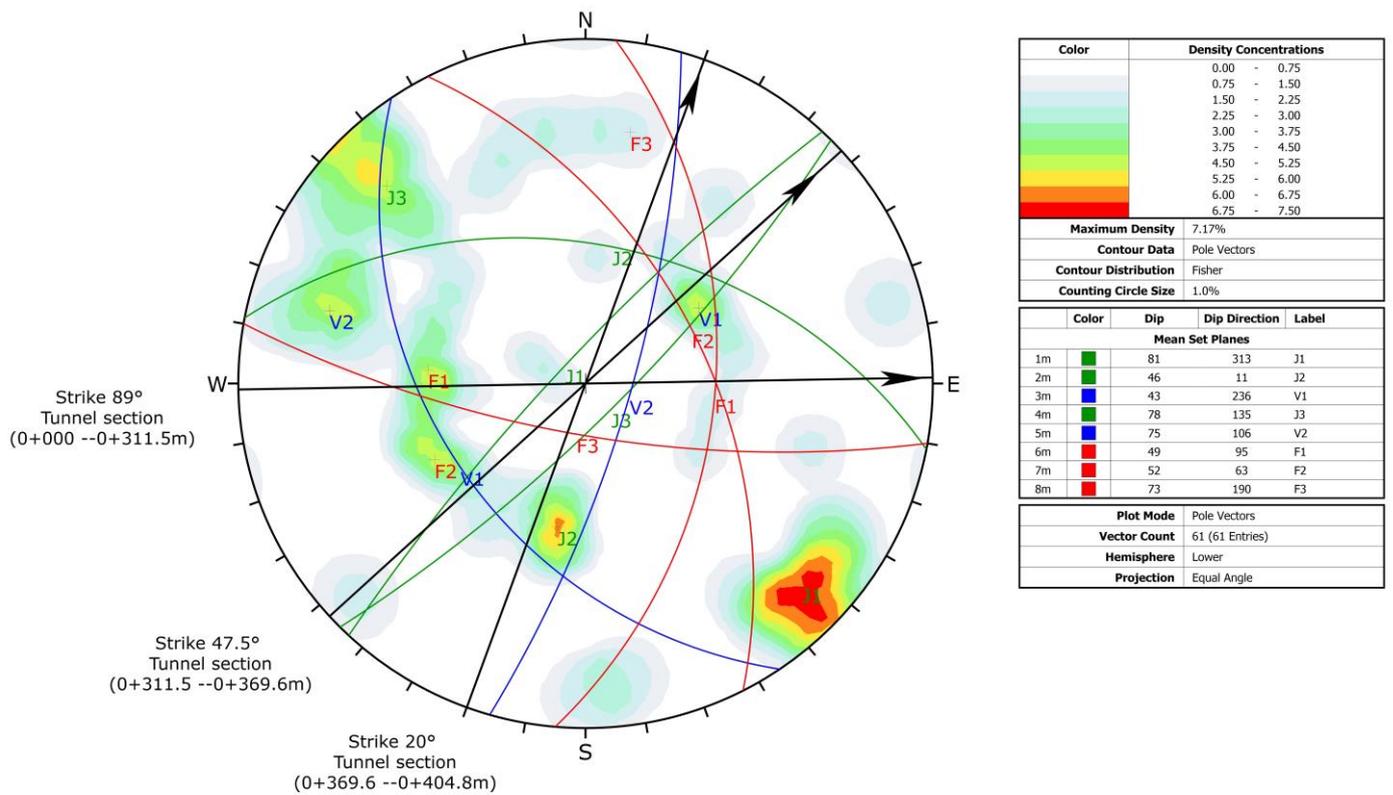


Figura 4. Concentraciones de Fisher de conjuntos de juntas.

4

315

316

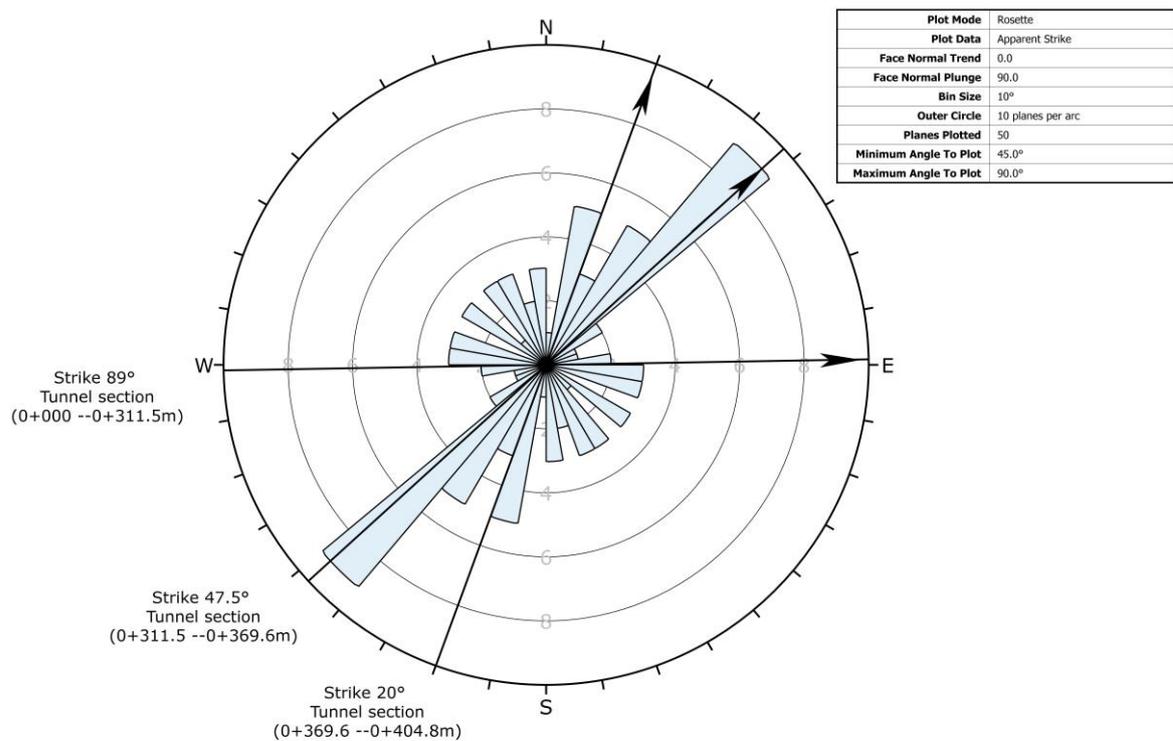


Figura 5. Diagrama de roseta para juntas en la mina turística.

317

318

319

### 3.1.3. Tramificación geotécnica de la mina El Sexmo: RMR y Q-Barton

La evaluación del macizo rocoso de la mina para las diferentes estaciones no consideró la estación dos ya estabilizada (Figura 6). Así mismo, es importante mencionar que en el tramo de la estación 13 es posible apreciar un cruce de galerías con un túnel no habilitado para el turismo que tiene un rumbo de N30°. En la estación 14 la mina presenta una medida de estabilización que contempla el encofrado de madera para una distancia de 36 m en la que se realizó mediciones y valoraciones para el macizo rocoso en los tramos descubiertos (Figura 6).

Los resultados obtenidos reflejan que el 100% del tramo habilitado para el turismo presenta una calidad clasificada como media por el método RMR (Tabla 2, Figura 6), mientras que para el método Q-Barton, considerado como una metodología conservadora, el 92.9 % del macizo rocoso obtiene una clasificación mala (Tabla 2, Figura 7), con excepción de la estación cinco clasificada como muy mala debido a los cambios en las dimensiones de la galería y la persistencia y espaciado de las discontinuidades presentes.

Dentro de la evaluación realizada para ambas metodologías, se destaca a la estación ocho y nueve de la galería, como tramos para consideración de estabilización debido a la presencia de agua fluyendo, presencia de fallas (estación 08) y meteorización de grado III (Figura 7).

**Tabla 2.** Evaluación final de estaciones subterráneas (Método RMR y Q-Barton).

Estación	RMR	Índice Q-Barton	Calificación cualitativa (RMR)	Calificación cualitativa (Q-Barton)
1	50	1.05	Media	Mala
3	48	1.08	Media	Mala
4	58	1.04	Media	Mala
5	49	0.56	Media	Muy Mala
6	58	1.15	Media	Mala
7	57	1	Media	Mala
8	51	1.14	Media	Mala
9	48	2.75	Media	Mala
10	46	2.28	Media	Mala
11	54	1.95	Media	Mala
12	45	2.40	Media	Mala
13	48	2.05	Media	Mala
14	54	2.58	Media	Mala
15	54	2.43	Media	Mala

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

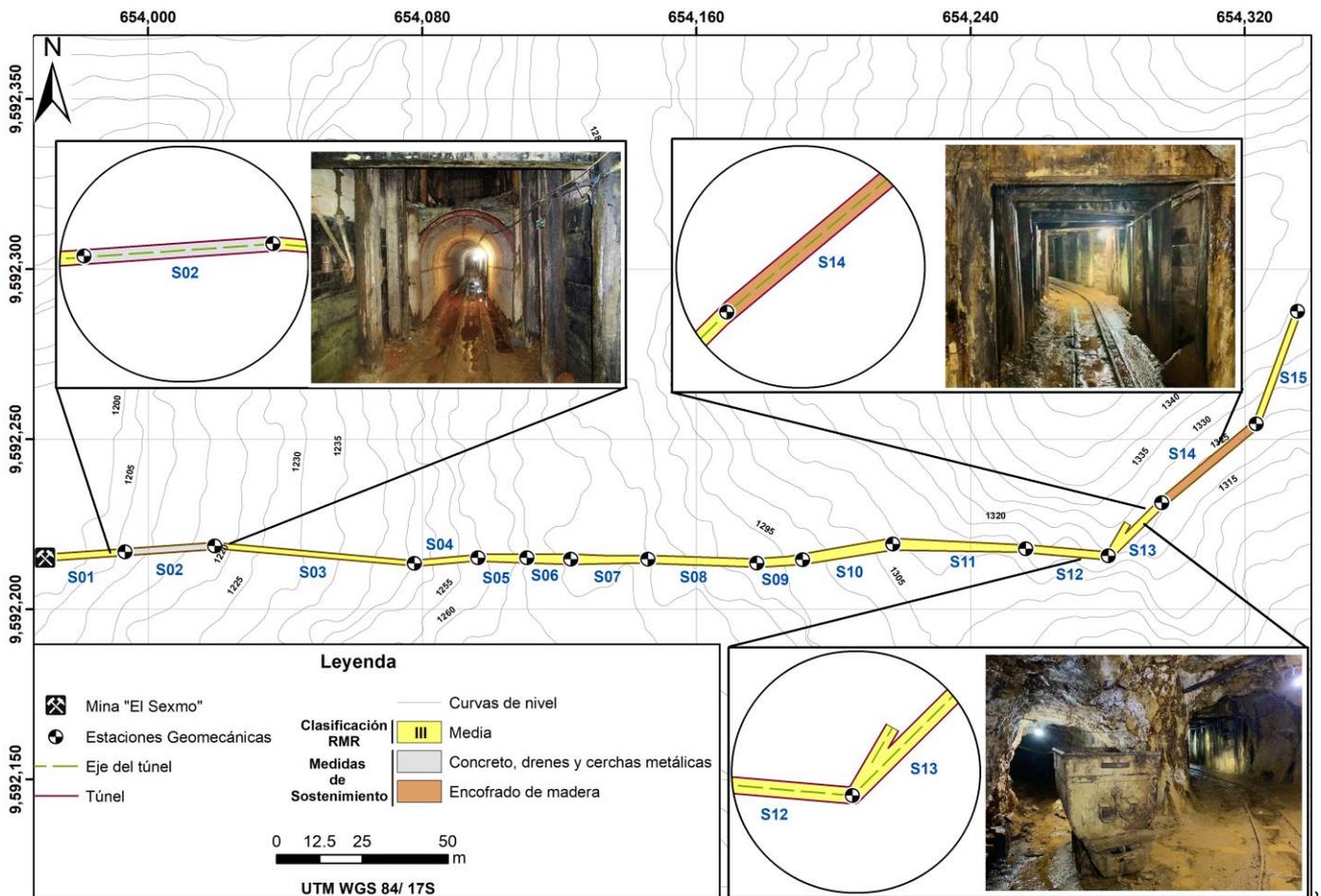


Figura 6. Tramificación geomecánica basada en el Método RMR.

341

342

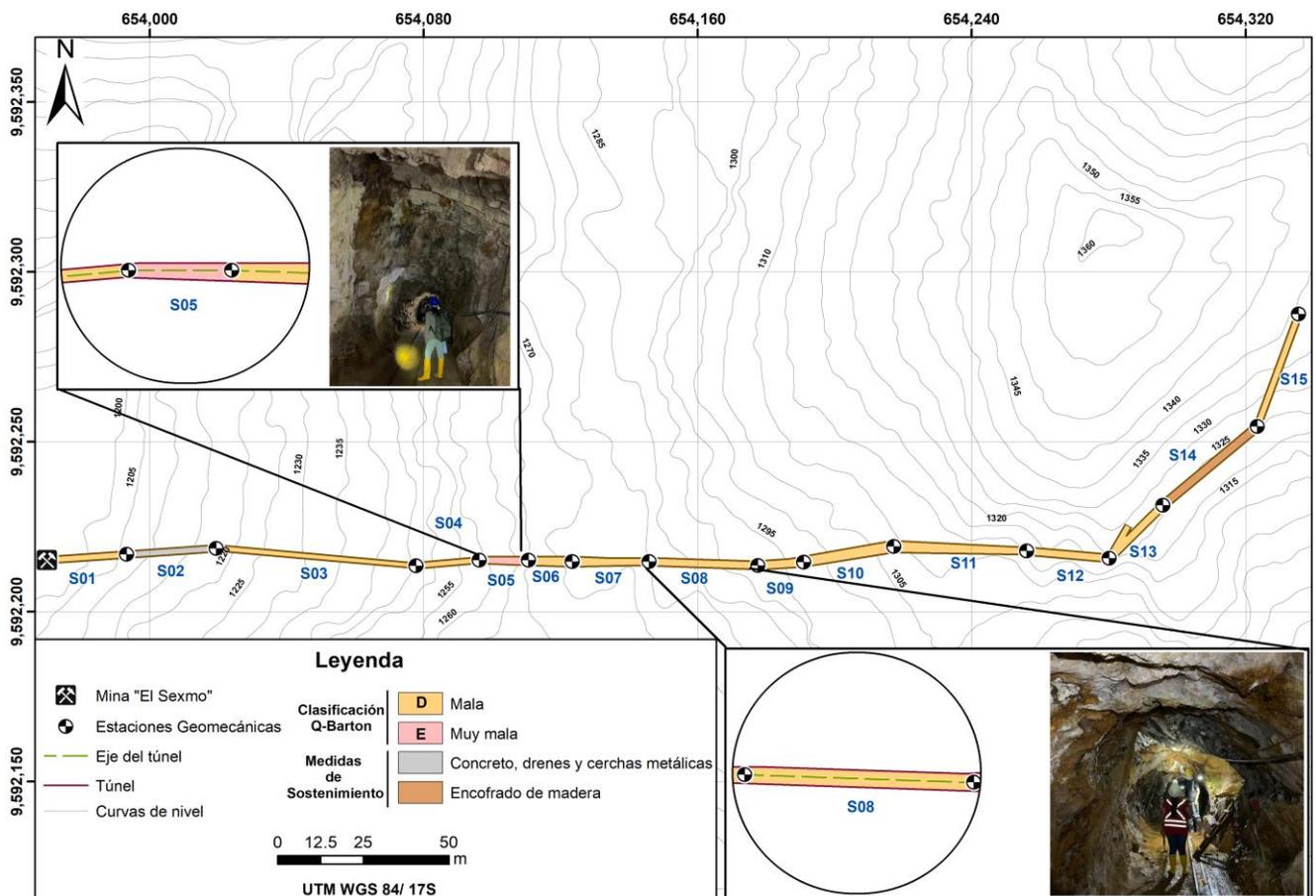


Figura 7. Tramificación geomecánica basada en el Método Q-Barton.

### 3.1.4. Medidas de sostenimiento propuestas

Las medidas de sostenimiento en este estudio se definieron de acuerdo con los resultados obtenidos del método Q-Barton [82]. Se considero tres estaciones para la propuesta de medidas de sostenimiento (estaciones 5, 8, y 9). La elección de zonas a estabilizar se basó en tres aspectos principales: i) presencia de agua, ii) fallas geológicas con espesores decimétricos, iii) meteorización y fracturamiento de la roca, evidenciados en el levantamiento de campo. De acuerdo con las valoraciones de Q-Barton y el tipo de galería (ESR: clase G), el sostenimiento requerido para las estaciones 8 y 9 contempla hormigón proyectado y bulonaje (reinforced sprayed concrete and bolting) espaciado entre 9 y 12 cm. Por otro lado, para la estación cinco se contempla también hormigón proyectado y bulonaje con espaciados entre 9 y 12cm más capas de hormigón proyectado ancladas a cerchas metálicas (reinforced ribs of sprayed concrete) (Figura 8).

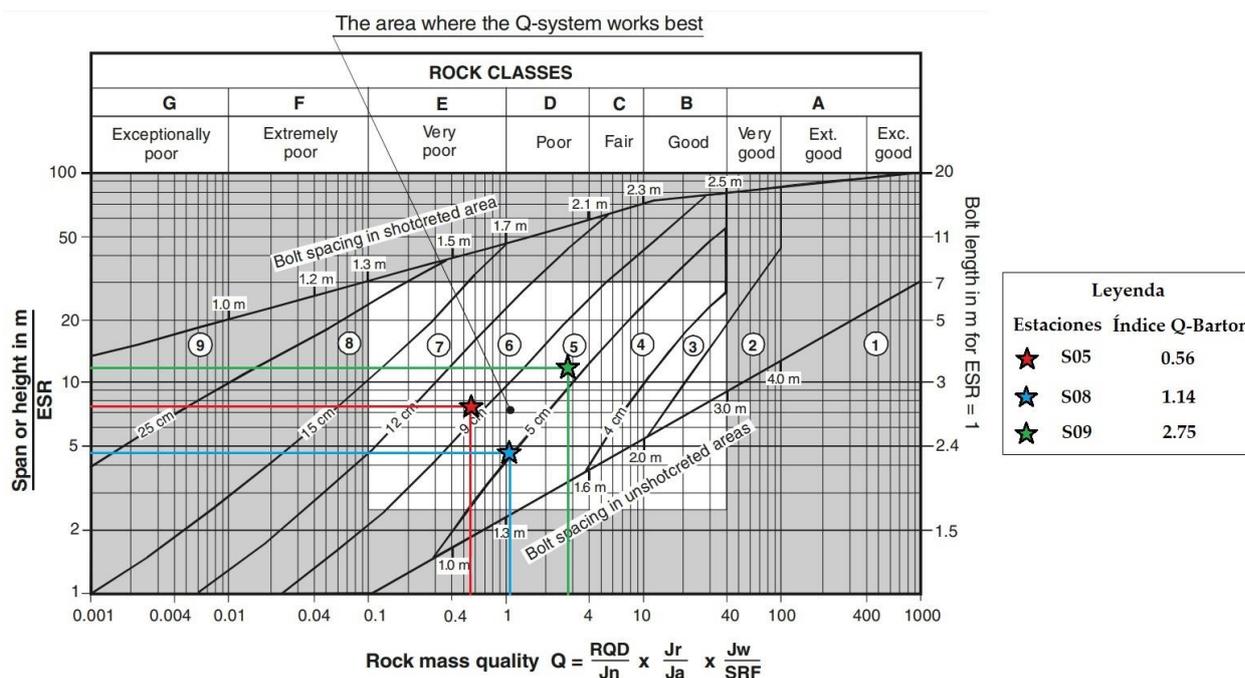


Figura 8. Esquema para definir medidas de sostenimiento con base a los resultados del índice Q en mina turística “El Sexmo” [57].

Adicionalmente, de acuerdo con las condiciones actuales que presenta la mina, es importante mencionar que la implementación de las medidas de estabilización se propone de forma parcial en aquellos planos más susceptibles a desprendimientos. Para el caso de presencia de agua (estaciones ocho y nueve), el sostenimiento debe incluir un sistema de drenaje que además de conducir de forma adecuada el flujo, sea visible para los turistas. Finalmente, este estudio recomienda un monitoreo de la calidad del encofrado de madera para las estaciones dos y 14 de la galería.

### 3.2. Modelo 3G's

En la Figura 9 se muestra el resultado del análisis FODA enfocado en el desarrollo del turismo subterráneo (minas abandonadas), integración de la geotecnia minera (geoeducación) y geoconservación. El análisis FODA permitió identificar los factores clave, puntos débiles, oportunidades y amenazas que pueden influir en el éxito del modelo 3G's (Geoturismo, Geoconservación, Geoeducación).

En el contexto interno se destaca como fortaleza el desarrollo de estudios de caracterización geomecánica para la detección de áreas inestables dentro de las galerías mineras turísticas, lo que puede ayudar a prevenir accidentes y garantizar la seguridad de los turistas. Además, estos estudios pueden ser las bases para el acondicionamiento de ampliaciones futuras de la sección turística de la galería. Algunas debilidades fueron la ausencia de planes de monitoreo y evaluación sostenible de la calidad del macizo rocoso y su entorno (agua, aire); así como limitado desarrollo de actividades didácticas enfocadas en geotecnia minera y geopatrimonio (por ejemplo, paneles geoeducacionales y diseño de protocolos de geoeducación).

En el contexto externo se identificó tres oportunidades: i) desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías de caracterización geomecánica que mejoren la precisión y el tiempo de recopilación de datos (teledetección, aprendizaje automático-machine learning), ii) las minas abandonadas pueden servir como laboratorios naturales para el desarrollo de programas de geoeducación y geoturismo, y iii) formulación de mejores prácticas para la gestión de galerías mineras abandonadas y la industria minera. Las amenazas principales fueron el incremento de la capacidad de carga turística, los procesos naturales de minas abandonadas (por ejemplo, desprendimientos de rocas), posibles rutas de acceso

para minería ilegal y los desafíos legales o regulatorios asociados con la gestión de galerías mineras abandonadas y la minería en general.

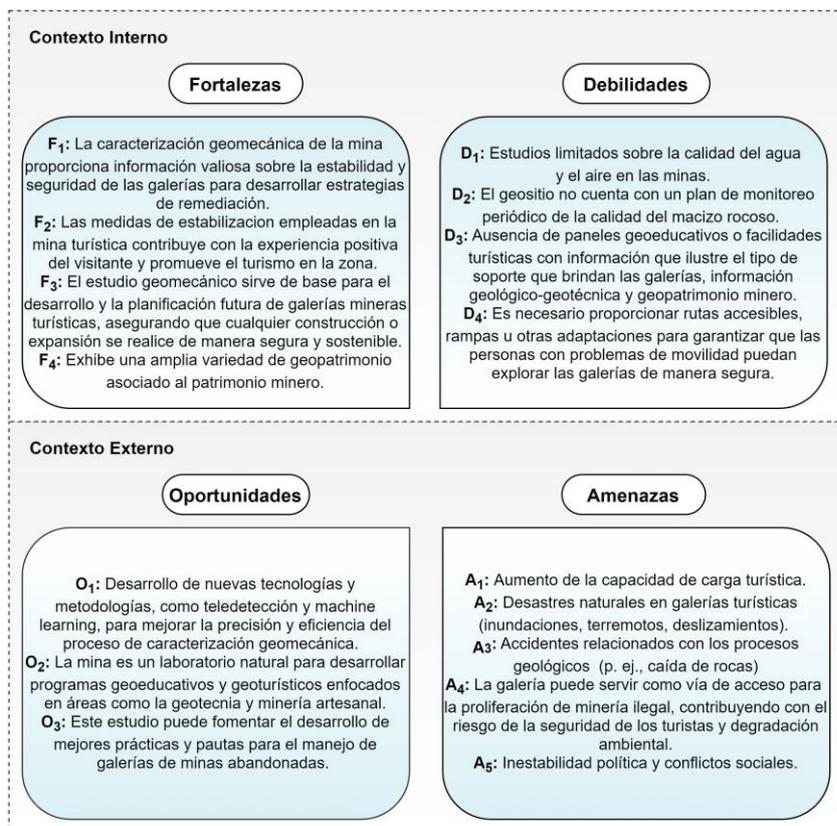


Figura 9. Análisis FODA.

El análisis FODA permitió establecer estrategias que consideran los ejes de Geoturismo, Geoconservación, Geoeducación (3G's) en los cinco sistemas del modelo de quintuple hélice de innovación de Carayannis y Campbell [92]. El modelo propuesto se presenta en la Figura 10, cada sistema interactúa entre sí y genera conocimiento mediante soluciones sostenibles e innovadoras aplicadas al geoturismo de minas abandonadas, al mismo tiempo promueve el compromiso de las partes interesadas. A continuación, se detalla las estrategias y contribución de cada sistema del modelo:

- **Sistema educativo:** la academia puede contribuir al desarrollo del modelo de gestión del geoturismo subterráneo (minas abandonadas) realizando investigaciones y actividades de divulgación científica sobre geopatrimonio minero, turismo sostenible, identificando los impactos potenciales del geoturismo (capacidad de carga), diseño de planes de geoconservación y desarrollo de estrategias de mitigación de los impactos detectados. Además de la inclusión de nuevas tecnologías de inmersión (realidad virtual) y aprendizaje automático (machine learning).
- **Sistema político:** El sistema político desempeña un papel clave en el desarrollo de políticas y regulaciones de la industria del geoturismo, en el que es necesario llevar a cabo iniciativas o programas que promuevan la conservación del geopatrimonio minero. Además, este sistema debe proporcionar incentivos para que los actores de la industria adopten prácticas sostenibles en todos sus componentes. Finalmente, el sector político debe asegurar la inclusión del geoturismo dentro de los planes académicos y fortalecer los vínculos entre los otros actores de los cuatro subsistemas (comunidad-gobierno-industria-academia).

- **Sistema económico:** los actores de sector económico como la industria del turismo (hoteles, agencias de turismo y transporte), pueden implementar prácticas sostenibles en sus actividades como la reducción de desechos, la conservación de energía y la promoción de la cultura y el patrimonio geológico-minero local. También pueden trabajar con las comunidades locales para desarrollar geoproductos y servicios de turismo sostenible que beneficien tanto a los turistas como a la comunidad. Adicionalmente, la industria minera, dentro del plan de gestión tiene que brindar aporte técnico y financiero en planes de monitoreo y evaluación de las condiciones del macizo rocoso, manejo de desechos, programas de geoeducación, implementación de medidas de sostenimiento e inclusión de tecnología verde. 417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427
- **Sistema natural:** El modelo de gestión debe incluir medidas o prácticas para conservar los recursos naturales (agua, minerales, rocas y la energía, reducir los residuos, promover el transporte sostenible y proteger la biodiversidad y geopatrimonio). Un buen ejemplo son las actividades de voluntariado que permitan desarrollar conciencia de conservación de los componentes bióticos y abióticos en el turista y la comunidad local. 428  
429  
430  
431  
432  
433
- **Sistema social:** Las comunidades locales son una parte fundamental del geoturismo subterráneo, en el que el modelo 3G's propuesto debe priorizar su participación y compromiso mediante herramientas como talles o foros. El modelo alienta la participación de la comunidad desde la planificación, evaluación y desarrollo del geoturismo. Este tipo de gestión promueve la conciencia cultural y la preservación del geopatrimonio, garantizando el desarrollo el desarrollo socio-económico local. 434  
435  
436  
437  
438  
439  
440  
441

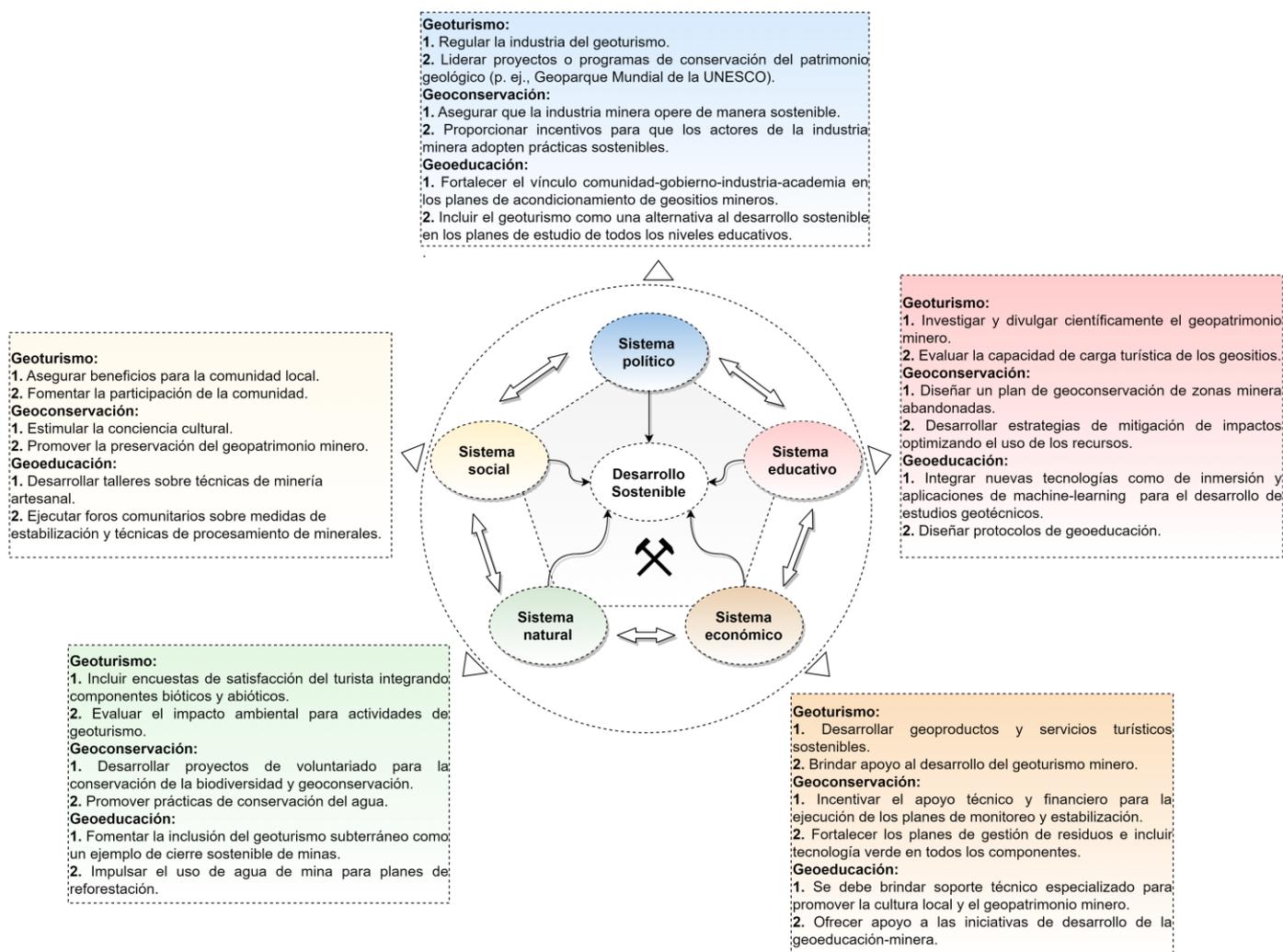


Figura 10. Modelo 3G's para geoturismo subterráneo.

La mina turística estudiada es un claro ejemplo de sitios mineros abandonados con fines turísticos que cumplen con la interacción de los cinco subsistemas del modelo de Carayannis y Campbell [92]. La mina turística “El Sexmo” nació como una iniciativa de una empresa privada (régimen económico) que la condicionó con la intención de heredar a la comunidad un vestigio de la actividad minera artesanal propia del distrito minero Zaruma-Portovelo. Este proyecto incluye salas con productos artesanales elaborados por la comunidad (sistema socioeconómico) dentro de las instalaciones turísticas, que promueven el desarrollo económico y la educación del geopatrimonio a través de geoproductos. Además, dentro de su plan operativo, el gobierno local (sistema político-social-económico) incluye a la mina como sitio de interés geológico para el proyecto “Geoparque Ruta del Oro”, que busca alcanzar el desarrollo sostenible y mitigar la minería ilegal. La intervención académica (sistema educativo-natural) complementa esta iniciativa a través de los proyectos “Registro del patrimonio geológico y minero y su incidencia en la defensa y preservación de la geodiversidad en el Ecuador” y “Propuesta del Geoparque Ruta del Oro y su impacto en el territorio. desarrollo”, con un claro objetivo de identificar, evaluar y difundir el potencial geoturístico del área [75,96,97], incluyendo estrategias de acondicionamiento de geositos considerando el impacto ambiental [98]. Finalmente, la interacción entre los cinco sistemas permite la creación de conocimiento sobre el geopatrimonio y la conciencia ambiental para lograr un desarrollo comunitario sostenible.

#### 4. Interpretación de resultados y discusión

El presente estudio propone una metodología que integra la evaluación semicuantitativa y cualitativa de minas subterráneas abandonadas como potencial geoturístico. Desde el punto de vista semicuantitativo, se estudia la calidad del macizo rocoso subterráneo como herramienta para el establecimiento de medidas de estabilización que garanticen la seguridad de los turistas. Por otro lado, la evaluación cualitativa realizada por un grupo focal y análisis FODA (Figura 9) plantea la posibilidad de evaluar el geoturismo subterráneo, en los que la audiencia comprenda la importancia de la conservación de la riqueza geológica de una mina y su relación directa con la geotecnia como ciencia que permite garantizar su seguridad y el funcionamiento del geosítio subterráneo.

Los resultados obtenidos para la clasificación geomecánica empleando dos metodologías clásicas, validan al índice Q-Barton como metodología de clasificación conservadora que puede ser considerada en un plan de monitoreo de calidad de roca que incluye medidas de sostenimiento en zonas susceptibles a desprendimientos [99–101]. A través del índice Q-Barton, 13 de 14 estaciones evaluadas presentan una clasificación de roca pobre con valores mínimos de uno (Tabla 2). Estos resultados difieren en categoría al RMR, método que clasifica al 100% de la mina como macizo rocoso de calidad media (Tabla 2, Figura 6). Las principales diferencias entre los resultados obtenidos por RMR y Q-Barton son el campo de tensiones in situ y la separación entre las juntas [102]. El sistema de tensiones solo se consideró en el SRF para el cálculo del índice Q, mientras que el RMR solo consideró la resistencia de la roca intacta. Sin embargo, la evaluación de discontinuidades cambia significativamente en ambos métodos; RMR considera el espaciamiento (a mayor espaciamiento, mayor RMR), mientras que el índice Q evalúa el número de familias (a mayor número de familias, menor índice Q, independientemente de su espaciamiento). De acuerdo con Somodi et al. [58] el uso de más de una metodología de evaluación geomecánica favorece el entendimiento del comportamiento del macizo rocoso.

En este estudio el uso de RMR y Q-Barton permitió evaluar integralmente parámetros propios de las discontinuidades para el análisis posterior de las zonas que son recomendables estabilizar en la galería. En general, el comportamiento de la calidad del macizo rocoso por ambas metodologías varía entre media y mala. Sin embargo, el trabajo de campo in-situ permitió definir tres zonas (S05, S08, y S09) que, aunque en campo no se observen evidencias de desprendimientos, es recomendable estabilizar para evitar colapsos por eventos detonantes como precipitaciones intensas u ocurrencia de eventos sísmicos. Otro aspecto adicional a la validación in situ es emplear metodologías de modelado numérico, analítico y observacional para superar las limitaciones de los sistemas de clasificación como enfatizan otros investigadores como Palmström y Stille [103] y Genis et al. [104].

Las medidas de sostenimiento se han propuesto de acuerdo con los resultados del índice Q-Barton [57], método ampliamente usado en construcciones subterráneas [54,82,105]. La estabilización consideró recomendar tres tipos de medidas que incluyen: i) hormigón proyectado y bulonaje (S05, S08, y S09), y en algunos casos capas de hormigón proyectado ancladas a cerchas metálicas (reinforced ribs of sprayed concrete) (S05) (Figura 8), ii) monitoreo del estado del encofrado de madera empleado en dos estaciones para realizar a futuro cambios de madera, y iii) implementación de sistemas de drenaje que eviten el deterioro avanzado del macizo rocoso. Este tipo de medidas puede ser implementadas a corto o mediano plazo con el objetivo de mitigar la susceptibilidad al desprendimiento de roca, con un beneficio e impacto secundario que es la geoducción vinculada a la geotecnia [54,82,105].

Este trabajo plantea al estudio geotécnico y las medidas de estabilización como herramientas educativas potenciales para audiencia técnica y no técnica. De hecho, este estudio proporciona un medio para co-crear conocimiento y experiencia, comunicando de manera efectiva las preocupaciones planetarias a largo plazo que enfrenta la sociedad en relación con las minas abandonadas [106]. Además, comprender la mitigación del riesgo geotécnico en los geositos es esencial para la geoconservación de sitios mineros con fines turísticos. Esto fue validado por análisis de expertos mediante el método FODA, en el que la interpretación del geoturismo vinculado a la geotecnia reflejó tres aspectos fundamentales relacionados al funcionamiento de un modelo 3G's en los cinco sistemas del modelo de quintuple hélice de innovación de Carayannis y Campbell [92].

El primer aspecto resalta que el funcionamiento de un sitio minero para el geoturismo está condicionado por la riqueza geológica presente, el acondicionamiento al turismo, y su potencial para fortalecer el desarrollo sostenible de la comunidad. El segundo aspecto enfatiza que el empleo de minas como geositos con fines educativos requiere de planes de monitoreo de calidad de roca, calidad de agua, y control de gases que integren nuevas tecnologías como sensores remotos o aprendizaje automático para el establecimiento de estrategias que den solución a futuros escenarios que repercutan en la seguridad del turista, conservación de los rasgos geológicos, o la construcción y acondicionamiento de nuevas galerías en la mina. Finalmente, el tercer aspecto considera que las amenazas en una galería ya sea por eventos naturales extremos y actividades antropogénicas (por ejemplo, actividad minera ilegal, aumento de capacidad de carga turística), solamente pueden ser mitigadas si existe una participación integral del sistema político, económico, académico, social, y cultural, en los que la geoconservación y seguridad turística sean prioritarios. En este sentido, existen varios estudios que analizan la posibilidad de equilibrar la geoconservación con la promoción turística (algunos ejemplos en [107–110]).

La participación de los diferentes expertos en el diseño de un modelo 3G's permitió establecer estrategias de geoconservación, geoturismo, y geoducción para minas turísticas que promueven la interacción de cada subsistema del modelo de quintuple hélice de la innovación, en los que el beneficiario directo está representado por la comunidad local. Destacando que la participación de los habitantes en el turismo subterráneo representa un eje decisivo para alcanzar la sostenibilidad [111,112]. En concreto estas propuestas se resumen en tres macro-estrategias:

- Desde el punto de vista geoturístico, es necesario fortalecer el desarrollo de estudios de investigación que difundan la riqueza geológica del geosito a nivel nacional e internacional; así como el desarrollo de proyectos de conservación y promoción turística sostenible que involucre nombramientos como por ejemplo Geoparque Mundial de la UNESCO.
- La geoconservación de una mina necesita de la participación integral de la comunidad-academia-empresa para el desarrollo de planes de acondicionamiento, estabilización, y uso turístico a corto, mediano y largo plazo, que eviten el deterioro del valor científico, académico y turístico de los principales rasgos geológicos.
- Dentro de la geoducción, el modelo plantea la posibilidad de explotar el potencial que representa la geotecnia en la conservación de la riqueza geológica y

seguridad turística a través del diseño e instalación de paneles ilustrativos que faciliten al guía turístico educar a personas de diferentes niveles académicos.

- Dentro del aspecto comunitario, en las zonas de minería artesanal, la comunidad puede liderar eventos donde los turistas puedan aprender sobre las técnicas de explotación y procesamiento de minerales utilizadas en la antigüedad. Adicionalmente, para garantizar la participación comunitaria en el uso sostenible de las minas abandonadas con fines turísticos, el desarrollo de geoproductos, como artesanías, alimentos y empresas que ofrecen paquetes turísticos, representa una alternativa de desarrollo económico a través de productos que exhiban y protejan el geopatrimonio beneficiando a la población local [113–115].

El presente estudio contribuye a la investigación desarrollada de geoturismo subterráneo como herramienta para alcanzar el desarrollo turístico sostenible en sitios de Patrimonio Construido Subterráneo (PCS) [116,117]. Dentro de este tipo de patrimonio, las minas o cuevas son ampliamente usadas como turismo minero, en las que resalta el valor científico, cultural, educativo y recreativo [109,118,119]. Existen varios estudios en los que promueven el uso sostenible de minas abandonadas en el sector turístico aprovechando la riqueza geológica, promoviendo la conservación de la geodiversidad y aprendizaje de ciencias de la tierra [120–124]. Sin embargo, la falta de gestión de los sitios, escasa participación de la comunidad, o la carencia de políticas turísticas de promoción que consideren la capacidad de carga, pueden limitar al desarrollo sostenible de un PCS [41].

Considerando la trascendencia del geoturismo subterráneo en minas abandonadas analizado en este estudio, es necesario recomendar a futuro la ejecución de estudios de promoción turística haciendo uso de realidad virtual y aprendizaje automático, en la que los turistas de diferentes partes del mundo puedan acceder a recorridos virtuales para comprender el entorno geológico e histórico de las minas. Todo esto con el objetivo de disminuir la susceptibilidad a riesgo por degradación del geositio in-situ, así como alcanzar mayores niveles de promoción a escala internacional.

## 5. Conclusiones

El enfoque metodológico planteado en la presente investigación combina un análisis cualitativo y semicuantitativo de una mina turística con más de 500 años de antigüedad, para evaluar la importancia de la geotecnia en el geoturismo subterráneo como estrategia de geoeducación y geoconservación dentro de un modelo de gestión sostenible 3G's. El estudio geomecánico indica que el 100% del tramo habilitado para el turismo de la mina presenta una calidad de roca clasificada como "Media" (clase III) por el método RMR, mientras que por el método Q-Barton el 92,9% del macizo rocoso obtiene una clasificación "Mala" (clase D), excepto la estación 5 clasificada como "Muy Mala" (clase E). El estudio propone medidas de sostenimiento para tres estaciones específicas (estaciones 5, 8, and 9) basadas en las evaluaciones de Q-Barton, que incluyen hormigón proyectado con fibras y bulonaje. En general, se recomienda un monitoreo y mantenimiento regulares del macizo rocoso y de las medidas de estabilización implementadas (Figura 3), independientemente de su clasificación en el índice Q-Barton, para detectar cualquier cambio potencial en el comportamiento y abordar cualquier problema antes de que se vuelva crítico. Si bien los métodos utilizados tienen ventajas y limitaciones, son ampliamente aplicables y brindan un buen punto de partida para futuros estudios y evaluaciones de sitios de geoturismo subterráneo para la toma de decisiones.

Se necesita un enfoque multisistémico para la gestión sostenible del geoturismo subterráneo, particularmente en minas abandonadas. El sistema educativo, el sistema político, el sistema económico, el sistema natural y el sistema social juegan papeles importantes en el desarrollo de políticas, regulaciones y prácticas que promuevan la conservación del geopatrimonio minero, el turismo sostenible y la mitigación de los impactos potenciales del geoturismo subterráneo. Adicionalmente, la inclusión de nuevas tecnologías como realidad virtual, teledetección y aprendizaje automático pueden contribuir al desarrollo

de este modelo. El modelo 3G propuesto prioriza la participación comunitaria y la conciencia cultural para garantizar el desarrollo socioeconómico local preservando el geopatrimonio minero. En general, un enfoque holístico que involucre a todos los subsistemas es crucial para garantizar el desarrollo sostenible del geoturismo subterráneo.

Sin embargo, es importante señalar que el estudio tiene algunas limitaciones en las evaluaciones geomecánicas, como el número de muestras de roca para los ensayos de laboratorio, la estimación de la resistencia a la compresión no confinada (UCS) mediante el martillo de Schmidt y el uso de métodos empíricos de caracterización de macizo rocosos. Se recomienda en estudios futuros realizar pruebas geomecánicas adicionales como la prueba de compresión triaxial o la prueba de resistencia a la tracción indirecta para complementar los datos de UCS del martillo de Schmidt. Finalmente, es importante incorporar técnicas de modelado numérico como el análisis de elementos finitos para evaluar el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones de carga.

Las ventajas de usar el sistema de RMR y Q-Barton para la caracterización geomecánica incluyen su simplicidad, amplia aplicabilidad y capacidad para proporcionar una evaluación rápida de la calidad del macizo rocoso. La investigación muestra los beneficios del empleo del martillo Schmidt tipo N para pruebas UCS in situ, lo que permite una recopilación de datos rápida, rentable y es un método no destructivo. En general, el modelo de 3G ofrece una herramienta valiosa para realizar estudios de geoturismo subterráneo y proporciona un marco para el desarrollo del turismo sostenible en entornos subterráneos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la implementación del modelo requiere una planificación cuidadosa, una investigación exhaustiva y un seguimiento regular para garantizar su eficacia y la seguridad de los visitantes.

**Material Suplementario:** Tabla S1: clasificación geomecánica RMR [53]; Tabla S2: Calidad de la roca según el Índice Q [82]; Tabla S3: Descripciones y valoraciones de los parámetros Jr, Jn, Ja y Jw [82].

**Contribución de autores:** “Conceptualización, M.A.-A., M.J.-M., O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; metodología, M.A.-A., M.J.-M., O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; software, MA-A. y M.J.-M.; validación, M.A.-A., M.J.-M., O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; análisis formal, M.A.-A., M.J.-M., O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; investigación, M.A.-A., M.J.-M., O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; recursos, O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; procesamiento de datos, M.A.-A. y M.J.-M.; redacción—preparación del borrador original, M.A.-A. y M.J.-M.; redacción—revisión y edición, M.A.-A., M.J.-M., O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; visualización, F.M.-C. y PC-M.; supervisión, O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; administración de proyectos, O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M.; adquisición de fondos, O.L.-O., H.A.-R., F.M.-C. y PC-M. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.”

**Financiamiento:** Esta investigación fue financiada por el “Registro del patrimonio geológico y minero y su incidencia en la defensa y preservación de la geodiversidad en el Ecuador”, con número CIPAT-01-2018 y “Propuesta del Geoparque Ruta del Oro y su impacto en el desarrollo territorial”, con número CIPAT-02-2018.

**Declaración de disponibilidad de datos:** Datos incluidos en el artículo, materiales complementarios, referenciados en el manuscrito.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo y permisos de acceso de la Empresa Minera BIRA Bienes Raíces S.A. para realizar visitas de campo acompañados de técnicos en la mina turística subterránea.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## Referencias

1. Arisona, A.; Ishola, K.S.; Nawawi, M.N.M. Subsurface Void Mapping Using Geophysical and Geotechnical Techniques with Uncertainties Estimation: Case Study of Kinta Valley, Perak, Malaysia. *SN Appl. Sci.* **2020**, *2*, 1171, doi:10.1007/s42452-020-2967-x. 670
2. Schwenk, J.T.; Sloan, S.D.; Ivanov, J.; Miller, R.D. Surface-Wave Methods for Anomaly Detection. *GEOPHYSICS* **2016**, *81*, EN29–EN42, doi:10.1190/geo2015-0356.1. 671
3. Bharti, A.K.; Pal, S.K.; Priyam, P.; Pathak, V.K.; Kumar, R.; Ranjan, S.K. Detection of Illegal Mine Voids Using Electrical Resistivity Tomography: The Case-Study of Raniganj Coalfield (India). *Eng. Geol.* **2016**, *213*, 120–132, doi:10.1016/j.enggeo.2016.09.004. 672
4. Abdallah, M.; Verdel, T. Behavior of a Masonry Wall Subjected to Mining Subsidence, as Analyzed by Experimental Designs and Response Surfaces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2017**, *100*, 199–206, doi:10.1016/j.ijrmmms.2017.10.003. 673
5. Liu, J.; Ma, F.; Li, G.; Guo, J.; Wan, Y.; Song, Y. Evolution Assessment of Mining Subsidence Characteristics Using SBAS and PS Interferometry in Sanshandao Gold Mine, China. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 290, doi:10.3390/rs14020290. 674
6. Yasmin, F.; Sakib, T.U.; Emon, S.Z.; Bari, L.; Sultana, G.N.N. The Physicochemical and Microbiological Quality Assessment of Maddhapara Hard Rock-Mine Discharged Water in Dinajpur, Bangladesh. *Resour. Environ. Sustain.* **2022**, *8*, 100061, doi:10.1016/j.resenv.2022.100061. 675
7. Duncan, A.E. The Dangerous Couple: Illegal Mining and Water Pollution—A Case Study in Fena River in the Ashanti Region of Ghana. *J. Chem.* **2020**, *2020*, 1–9, doi:10.1155/2020/2378560. 676
8. Redwan, M.; Bamousa, A.O. Characterization and Environmental Impact Assessment of Gold Mine Tailings in Arid Regions: A Case Study of Barramiya Gold Mine Area, Eastern Desert, Egypt. *J. African Earth Sci.* **2019**, *160*, 103644, doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.103644. 677
9. Mwaanga, P.; Silondwa, M.; Kasali, G.; Banda, P.M. Preliminary Review of Mine Air Pollution in Zambia. *Heliyon* **2019**, *5*, e02485, doi:10.1016/j.heliyon.2019.e02485. 678
10. Yang, Y.; Erskine, P.D.; Zhang, S.; Wang, Y.; Bian, Z.; Lei, S. Effects of Underground Mining on Vegetation and Environmental Patterns in a Semi-Arid Watershed with Implications for Resilience Management. *Environ. Earth Sci.* **2018**, *77*, 605, doi:10.1007/s12665-018-7796-5. 679
11. Adiansyah, J.S.; Rosano, M.; Vink, S.; Keir, G. A Framework for a Sustainable Approach to Mine Tailings Management: Disposal Strategies. *J. Clean. Prod.* **2015**, *108*, 1050–1062, doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.139. 680
12. Kim, Y.; Lee, S.S. Application of Artificial Neural Networks in Assessing Mining Subsidence Risk. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 1302, doi:10.3390/app10041302. 681
13. Marschalko, M.; Yilmaz, I.; Kubečka, K.; Bouchal, T.; Bednárík, M.; Drusa, M.; Bendová, M. Utilization of Ground Subsidence Caused by Underground Mining to Produce a Map of Possible Land-Use Areas for Urban Planning Purposes. *Arab. J. Geosci.* **2015**, *8*, 579–588, doi:10.1007/s12517-013-1250-5. 682
14. Pourghasemi, H.R.; Gayen, A.; Panahi, M.; Rezaie, F.; Blaschke, T. Multi-Hazard Probability Assessment and Mapping in Iran. *Sci. Total Environ.* **2019**, *692*, 556–571, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.203. 683
15. Rosa, J.C.S.; Sánchez, L.E.; Morrison-Saunders, A. Getting to ‘Agreed’ Post-Mining Land Use – an Ecosystem Services Approach. *Impact Assess. Proj. Apprais.* **2018**, *36*, 220–229, doi:10.1080/14615517.2018.1445175. 684
16. Favas, P.J.C.; Sarkar, S.K.; Rakshit, D.; Venkatachalam, P.; Prasad, M.N.V. Acid Mine Drainages From Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution. In *Environmental Materials and Waste*; Prasad, M.N.V., Kaimin, S., Eds.; Elsevier, 2016; pp. 413–462 ISBN 9780128038376. 685
17. Al Heib, M.; Duval, C.; Theoleyre, F.; Watelet, J.-M.; Gombert, P. Analysis of the Historical Collapse of an Abandoned Underground Chalk Mine in 1961 in Clamart (Paris, France). *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2015**, *74*, 1001–1018, doi:10.1007/s10064- 686

- 014-0677-6. 713
18. Salmi, E.F.; Karakus, M.; Nazem, M. Assessing the Effects of Rock Mass Gradual Deterioration on the Long-Term Stability of Abandoned Mine Workings and the Mechanisms of Post-Mining Subsidence – A Case Study of Castle Fields Mine. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2019**, *88*, 169–185, doi:10.1016/j.tust.2019.03.007. 714  
715  
716
19. Bekendam, R.F. Stability and Subsidence Assessment over Shallow Abandoned Room and Pillar Limestone Mines. In *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Lecture Notes in Earth Sciences*; Springer: Berlin, 2004; pp. 657–670. 717  
718
20. Stoeckl, L.; Banks, V.; Shekhunova, S.; Yakovlev, Y. The Hydrogeological Situation after Salt-Mine Collapses at Solotvyno, Ukraine. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2020**, *30*, 100701, doi:10.1016/j.ejrh.2020.100701. 719  
720
21. Khalil, M.A.; Sadeghiamirshahidi, M.; Joeckel, R.M.; Santos, F.M.; Riahi, A. Mapping a Hazardous Abandoned Gypsum Mine Using Self-Potential, Electrical Resistivity Tomography, and Frequency Domain Electromagnetic Methods. *J. Appl. Geophys.* **2022**, *205*, 104771, doi:10.1016/j.jappgeo.2022.104771. 721  
722  
723
22. Bianchi Fasani, G.; Bozzano, F.; Cercato, M. The Underground Cavity Network of South-Eastern Rome (Italy): An Evolutionary Geological Model Oriented to Hazard Assessment. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2011**, *70*, 533–542, doi:10.1007/s10064-011-0360-0. 724  
725  
726
23. Trigueros, E.; Cánovas, M.; Arzúa, J.; Alcaraz, M. Stability of an Abandoned Siderite Mine: A Case Study in Northern Spain. *Open Geosci.* **2021**, *13*, 359–376, doi:10.1515/geo-2020-0240. 727  
728
24. Kaliampakos, D.; Benardos, A.; Mavrikos, A. A Review on the Economics of Underground Space Utilization. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2016**, *55*, 236–244, doi:10.1016/j.tust.2015.10.022. 729  
730
25. Hall, A.; Scott, J.A.; Shang, H. Geothermal Energy Recovery from Underground Mines. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15*, 916–924, doi:10.1016/j.rser.2010.11.007. 731  
732
26. Menéndez, J.; Ordóñez, A.; Álvarez, R.; Loredó, J. Energy from Closed Mines: Underground Energy Storage and Geothermal Applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, *108*, 498–512, doi:10.1016/j.rser.2019.04.007. 733  
734
27. Zakharov, Y.; Bondareva, L. Simulation of Domestic and Industrial Wastewater Disposal in Flooded Mine Workings. *Procedia Eng.* **2015**, *117*, 389–396, doi:10.1016/j.proeng.2015.08.183. 735  
736
28. Xie, H.; Zhao, J.W.; Zhou, H.W.; Ren, S.H.; Zhang, R.X. Secondary Utilizations and Perspectives of Mined Underground Space. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2020**, *96*, 103129, doi:10.1016/j.tust.2019.103129. 737  
738
29. Li, G.; Hu, Z.; Li, P.; Yuan, D.; Feng, Z.; Wang, W.; Fu, Y. Innovation for Sustainable Mining: Integrated Planning of Underground Coal Mining and Mine Reclamation. *J. Clean. Prod.* **2022**, *351*, 131522, doi:10.1016/j.jclepro.2022.131522. 739  
740
30. Wang, Y.; Yang, Y.; Sun, H.; Xie, C.; Zhang, Q.; Cui, X.; Chen, C.; He, Y.; Miao, Q.; Mu, C.; et al. Observation and Research of Deep Underground Multi-Physical Fields—Huainan –848 m Deep Experiment. *Sci. China Earth Sci.* **2023**, *66*, 54–70, doi:10.1007/s11430-022-9998-2. 741  
742  
743
31. Wang, Y.; He, Y.; Wang, J.; Liu, C.; Li, L.; Tan, X.; Tan, B. An Endeavor of “Deep-Underground Agriculture”: Storage in a Gold Mine Impacts the Germination of Canola (*Brassica Napus* L.) Seeds. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2022**, *29*, 46357–46370, doi:10.1007/s11356-022-19125-x. 744  
745  
746
32. Hu, Z.; Fu, Y.; Xiao, W.; Zhao, Y.; Wei, T. Ecological Restoration Plan for Abandoned Underground Coal Mine Site in Eastern China. *Int. J. Mining, Reclam. Environ.* **2015**, *29*, 316–330, doi:10.1080/17480930.2014.1000645. 747  
748
33. Oktay Vehbi, B.; Mısırlısoy, D.; Günçe, K.; Yüceer, H. The Tourism Potential of Post-Mining Heritage Sites: The Cyprus Mining Cooperation in Lefka, Cyprus. *Geoheritage* **2022**, *14*, 58, doi:10.1007/s12371-022-00697-6. 749  
750
34. Ruiz Ballesteros, E.; Hernández Ramírez, M. Identity and Community – Reflections on the Development of Mining Heritage Tourism in Southern Spain. *Tour. Manag.* **2007**, *28*, 677–687, doi:10.1016/j.tourman.2006.03.001. 751  
752
35. Wanhill, S. Mines—A Tourist Attraction: Coal Mining in Industrial South Wales. *J. Travel Res.* **2000**, *39*, 60–69, doi:10.1177/004728750003900108. 753  
754

36. Garofano, M.; Govoni, D. Underground Geotourism: A Historic and Economic Overview of Show Caves and Show Mines in Italy. *Geoheritage* **2012**, *4*, 79–92, doi:10.1007/s12371-012-0055-3. 755  
756
37. Hose, T.A. Towards a History of Geotourism: Definitions, Antecedents and the Future. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* **2008**, *300*, 37–60, doi:10.1144/SP300.5. 757  
758
38. Hose, T. Selling the Story of Britain's Stone. *Env Interpret* **1995**, *10*, 16–17. 759
39. Hose, T.A. The English Origins of Geotourism (as a Vehicle for Geoconservation) and Their Relevance to Current Studies. *Acta Geogr. Slov.* **2011**, *51*, 343–359, doi:10.3986/AGS51302. 760  
761
40. Puławska, A.; Manecki, M.; Flaszka, M.; Waluś, E.; Wojtowicz, K. Rare Occurrence of Mirabilite in the Thirteenth-Century Historic Salt Mine in Bochnia (Poland): Characterisation, Preservation, and Geotourism. *Geoheritage* **2021**, *13*, 36, doi:10.1007/s12371-021-00562-y. 762  
763  
764
41. Buonincontri, P.; Micera, R.; Murillo-Romero, M.; Pianese, T. Where Does Sustainability Stand in Underground Tourism? A Literature Review. *Sustainability* **2021**, *13*, 12745, doi:10.3390/su132212745. 765  
766
42. Liso, I.S.; Chieco, M.; Fiore, A.; Pisano, L.; Parise, M. Underground Geosites and Caving Speleotourism: Some Considerations, From a Case Study in Southern Italy. *Geoheritage* **2020**, *12*, 13, doi:10.1007/s12371-020-00424-z. 767  
768
43. Herrera-Franco, G.; Carrión-Mero, P.; Montalván-Burbano, N.; Caicedo-Potosí, J.; Berrezueta, E. Geoheritage and Geosites: A Bibliometric Analysis and Literature Review. *Geosciences* **2022**, *12*, 169, doi:10.3390/geosciences12040169. 769  
770
44. Farsani, N.T.; Esfahani, M.A.G.; Shokrizadeh, M. Understanding Tourists' Satisfaction and Motivation Regarding Mining Geotours (Case Study: Isfahan, Iran). *Geoheritage* **2019**, *11*, 681–688, doi:10.1007/s12371-018-0318-8. 771  
772
45. Mehdipour Ghazi, J.; Hamdollahi, M.; Moazzen, M. Geotourism of Mining Sites in Iran: An Opportunity for Sustainable Rural Development. *Int. J. Geoheritage Park.* **2021**, *9*, 129–142, doi:10.1016/j.ijgeop.2021.02.004. 773  
774
46. Thakare, M.; Randive, K. Distinctive Bats Species in Abandoned Mines: Adventure Geotourism for Nature Enthusiasts. In *Innovations in Sustainable Mining*; Earth and Environmental Sciences Library: Cham, 2021; pp. 233–250. 775  
776
47. Grgic, D.; Giraud, A.; Auvray, C. Impact of Chemical Weathering on Micro/Macro-Mechanical Properties of Oolitic Iron Ore. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2013**, *64*, 236–245, doi:10.1016/j.ijrmms.2013.09.005. 777  
778
48. Taylor, J.; Fowell, R.; Wade, L. Effects of Abandoned Shallow Bord-and-Pillar Coal Workings on Surface Development. *Min. Technol.* **2000**, *109*, 140–145, doi:10.1179/mnt.2000.109.3.140. 779  
780
49. Salmi, E.F.; Sellers, E.J. A Rock Engineering System Based Abandoned Mine Instability Assessment Index with Case Studies for Waihi Gold Mine. *Eng. Geol.* **2022**, *310*, 106869, doi:10.1016/j.enggeo.2022.106869. 781  
782
50. Gao, B.; Zhang, H.; Yang, Z.; Fu, Y.; Luo, L. The Development Mechanism and Control Technology Visualization of the Vault Cracks in the Ancient Underground Cavern of Longyou. *Episodes* **2019**, *42*, 287–299, doi:10.18814/epiuiugs/2019/019023. 783  
784
51. Gao, B.; Yang, C.; Li, L.; Zhang, H.; He, W.; Yang, Z.; Cai, Z. Surrounding Rock Failure Mechanism and Long-Term Stability of the Heidong Large Ancient Underground Caverns. *Geotech. Geol. Eng.* **2022**, *40*, 4975–4990, doi:10.1007/s10706-022-02194-7. 785  
786  
787
52. Campos, L.A.; Marques, E.A.G.; Costa, T.A.V.; Ferreira Filho, F.A. Proposed Adjustments and Validation of Different RMR89 Geomechanical Classification for Quadrilátero Ferrífero Lithologies. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2020**, *79*, 5031–5048, doi:10.1007/s10064-020-01879-8. 788  
789  
790
53. Bieniawski, Z.T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*; John Wiley & Sons: New York, 1989; 791  
792
54. Barton, N.R. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*; Balkema: Rotterdam, 2000; 793
55. Hoek, E. Carranza-Torres, C. Corkum, B. Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition. In Proceedings of the Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium; Mining Innovation and Technology: Toronto, 2002; pp. 267–273. 794  
795
56. Laubscher, D.H. Class Distinction in Rock Masses. *Coal, Gold Base Min* **1975**, *23*, 37–50. 796

57. Palmstrom, A. RMI—a Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes, University of Oslo, 1995. 797
58. Somodi, G.; Bar, N.; Kovács, L.; Arrieta, M.; Török, Á.; Vásárhelyi, B. Study of Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) Correlations in Granite, Siltstone, Sandstone and Quartzite Rock Masses. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 3351, doi:10.3390/app11083351. 798  
800
59. Khademi Hamidi, J.; Shahriar, K.; Rezai, B.; Bejari, H. Application of Fuzzy Set Theory to Rock Engineering Classification Systems: An Illustration of the Rock Mass Excavability Index. *Rock Mech. Rock Eng.* **2010**, *43*, 335–350, doi:10.1007/s00603-009-0029-1. 801  
802  
803
60. Santa, C.; Gonçalves, L.; Chaminé, H.I. A Comparative Study of GSI Chart Versions in a Heterogeneous Rock Mass Media (Marão Tunnel, North Portugal): A Reliable Index in Geotechnical Surveys and Rock Engineering Design. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2019**, *78*, 5889–5903, doi:10.1007/s10064-019-01481-7. 804  
805  
806
61. Hashemi, M.; Moghaddas, S.; Ajalloeian, R. Application of Rock Mass Characterization for Determining the Mechanical Properties of Rock Mass: A Comparative Study. *Rock Mech. Rock Eng.* **2010**, *43*, 305–320, doi:10.1007/s00603-009-0048-y. 807  
808
62. Santi, P.; Manning, J.; Zhou, W.; Meza, P.; Colque, P. Geologic Hazards of the Ocoña River Valley, Peru and the Influence of Small-Scale Mining. *Nat. Hazards* **2021**, *108*, 2679–2700, doi:10.1007/s11069-021-04794-7. 809  
810
63. Morante-Carballo, F.; Montalván-Burbano, N.; Aguilar-Aguilar, M.; Carrión-Mero, P. A Bibliometric Analysis of the Scientific Research on Artisanal and Small-Scale Mining. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 8156, doi:10.3390/ijerph19138156. 811  
812
64. Seccatore, J.; Veiga, M.; Origliasso, C.; Marin, T.; De Tomi, G. An Estimation of the Artisanal Small-Scale Production of Gold in the World. *Sci. Total Environ.* **2014**, *496*, 662–667, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.003. 813  
814
65. Verbrugge, B.; Besmanos, B. Formalizing Artisanal and Small-Scale Mining: Whither the Workforce? *Resour. Policy* **2016**, *47*, 134–141, doi:10.1016/j.resourpol.2016.01.008. 815  
816
66. Tomiyasu, T.; Hamada, Y.K.; Kodamatani, H.; Hidayati, N.; Rahajoe, J.S. Transport of Mercury Species by River from Artisanal and Small-Scale Gold Mining in West Java, Indonesia. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2019**, *26*, 25262–25274, doi:10.1007/s11356-019-05718-6. 817  
818  
819
67. Schwartz, F.W.; Lee, S.; Darrah, T.H. A Review of the Scope of Artisanal and Small-Scale Mining Worldwide, Poverty, and the Associated Health Impacts. *GeoHealth* **2021**, *5*, doi:10.1029/2020GH000325. 820  
821
68. Zvarivadza, T.; Nhleko, A.S. Resolving Artisanal and Small-Scale Mining Challenges: Moving from Conflict to Cooperation for Sustainability in Mine Planning. *Resour. Policy* **2018**, *56*, 78–86, doi:10.1016/j.resourpol.2017.12.003. 822  
823
69. Zvarivadza, T. Artisanal and Small-Scale Mining as a Challenge and Possible Contributor to Sustainable Development. *Resour. Policy* **2018**, *56*, 49–58, doi:10.1016/j.resourpol.2018.01.009. 824  
825
70. Muduli, K.; Barve, A. Establishment of a Sustainable Development Framework in Small Scale Mining Supply Chains in India. *Int. J. Intell. Enterp.* **2013**, *2*, 84, doi:10.1504/IJIE.2013.057340. 826  
827
71. Maconachie, R.; Conteh, F. Artisanal Mining Policy Reforms, Informality and Challenges to the Sustainable Development Goals in Sierra Leone. *Environ. Sci. Policy* **2021**, *116*, 38–46, doi:10.1016/j.envsci.2020.10.011. 828  
829
72. Masuku, S. An Indigenous Knowledge-Based Approach to Environmental Conservation in Zimbabwe. *African Renaiss.* **2019**, *16*, 165–183, doi:10.31920/2516-5305/2019/V16n3a9. 830  
831
73. O'Brien, R.M.; Smits, K.M.; Smith, N.M.; Schwartz, M.R.; Crouse, D.R.; Phelan, T.J. Integrating Scientific and Local Knowledge into Pollution Remediation Planning: An Iterative Conceptual Site Model Framework. *Environ. Dev.* **2021**, *40*, 100675, doi:10.1016/j.envdev.2021.100675. 832  
833  
834
74. Samuel, W.; Richard, B.; Nyantakyi, J.A. Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Water and Soils from Artisanal Mining Enclave Using *Heliconia Psittacorum*. *Model. Earth Syst. Environ.* **2021**, doi:10.1007/s40808-020-01076-2. 835  
836
75. Carrión-Mero, P.; Loor-Oporto, O.; Andrade-Ríos, H.; Herrera-Franco, G.; Morante-Carballo, F.; Jaya-Montalvo, M.; Aguilar-Aguilar, M.; Torres-Peña, K.; Berrezueta, E. Quantitative and Qualitative Assessment of the “El Sexmo” Tourist Gold Mine 837  
838

- (Zaruma, Ecuador) as A Geosite and Mining Site. *Resources* **2020**, *9*, 28, doi:10.3390/resources9030028. 839
76. Carrión-Mero, P.; Morante-Carballo, F. The Context of Ecuador's World Heritage, for Sustainable Development Strategies. *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics* **2020**, *15*, 39–46, doi:10.18280/ijdne.150106. 840
77. Spencer, R.M.; Montenegro, J.L.; Gaibor, A.; Perez, E.P.; Mantilla, G.; Viera, F.; Spencer, C.E. The Portovelo-Zaruma Mining Camp, Southwest Ecuador: Porphyry and Epithermal Environments. *SEG Discov.* **2002**, 1–14, doi:10.5382/SEGnews.2002-49.fea. 842
78. Berrezueta, E.; Ordóñez-Casado, B.; Bonilla, W.; Banda, R.; Castroviejo, R.; Carrión, P.; Puglla, S. Ore Petrography Using Optical Image Analysis: Application to Zaruma-Portovelo Deposit (Ecuador). *Geosciences* **2016**, *6*, 30, doi:10.3390/geosciences6020030. 845
79. Berrezueta, E.; Ordóñez-Casado, B.; Espinoza-Santos, C.; Loayza-Ramírez, J.; Carrión-Mero, P.; Morante-Carballo, F.; Bonilla, W. Caracterización Mineralógica y Petrográfica de Las Vetas Vizcaya, Octubrina y Gabi Del Yacimiento Aurífero Epitermal Zaruma-Portovelo, Ecuador. *Boletín Geológico y Min.* **2021**, 421–437, doi:10.21701/bolgeomin.132.4.004. 848
80. Sellers, C.; Ammirati, L.; Khalili, M.A.; Buján, S.; Rodas, R.A.; Di Martire, D. The Use DInSAR Technique for the Study of Land Subsidence Associated with Illegal Mining Activities in Zaruma – Ecuador, a Cultural Heritage Cite. In *European Workshop on Structural Health Monitoring. EWSHM 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*; Springer: Cham, Switzerland, 2023; pp. 553–562. 851
81. Cando Jácome, M.; Martínez-Graña, A.M.; Valdés, V. Detection of Terrain Deformations Using InSAR Techniques in Relation to Results on Terrain Subsidence (Ciudad de Zaruma, Ecuador). *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1598, doi:10.3390/rs12101598. 855
82. Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mech.* **1974**, *6*, 189–236, doi:10.1007/BF01239496. 857
83. Sánchez Padilla, C.V.; Sánchez Zambrano, A.J. Evaluación de Amenazas Geodinámicas En El Entorno de La Actividad Minera En La Concesión Minera Palacios (Tesis de Grado), Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2019. 859
84. Blanco, R. *Estudios de La Zona de Exclusión Minera En Los Cantones Zaruma- Portovelo: Caso Concesiones Mineras Esperanza II y Palacios. Informe Geotécnico*; Guayaquil, 2018; 861
85. Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) *Proyecto “Perforaciones Geotécnicas En El Área de Interés Del Casco Urbano de La Ciudad de Zaruma, Provincia de El Oro”*; Quito, Ecuador, 2018; 863
86. Morante, F. *Estudios de La Zona de Exclusión Minera En Los Cantones Zaruma-Portovelo: Caso Concesiones Mineras La Esperanza II y Palacios. Informe Geológico*; Guayaquil, 2018; 865
87. Deere, D.U.; Deere, D.W. *Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years*; Vicksburg, MS, USA, 1988; 867
88. Priest, S.D.; Hudson, J.A. Discontinuity Spacings in Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **1976**, *13*, 135–148, doi:10.1016/0148-9062(76)90818-4. 868
89. Kitzinger, J. The Methodology of Focus Groups: The Importance of Interaction between Research Participants. *Sociol. Heal. Illn.* **1994**, *16*, 103–121, doi:10.1111/1467-9566.ep11347023. 870
90. Leigh, D. SWOT Analysis. In *Handbook of Improving Performance in the Workplace: Volumes 1-3*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2010; pp. 115–140. 872
91. Herrera-Franco, G.; Erazo, K.; Mora-Frank, C.; Carrión-Mero, P.; Berrezueta, E. Evaluation of a Paleontological Museum as Geosite and Base for Geotourism. A Case Study. *Heritage* **2021**, *4*, 1208–1227, doi:10.3390/heritage4030067. 874
92. Carayannis, E.G.; Campbell, D.F.J. Triple Helix, Quadruple Helix and Quintuple Helix and How Do Knowledge, Innovation and the Environment Relate to Each Other? A Proposed Framework for a Trans-Disciplinary Analysis of Sustainable Development and Social Ecology. *Int. J. Soc. Ecol. Sustain. Dev.* **2010**, *1*, 41–69, doi:10.4018/jsesd.2010010105. 876
93. Nisbet, M.C.; Hixon, M.A.; Moore, K.D.; Nelson, M. Four Cultures: New Synergies for Engaging Society on Climate Change. *Front. Ecol. Environ.* **2010**, *8*, 329–331, doi:10.1890/1540-9295-8.6.329. 879

94. Bristow, C.R.; Hoffstetter, R.; Feininger, T.; Hall, M.T. *Lexique Stratigraphique 1977*. 881
95. Lebrat, M. *Caractérisation Géochimique Du Volcanisme Anté-Orogénique de l'occident Équatorien: Implications Géodynamiques*, Université des sciences et Techniques du Languedoc, 1985. 882  
883
96. Turner-Carrión, M.; Carrión-Mero, P.; Turner-Salamea, I.; Morante-Carballo, F.; Aguilar-Aguilar, M.; Zambrano-Ruiz, K.; Berzeueta, E. A Mineralogical Museum as a Geotourism Attraction: A Case Study. *Minerals* **2021**, *11*, 582, doi:10.3390/min11060582. 884  
885  
886
97. Carrión-Mero, P.; Turner-Carrión, M.; Herrera-Franco, G.; Bravo-Murillo, G.; Aguilar-Aguilar, M.; Paz-Salas, N.; Berzeueta, E. Geotouristic Route Proposal for Touristic Development in a Mining Area—Case Study. *Resources* **2022**, *11*, 25, doi:10.3390/resources11030025. 887  
888  
889
98. Carrión-Mero, P.; Merchán-Sanmartín, B.; Aguilar-Aguilar, M.; Morante-Carballo, F.; Suárez-Zamora, S.; Bárcenas-Campoverde, R.; Berzeueta, E. Strategies to Improve the Tourist Interest of a Geosite Respecting Its Natural Heritage. A Case Study. *Geoheritage* **2022**, *14*, 110, doi:10.1007/s12371-022-00746-0. 890  
891  
892
99. Carrión-Mero, P.; Aguilar-Aguilar, M.; Morante-Carballo, F.; Domínguez-Cuesta, M.J.; Sánchez-Padilla, C.; Sánchez-Zambrano, A.; Briones-Bitar, J.; Blanco-Torrens, R.; Córdova-Rizo, J.; Berzeueta, E. Surface and Underground Geomechanical Characterization of an Area Affected by Instability Phenomena in Zaruma Mining Zone (Ecuador). *Sustainability* **2021**, *13*, 3272, doi:10.3390/su13063272. 893  
894  
895  
896
100. Rodríguez, G.; Mulas, M.; Loaiza, S.; Del Pilar Villalta Echeverria, M.; Yanez Vinueza, A.A.; Larreta, E.; Jordá Bordehore, L. Stability Analysis of the Volcanic Cave El Mirador (Galápagos Islands, Ecuador) Combining Numerical, Empirical and Remote Techniques. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 732, doi:10.3390/rs15030732. 897  
898  
899
101. Barton, N. Some New Q-Value Correlations to Assist in Site Characterisation and Tunnel Design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2002**, *39*, 185–216, doi:10.1016/S1365-1609(02)00011-4. 900  
901
102. Ranasooriya, J.; Nikraz, H. Reliability of the Linear Correlation of Rock Mass Rating (RMR) and Tunnelling Quality Index (Q). *Aust. Geomech.* **2009**, *44*, 47–54. 902  
903
103. Palmstrom, A.; Stille, H. Ground Behaviour and Rock Engineering Tools for Underground Excavations. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2007**, *22*, 363–376, doi:10.1016/j.tust.2006.03.006. 904  
905
104. Genis, M.; Basarir, H.; Ozarslan, A.; Bilir, E.; Balaban, E. Engineering Geological Appraisal of the Rock Masses and Preliminary Support Design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. *Eng. Geol.* **2007**, *92*, 14–26, doi:10.1016/j.enggeo.2007.02.005. 906  
907  
908
105. Carmona, S.; Molins, C.; García, S. Application of Barcelona Test for Controlling Energy Absorption Capacity of FRS in Underground Mining Works. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *246*, 118458, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118458. 909  
910
106. Stewart, I.S.; Hurth, V. Selling Planet Earth: Re-Purposing Geoscience Communications. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* **2021**, *508*, 265–283, doi:10.1144/SP508-2020-101. 911  
912
107. Šebela, S.; Turk, J. Sustainable Use of the Predjama Cave (Slovenia) and Possible Scenarios Related to Anticipated Major Increases in Tourist Numbers. *Tour. Manag. Perspect.* **2014**, *10*, 37–45, doi:10.1016/j.tmp.2014.01.002. 913  
914
108. Šebela, S.; Turk, J. Natural and Anthropogenic Influences on the Year-Round Temperature Dynamics of Air and Water in Postojna Show Cave, Slovenia. *Tour. Manag.* **2014**, *40*, 233–243, doi:10.1016/j.tourman.2013.06.011. 915  
916
109. Parga-Dans, E.; González, P.A.; Enríquez, R.O. The Social Value of Heritage: Balancing the Promotion-Preservation Relationship in the Altamira World Heritage Site, Spain. *J. Destin. Mark. Manag.* **2020**, *18*, 100499, doi:10.1016/j.jdmm.2020.100499. 917  
918  
919
110. Varriale, R. Re-Inventing Underground Space in Matera. *Heritage* **2019**, *2*, 1070–1084, doi:10.3390/heritage2020070. 920
111. Hardy, A.; Beeton, R.J.S.; Pearson, L. Sustainable Tourism: An Overview of the Concept and Its Position in Relation to Conceptualisations of Tourism. *J. Sustain. Tour.* **2002**, *10*, 475–496, doi:10.1080/09669580208667183. 921  
922

112. Butler, R.W. Sustainable Tourism: A State-of-the-art Review. *Tour. Geogr.* **1999**, *1*, 7–25, doi:10.1080/14616689908721291. 923
113. Farsani, N.T.; Mortazavi, M.; Bahrami, A.; Kalantary, R.; Bizhaem, F.K. Traditional Crafts: A Tool for Geo-Education in Geotourism. *Geoheritage* **2017**, *9*, 577–584, doi:10.1007/s12371-016-0211-2. 924  
925
114. Komoo, I.; Azman, N.; Ahmad, N.; Ali, C.A.; Bukhari, A.M.M. An Integrated Geoproduct Development for Geotourism in Langkawi UNESCO Global Geopark: A Case Study of the Kubang Badak Biogeotrail. *Geoheritage* **2022**, *14*, 37, doi:10.1007/s12371-022-00664-1. 926  
927  
928
115. Rodrigues, J.; Neto de Carvalho, C.; Ramos, M.; Ramos, R.; Vinagre, A.; Vinagre, H. Geoproducts – Innovative Development Strategies in UNESCO Geoparks: Concept, Implementation Methodology, and Case Studies from Naturtejo Global Geopark, Portugal. *Int. J. Geoheritage Park.* **2021**, *9*, 108–128, doi:10.1016/j.ijgeop.2020.12.003. 929  
930  
931
116. Pace, G. Heritage Conservation and Community Empowerment. Tools for Living Labs. In *Underground Built Heritage Valorisation. A Handbook, Proceedings of the First Underground4value Training School*; Pace, G., Salvarani, R., Eds.; Roma, Italy, 2021; pp. 197–236. 932  
933  
934
117. Pace, G. Introduction. Underground Built Heritage as Catalyser for Community Valorisation. In *Underground Built Heritage Valorisation. A Handbook, Proceedings of the First Underground4value Training School*; Pace, G., Salvarani, R., Eds.; Roma, Italy, 2021; pp. 1–20. 935  
936  
937
118. Torabi Farsani, N.; Reza Bahadori, S.; Abolghasem Mirzaei, S. An Introduction to Mining Tourism Route in Yazd Province. *Geoconservation Res.* **2020**, *6*, 57–71. 938  
939
119. Shavanddasht, M.; Karubi, M.; Sadry, B.N. An Examination of the Relationship between Cave Tourism Motivations and Satisfaction: The Case of Alisadr Cave, Iran. *Geoj. Tour. Geosites* **2017**, *20*, 156–176. 940  
941
120. Rachmawati, E.; Sunkar, A. Consumer-Based Cave Travel and Tourism Market Characteristics in West Java, Indonesia. *Tour. Karst Areas* **2013**, *6*, 57–70. 942  
943
121. Rybár, P.; Štrba, L. Mining Tourism and Its Position in Relation to Other Forms of Tourism. In Proceedings of the In Proceedings of the GEOTOUR 2016, IBIMET-CNR, Firenze, Italy, 18–20 October 2016; 2016; pp. 2–7. 944  
945
122. Rózycki1, P.; Dryglas, D. Mining Tourism, Sacral and Other Forms of Tourism Practiced in Antique Mines - Analysis of the Results. *Acta Montan. Slovaca* **2017**, *22*, 58–66. 946  
947
123. Goki, N.G.; Marcus, N.D.; Umbugadu, A.A. Preliminary Assessment of the Post-Mining Geotourism Potential of the Plateau Tin Fields, Nigeria. *Acta Geoturistica* **2016**, *7*, 21–30. 948  
949
124. Čech, V.; Gregorová, B.; Krokusová, J.; Košová, V.; Hronček, P.; Molokáč, M.; Hlaváčová, J. Environmentally Degraded Mining Areas of Eastern Slovakia As a Potential Object of Geotourism. *Sustainability* **2020**, *12*, 6029, doi:10.3390/su12156029. 950  
951  
952

## 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 16 de marzo de 2023, las estudiantes Maribel Stefanía Aguilar Aguilar y María Fernanda Jaya Montalvo con números de identificación 0706448420 y 0604089144, respectivamente, de la Cohorte 4, presentaron la propuesta de su tema de titulación al Comité Académico del programa. Posteriormente, con fecha 21 de abril de 2023, el Comité revisó y aprobó la propuesta mediante la resolución FICT-CA-GEOTEC-017-2023, cumpliendo con los requisitos establecidos para la aprobación del tema.

A partir de dicha aprobación, las estudiantes mantuvieron reuniones periódicas con el tutor designado, Paúl César Carrión Mero, para la elaboración y desarrollo de su proyecto de titulación, siguiendo los lineamientos establecidos por el programa. Con fecha 24 de junio 2023, las estudiantes presentaron y sustentaron su proyecto de titulación ante el tribunal evaluador asignado, cumpliendo con el proceso formal de evaluación académica.

Por lo tanto, en calidad de Coordinador del Programa de Maestría en Geotecnia, certifico que el trabajo de titulación denominado "**Aplicación de sistemas de clasificación geomecánica en una mina turística para el establecimiento de estrategias dentro del modelo 3G**", realizado por las estudiantes Maribel Stefanía Aguilar Aguilar y María Fernanda Jaya Montalvo con números de identificación 0706448420 y 0604089144, respectivamente, ha sido revisado y evaluado conforme a los lineamientos y estándares establecidos por el programa.

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

Atentamente,



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