

Aplicación del Método Semiempírico en Asentamientos Máximos para Establecer el Comportamiento del Material que Genera Sobrecarga posterior a los Eventos de Subsistencia en el cantón Zaruma.

Application of the Semi-Empirical Method in Maximum Settlements to Establish the Behavior of the Material that Generates Overburden after Subsidence events in Zaruma.

Jonathan Fernando Tobar Torres¹, Iván Núñez Pérez², Diego Mauricio Alquinga López¹, Tito Salvador Vélez Suquilanda¹, Ángel Fernando Bonilla³, Danny Burbano Morillo⁴.

- ¹. Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito – Ecuador: jonathan.tobar@geoenergia.gob.ec; diego.alquinga@geoenergia.gob.ec; tito.velez@geoenergia.gob.ec
- ². Investigador independiente. Quito - Ecuador: inunezp45@yahoo.com.mx
- ³. Investigador independiente. Quito - Ecuador: angfebon@espol.edu.ec
- ⁴. Universidad Central del Ecuador. Quito - Ecuador: dsurbano@uce.edu.ec

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: : 19-07-2024

Fecha de aceptación: 08-12-2025

Resumen

En Zaruma, Ecuador, se registraron subsidencias vinculadas a minería, en los sectores La Inmaculada, Gonzalo Pizarro y La Colón, entre 2016 y 2022. El presente estudio evalúa la sobrecarga en galerías subterráneas, posterior a obras de mitigación, a través de la aplicación del método sustentado en teoría y observación, para estimar el comportamiento de los asentamientos generados por el proceso de subsidencia. Los resultados indican asentamientos máximos entre La Inmaculada y La Colón, asociados a condiciones de relajamiento en los materiales que conforman la sobrecarga litológica terciaria y presencia de materiales de relleno. El método establece el comportamiento mecánico de la sobrecarga, posterior a las obras de mitigación ejecutadas en el año 2022, en Zaruma, así como los asentamientos producto del proceso de subsidencia, con la aplicación de criterio de daños en la infraestructura cimentada superficialmente, mediante monitoreo de asentamientos.

Palabras claves: Asentamiento, Deformación, Semiempírico, Sobrecarga, Subsistencia.

Abstract

In Zaruma, Ecuador, subsidence events linked to mining were recorded in the sectors La Inmaculada, Gonzalo Pizarro, and La Colón between 2016 and 2022. The survey assessed the overburden in underground galleries, after the mitigation facilities were applied. A theory and observation based; method was used to estimate the behaviour of settlements induced by the subsidence process. The results indicate maximum settlements between La Inmaculada and La Colón. This is attributed to the presence of fill materials and stress relieving conditions within the material forming the tertiary overburden. The method evaluates the behaviour of the overburden following the implementation of mitigation facilities in Zaruma in 2022, and estimates the maximum surface settlement resulting from the subsidences process. This is achieved by applying damage criteria to the shallow-founded infrastructure, through settlement monitoring.

Keywords: Settlement, Deformation, Semiempirical, Overburden, Subsidence

1. INTRODUCCIÓN

La deformación superficial se genera por el reequilibrio de los materiales por encima de galerías que se originaron por actividades de extracción minera originando las subsidencias [1]. La subsidencia genera impactos significativos en las infraestructuras superficiales, afectando edificios y carreteras; así como, representa riesgos para la seguridad pública. Los materiales responden al proceso de subsidencia, a través de modificaciones progresivas como deformaciones, con el fin de llegar a una nueva reconfiguración de la geometría del terreno hasta un nuevo equilibrio morfológico.

El estudio de las subsidencias inducidas por minería subterránea, analiza los impactos geomecánicos resultantes de la extracción de recursos en el entorno subterráneo y superficial, evidenciado en múltiples operaciones mineras, como en los casos de las Minas de carbón Yorkshire Coalfield en Inglaterra [2], Mina Nord Pas de Calais Coal Basin en Francia [3], Mina Velenje en Eslovenia [4], Mina de carbón en el distrito de Kyushu – Japón [5], Mina de Au New Afton en Canadá [6], Mina de Fe de Xiaowanggou, en China [7], Mina de Cu Apache Leap, Highway US-60 and Devil’s Canyon, Arizona Estados Unidos [8], y Mina de Carbón Ostrava – Karvina Coalfield [9].

En los casos descritos, la subsidencia observada en las minas es producto de la actividad extractiva de mineral, la cual está vinculada con distintos factores que desencadenan el fenómeno. Entre los que inciden en la subsidencia se encuentran las condiciones geológicas, la deformabilidad del material suprayacente y procesos de disolución; mientras que, los factores que lo desencadenan son eventos sísmicos e incremento de precipitaciones. En el caso de Zaruma en Ecuador, la subsidencia fue causada por la convergencia de estos factores, junto con una actividad minera informal e inadecuados procesos de excavación.

Con base en el contexto geológico descrito en Zaruma se estableció el comportamiento mecánico de los materiales, conforme a los siguientes criterios técnicos: [3] y [10], plantearon que la superficie de subsidencia, a través de una galería subterránea, puede ser aproximada, utilizando la curva de asentamiento inducido por la excavación de un túnel conforme a la distribución Gaussiana [4] y [11], de esa manera, se estableció la evaluación estadística, sobre las observaciones de campo y los registros históricos.

[5] y [12], propusieron la estimación del volumen de los asentamientos máximos en cada sección transversal, generando una Campana de Gauss invertida, mediante volúmenes de asientos, coeficiente corrector, módulo de deformación y la media aritmética de los niveles existentes sobre las bóvedas de las galerías.

[6] y [13], establecieron cuatro escenarios tensos – deformacionales que evidenciaron el proceso de inestabilidad y trabajos de remediación, en relación con el evento de subsidencia y colapso en el sector La Inmaculada, a través de secciones longitudinales del depósito mineral para determinar el comportamiento de los materiales de la sobrecarga.

[7] y [14], determinaron el inadecuado método de extracción de cuerpo mineralizado que generó debilidad en los materiales que conforman la sobrecarga de las galerías mineras lo cual, combinado con factores detonantes, originó colapsos de bóvedas y roturas en el interior de la galería, provocando subsidencia en la superficie.

La ocurrencia de subsidencias mineras en Zaruma responde a una combinación de factores. Entre los principales condicionantes se destaca la debilidad en los materiales de sobrecarga, discontinuidades estructurales y procesos de disolución de rocas. A esto se suma la actividad sísmica y prácticas mineras ilegales, que han comprometido la estabilidad del macizo rocoso, facilitando el desarrollo de colapsos en superficie [8, 15, 13, 10, 16, 17, 18, 19]. Ver Fig. 1.

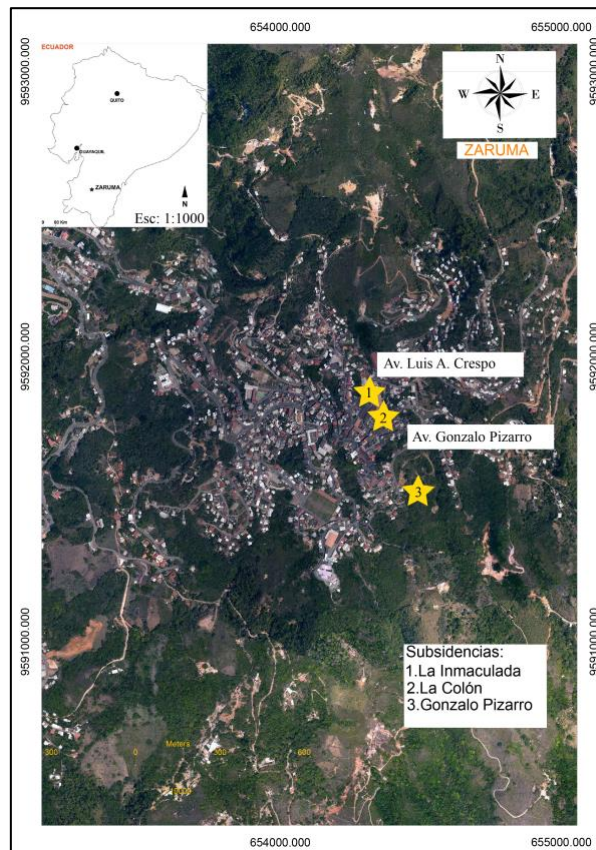


Figura 1. Zona de estudio de aplicación de metodología.

Las subsidencias se remontan a las labores mineras ejecutadas por la *South American Development Company*

(SADCO), [15]. En el área urbana, los eventos se han evidenciado de manera progresiva, iniciando en 2016 en el sector de La Inmaculada, posteriormente en 2020 en Gonzalo Pizarro, y finalmente en 2021 en La Colón [13]. Las subsidencias se han originado, debido a métodos de excavación inadecuados, los cuales provocaron la deformación en la cobertura sobre las galerías subterráneas, derivando en su colapso, mostrando el asentamiento como la expresión morfológica del proceso de subsidencia.

La estimación de la subsidencia se realizó mediante la aplicación del método semiempírico desarrollado por [13], [10] y [20]. El método ha incorporado la consideración de materiales con comportamiento elástico, así como, las propiedades de los macizos rocosos y analizó la respuesta de la roca a las cargas inducidas por la formación de la galería [21]. Además, se considera las condiciones geotécnicas en diferentes niveles de extracción subterráneo, así como, los volúmenes y asentamiento máximo.

En el presente estudio se realizó una comparación entre criterios homogéneos aplicados a métodos empíricos basados en inspección visual y enfoques analíticos utilizados para la predicción de asentamientos máximos en superficie. Además, se incorporó un análisis estadístico de los resultados obtenidos. Según la evidencia recopilada se plantea implementar una etapa inicial de vigilancia en la zona urbana de Zaruma, mediante monitoreo geodésico complementado con instrumentación geotécnica, a fin de establecer un control efectivo sobre la evolución del fenómeno.

El objetivo se estableció en función de características y resultados conseguidos, a través de la aplicación del método semiempírico para analizar subsidencias. El enfoque permitió simular el comportamiento mecánico de la sobrecarga, posterior a las obras de mitigación en la zona de Zaruma, con la intención de estimar su efectividad en la estabilidad del macizo rocoso y la reducción del riesgo de colapso superficial.

La aplicación del método semiempírico en subsidencias evalúa el comportamiento de los materiales que conforman la sobrecarga terciaria sobre las galerías, una vez implementadas las obras de mitigación. Posteriormente, se comparó la respuesta de la sobrecarga entre diferentes secciones transversales, a lo largo de las galerías subterráneas entre los sectores de Gonzalo Pizarro y el Coliseo, con el propósito de identificar variaciones en la deformación de los materiales. Finalmente se estimaron los asentamientos máximos, como base para establecer un criterio de daño estructural y definir la necesidad de una red de monitoreo inicial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La aplicación de un método de excavación inadecuado para la extracción del cuerpo mineralizado, generó subsidencias en superficie, colapso de bóvedas con expansiones de galerías subterráneas, deformaciones extensivas en el macizo rocoso y afectación de infraestructura superficial.

El análisis de subsidencia se realizó en Zaruma, mediante la aplicación de métodos semiempíricos descritos en [10], y [20], para determinar las deformaciones y estimación de los asentamientos como complemento de una aproximación en los desplazamientos verticales provocado por galerías subterráneas.

Los métodos semiempíricos son procedimientos teórico-empíricos que permitieron evaluar de forma rápida el volumen de asentamientos, con el fin de establecer una primera aproximación de los movimientos inducidos por la excavación de una obra subterránea [12].

La aplicación de métodos semiempíricos se desarrolló con la información de campo y laboratorio recopilada por el IIGE, durante las campañas de mitigación y zonificación geotécnica, entre el 2017 y 2023.

En el análisis de la información de campo se recolectó registros de sondeos [6] y [13], caracterización de macizos rocosos en superficie y subterráneo, modelos geológicos y estructurales [11] y [22].

Con base en la observación y experimentación se establecieron los parámetros de suelos y roca intacta. En suelos se realizaron ensayos triaxiales UU no consolidado no drenado, así como, determinaciones de límite líquido, índice de plasticidad, contenido de humedad, cohesión y ángulo de fricción. En el caso de roca intacta se aplicaron ensayos de carga puntual y compresión uniaxial, a partir de los cuales se calcularon el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

El modelo geológico – geotécnico se estableció a partir de los resultados de laboratorio sobre la ingeniería de macizos rocosos en superficie, subterráneo y ensayos de laboratorio, mediante secciones transversales y longitudinales. La evaluación de asentamientos verticales se realizó, a través de una sección crítica para la caracterización geotécnica a semi detalle de la cobertura terciaria asociada a zonas de subsidencia. En la evaluación se consideraron las condiciones geotécnicas de los rellenos aplicados a las subsidencias, como obra de mitigación.

La sección crítica se subdividió en perfiles transversales, para la aplicación del método semiempírico de Madrid [20], y [12]. El método calcula el asentamiento diferencial con una estimación de los niveles de subsidencia, en el cual se incluyen las características

geométricas de la galería y profundidad, así como, la clasificación de unidades litológicas entre parámetros físicos y mecánicos, considerando la reducción en la resistencia del macizo rocoso y propiedades de rigidez [23].

En Zaruma el método se aplicó considerando los espesores de las unidades geotécnicas, parámetros de resistencia al corte cohesión y ángulo de fricción, propiedades deformacionales y peso específico. A partir de estos datos, se estimó el volumen de los asentamientos máximos en cada sección transversal con la generación de una Campana de Gauss invertida [5] [12], debido al reajuste tensional asociado a la pérdida de sección. En condiciones de elevados esfuerzos la anisotropía del macizo rocoso puede cambiar el comportamiento del mecanismo de falla [24]. Los volcánicos terciarios meteorizados se presentan con niveles litológicos caracterizados por condiciones de roca blanda, saprolito y roca meteorizada. La presencia de discontinuidades en el macizo influye en la estabilidad de las galerías durante la excavación. Las deformaciones del terreno por la excavación exponen en cada sección transversal los asentamientos máximos.

3. MÉTODO ANALÍTICO-SEMIEMPÍRICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DE SUBSIDENCIA.

Determinar el asentamiento máximo asociado a la excavación de galerías subterráneas, para la extracción de recursos minerales, a través de distintos métodos de excavación, generó incertidumbres durante la evaluación de subsidencia en Zaruma. Por esta razón, el comportamiento de la subsidencia relacionada con el material que genera la sobrecarga, fue analizado, con un enfoque teórico - semiempírico orientado a estimar los asentamientos máximos.

Con base en el criterio de [3] y [10], se sugirió que el asentamiento máximo, a través de una galería subterránea, puede ser aproximada de la curva de asentamiento inducido por la excavación de un túnel conforme a la distribución Gaussiana [4] y [11], por esta razón, se estableció la evaluación estadística sobre los insumos empíricos provenientes de actividades de campo, laboratorio y registros históricos en el proceso de formulación de la metodología.

En la estimación de la subsidencia se valoró los movimientos verticales en superficie, de acuerdo con el asiento máximo en el eje y la distancia al punto de inflexión desde el eje de la galería, mediante la expresión (1):

$$S_{(x)} = S_{\max} * \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

Donde, $S_{(x)}$ es la distancia horizontal desde el eje de la

galería (m), S_{\max} es el asiento máximo (m) e, i punto de inflexión (m).

[12] y [25], evidenció la estimación de los asentamientos máximos, mediante la ecuación (2):

$$S_{\max} = \psi * (0,85 - U) * \frac{\gamma * D^2}{E} \quad (2)$$

Donde, ψ es el factor de subsidencia que introduce la influencia del proceso constructivo método tradicional, galerías entibadas, E es el módulo de elasticidad (MPa), U es el coeficiente de Poisson, γ es peso específico (MN/m³), ver Tabla 2, D es el diámetro medio de la excavación (m).

Los parámetros de asentamiento se relacionan con el volumen de asientos V_s (m³), mediante la expresión (3):

$$S_{\max} = \frac{V_s}{2,5 * i} \quad (3)$$

En la situación del punto de inflexión plantea la ley de asentamientos propuesta por [12] y [26], a través de la expresión (4):

$$\frac{i}{D} = \eta * (0,52 \frac{H}{D} - 0,21) \quad (4)$$

Donde, η es el parámetro que tiene en cuenta el tipo de material (ver Tabla 1), los datos se alinean con la Tabla 2 que permite sustentar técnicamente las inferencias, modelaciones y análisis realizados. En el fenómeno de Zaruma se utilizó la recomendación de [17] y [27], H es la altura desde el centro de la excavación hasta el perfil del terreno natural (m), D es el diámetro de excavación (m), i punto de inflexión (m).

Tabla 1: Valores del coeficiente η y la relación geológica. Adaptado de [22] y [27].

Unidad Geológica	Unidad Geotécnica	η
Cuaternario	UG1	0,6
Terciario alterado	UG2-UG3	0,9
Terciario inalterado	UG4	1,3
Terciario Rocosos	UG5	1,6
Cuaternario	UR	0,6

[22] y [27], señaló que el semi ancho de la bandeja de asientos es $2,5 * i$ y el ancho total $5 * i$, como se muestra en la Fig. 2.

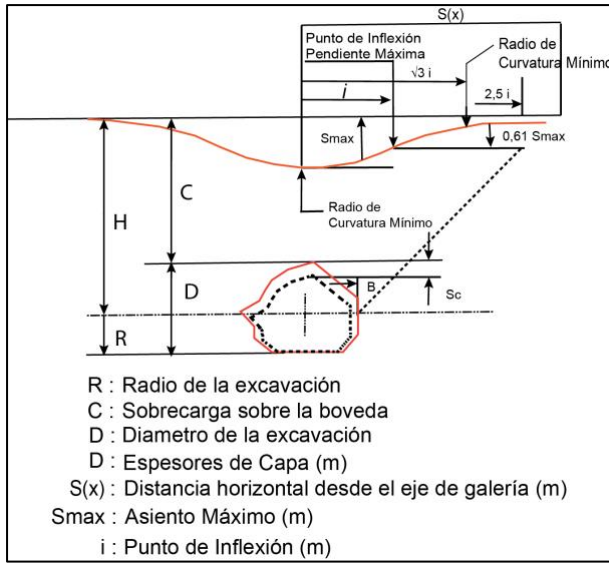


Figura 2: Nomenclatura de Subsidencia Modificada de [22] y [27].

[14] y [26], describió que en el caso de varios niveles de terreno se calcula un valor medio ponderado mediante parámetros de ajuste para η , mediante la expresión (5).

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i h_i}{Rtc} \quad (5)$$

Donde, η_i es el coeficiente de la capa asignado por valores de coeficiente descrito en [22] y [27], Rtc es la sumatoria de los espesores de las capas sobre la bóveda (m), η es el parámetro que tiene en cuenta el tipo de terreno, h_i es el espesor de la capa (m).

[2] y [20], determinaron que los movimientos horizontales en superficie se simplifican adoptando una ley trapezoidal para $H/D > 5$ por tanto, se adaptan a la siguiente expresión (6):

$$\frac{H}{D} = \frac{Rtc + (D \cdot 0.5)}{D} \quad (6)$$

Donde, H es la altura desde el centro de la excavación hasta el perfil del terreno natural, (m), D es el diámetro de excavación (m), Rtc es la sumatoria de los espesores de las capas sobre la bóveda (m).

[12] y [25], estimaron los asentamientos máximos, mediante la ecuación aplicada para el módulo de elasticidad (ver Tabla 2), a través de la expresión (7).

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i}{Rtc} \quad (7)$$

Donde, E_i es el módulo de Young (MPa), h_i es el espesor de la capa (m), Rtc es la sumatoria de los espesores de las capas sobre la bóveda (m).

[12] y [25], plantearon la estimación de los asentamientos máximos, mediante la ecuación (8), aplicada para el coeficiente de Poisson (ver Tabla 2).

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i h_i}{Rtc} \quad (8)$$

Donde, μ_i es el coeficiente de Poisson, h_i es el espesor de la capa (m), Rtc es la sumatoria de los espesores de las capas sobre la bóveda (m).

[12] y [25], calcularon la estimación de los asentamientos máximos con el uso de la ecuación (9), aplicada, para el factor de corrección que introduce la influencia del proceso constructivo.

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i h_i}{Rtc} \quad (9)$$

Donde, ψ_i es el factor de corrección por la influencia del proceso constructivo, h_i es el espesor de la capa (m), Rtc es la sumatoria de los espesores de las capas sobre la bóveda (m).

[12] y [25], estimaron los asentamientos máximos empleando, la ecuación para el peso específico (ver Tabla 2), mediante la expresión (10).

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{Rtc} \quad (10)$$

Donde, γ_i es el peso específico (MN/m^3), h_i es el espesor de la capa (m). Rtc es la sumatoria de los espesores de las capas sobre la bóveda (m).

El método propuesto por [2] y [20], se basó en una secuencia de perfiles transversales, en la que interviene una sección longitudinal de terreno (ver Fig. 3), que consideran las capas superficiales constituidos por rellenos o suelos cuaternarios y por niveles más rígidos compuesto por capas terciarias, para la estimación del asentamiento máximo (Ver Fig. 4).

El modelo geotécnico se estableció para el área del proyecto en seis categorías considerando la clasificación de los suelos y macizos rocosos, así como, los ensayos geotécnicos. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Diseño de unidades geotécnicas para la estimación de asiento máximo en el sector de Zaruma provincia de El Oro – Ecuador.

UG	T	h (m)	γ ($\frac{MN}{m^3}$)	C (MP _a)	θ (°)	E (MP _a)	μ
UG1 ¹	SR	5,90	0,02	0,08	33	37,72	0,10
UG2 ¹	SP	8,90	0,02	0,16	27	158,91	0,10
UG3 ²	RA	16,10	0,02	0,07	43	346,19	0,10
UG4 ²	RMA	17,00	0,02	0,54	52	1 767,51	0,10
UG5 ²	RF	20,40	0,02	0,05	65	85 390,00	0,19
UR ¹	RC	55,80	0,02	0,01	40	35,97	0,17

¹ [10][6], ² II GE, 2022-Presente estudio.

UG: Unidad Geotécnica, UR: Unidad Relleno, T: tipo, h: espesor, γ : peso específico, C: cohesión, θ : ángulo de fricción, E: módulo Young, μ : módulo Poisson. SR: Suelo Residual, SP: Saprolito, RA: Roca

Alterada, RMA: Roca Moderadamente Alterada, RF: Roca Fresca, RC: Relleno Compacto.

3.1 Caracterización Geológica de la Actual Superficie de Subsistencia

Las galerías subterráneas informales se desarrollan en unidades litológicas compuestas por lavas andesíticas porfídicas, basaltos andesíticos y brechas volcánicas intercaladas con tobas de cristales de composición intermedia, correspondientes al intervalo Oligoceno–Mioceno [28]. Estas secuencias volcánicas están cortadas por intrusivos relacionados con depósitos epitermales y pórfidos cupríferos de edad miocénica [29]. La configuración geológica constituye un insumo base para la aplicación del método semiempírico.

3.2 Sección Crítica Gonzalo Pizarro – Coliseo de Deportes

Las galerías subterráneas en la sección Gonzalo Pizarro – Coliseo de Deportes tienen una longitud de 400 m expuestos en la sección longitudinal. En la sección crítica las galerías subterráneas se encuentran bajo los socavones de Gonzalo Pizarro, Colón y La Inmaculada en la zona urbana de Zaruma, como se muestra en la Fig. 3.

Los estudios de subsidencia en los sectores de La Inmaculada, Gonzalo Pizarro y La Colón, se fundamentan en investigaciones de geofísica, mapeo geológico – geotécnico de superficie y subterráneo, sondeos con recuperación de testigos y ensayos de laboratorio. La recopilación de la información previa permite mostrar la estimación de asentamiento máximo en la sección longitudinal entre los socavones, posterior a obras de mitigación ejecutadas en el sector.

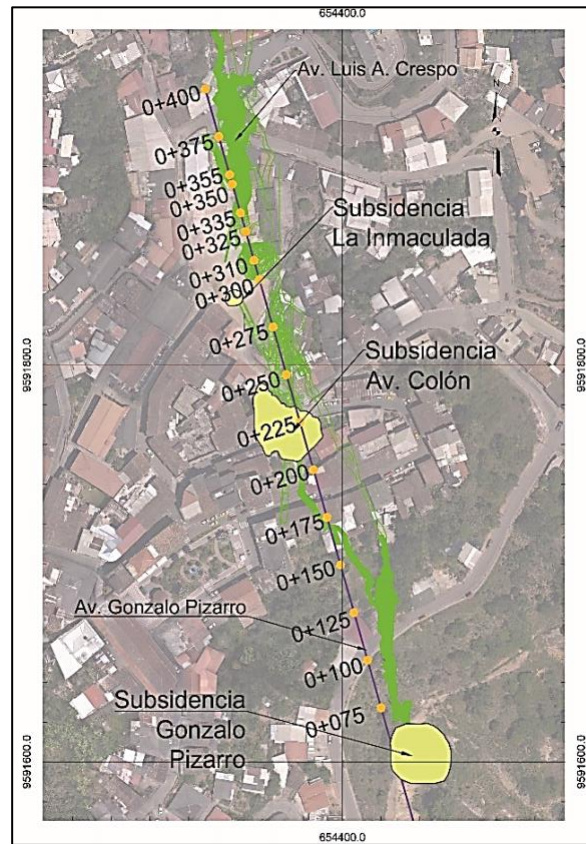


Figura 3: Sección Longitudinal entre los socavones de Gonzalo Pizarro y La Inmaculada. IIGE, 2022-Presente estudio.

La evaluación de la sección crítica se basó en dos sondeos exploratorios de 62 m y 58 m de profundidad, caracterización de macizo rocoso subterránea y muestras de roca recolectadas en diferentes niveles. Los datos obtenidos permitieron estimar el asentamiento máximo.

El modelo geotécnico para las galerías subterráneas estableció la agrupación de suelos en residual e inmaduro y agua subterránea, así mismo, la caracterización litológica alrededor de las galerías subterráneas estableció cuatro unidades litológicas considerando la toba de cristales de composición andesítica terciaria, afectada por diferentes estados de alteración y el relleno compactado colocado sobre los socavones. En la Fig. 4 se muestra la sección geológica - geotécnica para el sector entre Gonzalo Pizarro y coliseo de Deportes (0+075 – 0+400).

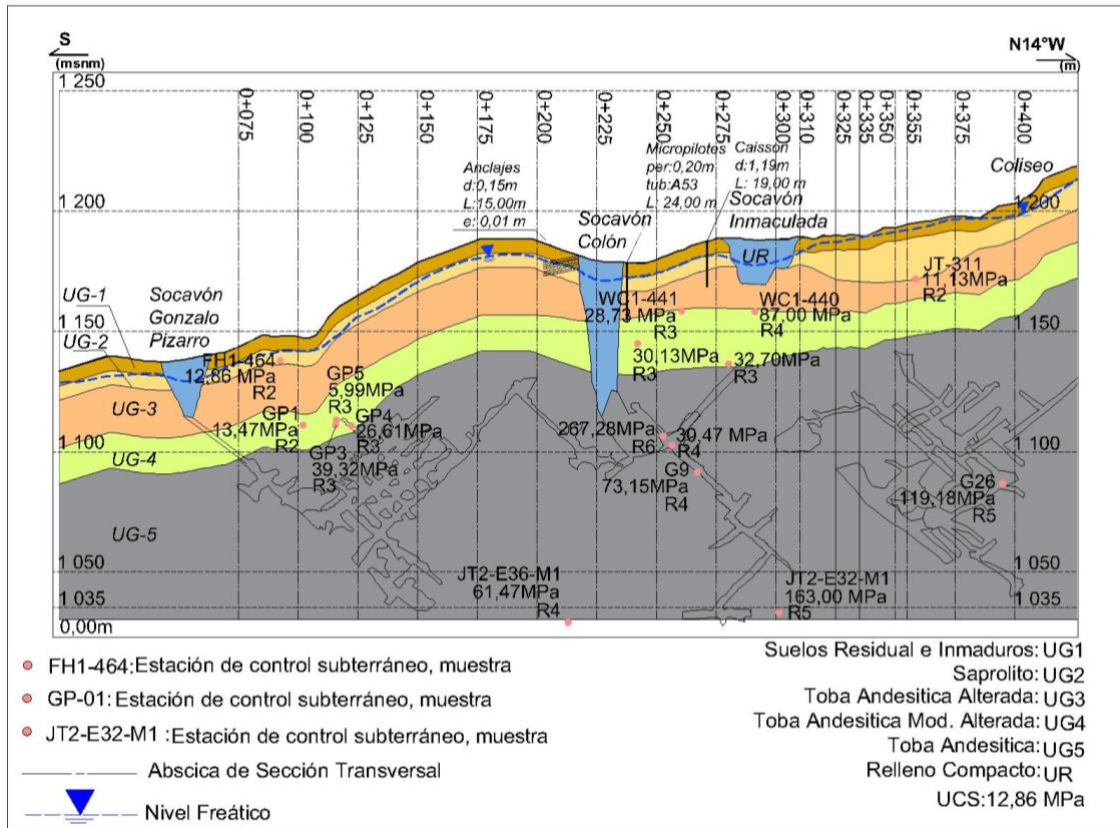


Figura 4: Sección geológica – geotécnica de sector de estudio con localización de muestras para ensayos en laboratorio. IIGE, 2022- Presente estudio.

El comportamiento del material que genera la sobrecarga posterior a las obras de mitigación se evaluó, con ayuda de los espesores de unidades litológicas, en secciones transversales, definición de parámetros físicos de unidades litológicas y geotécnicas, apoyada en la topografía, geología, información de laboratorio, trabajo de campo y criterio de daños.

El incremento de la capacidad portante de los rellenos en los socavones se realizó, a través de técnicas de compactación y sistemas de sostenimiento tipo anclajes, *caisson* y micropilotes. Posteriormente, se evaluó el comportamiento del relleno y la sobrecarga aplicando módulos de elasticidad en las cinco unidades geotécnicas identificadas y la unidad de relleno, para estimar el asentamiento máximo y delimitar la superficie afectada por la subsidencia.

En el sector no existe un estudio técnico para la explotación minera que detalle la viabilidad económica, de acuerdo con la morfología del cuerpo mineral en conformidad con la topografía, geología y minería. Tampoco se cuenta con un método para la extracción de los minerales actualizado, en relación con la mena y el estéril. El método de excavación subterráneo que se ha efectuado, tiene relación directa con las subsidencias

debido a que, no cumple con la normativa de extracción.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método semiempírico permiten estimar los asentamientos generados por el proceso de subsidencia simulando el comportamiento de los materiales que conforman la sobrecarga. Posterior a las obras de mitigación en la zona de Zaruma, se presentan los asentamientos máximos, secciones transversales, así como, los criterios de daños, superficies de subsidencia, y red de monitoreo preliminar.

En la sección se presentan 16 perfiles de asentamiento vinculados con las galerías subterráneas, elaborados con base en la afectación provocada por las subsidencias ocurridas en la zona de Zaruma. La evaluación de las secciones transversales permitió estimar los asentamientos, con el fin de establecer los movimientos verticales admisibles, en función del tipo de infraestructura y asentamiento máximo. Sin embargo, la clasificación propuesta debe considerarse orientativa y conservadora para la implementación del monitoreo, debido a las diversas variables, que intervienen entre las galerías subterráneas y la infraestructura, como se muestra en la Fig. 5.

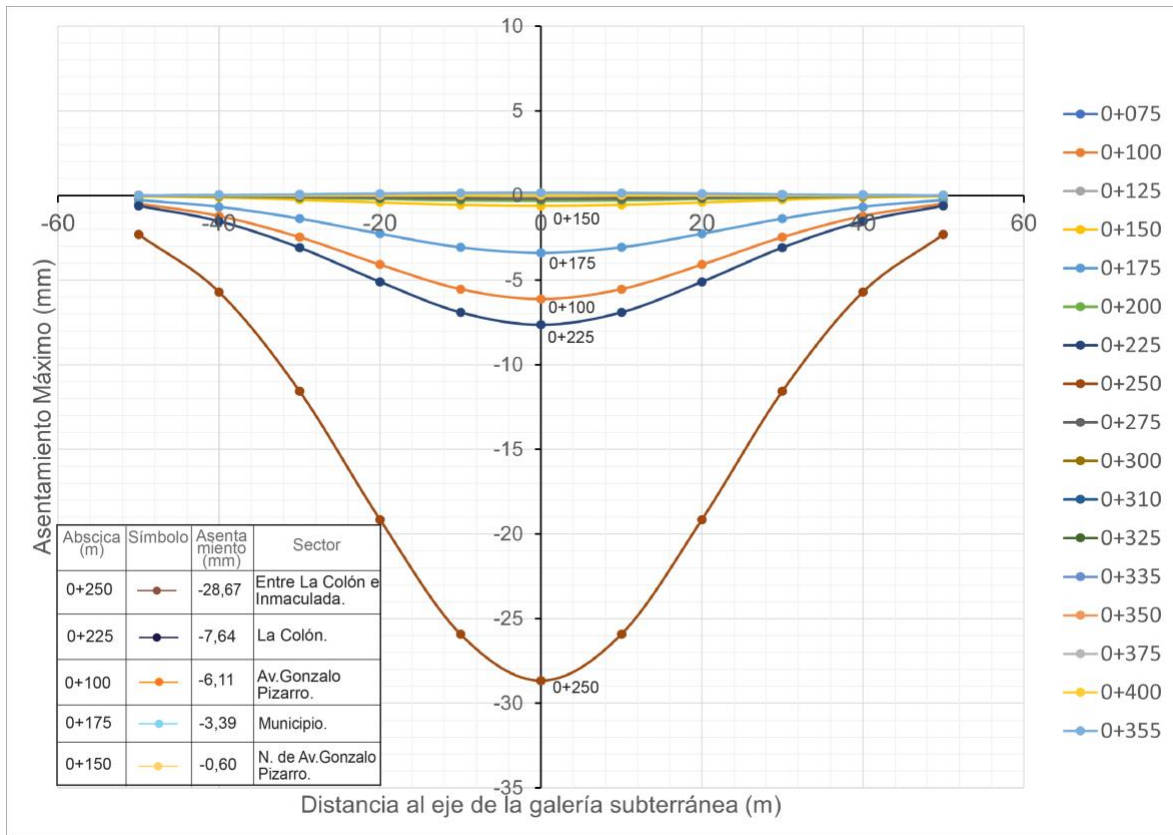


Figura 5: Medida del asentamiento máximo en las secciones transversales entre Gonzalo Pizarro y Coliseo. IIGE, 2022.

La metodología propuesta, basada en la deformación del terreno inducida por la excavación, sugiere rangos de asentamientos admisibles. En el presente estudio los rangos se relacionan con: el tipo de infraestructura para establecer límites admisibles, mediante la comparación con criterios de daños, orientando inicialmente las acciones de monitoreo y control en la zona. El criterio se describe en la Tabla 3.

Tabla 3: Criterio de daño admisible en infraestructura superficial, con base en resultados de asentamiento máximo.

Asentamiento Admisible (mm)		Observaciones
-0,009	-0,32	Edificios cimentados superficialmente, sin daños aparentes.
-0,60	-3,39	Edificios cimentados superficialmente, sin daños aparentes en zona de influencia de obra subterránea.
-6,11	-7,64	Edificios cimentados superficialmente, con daños en zona de influencia de obra subterránea.
>-28,67		Edificios cimentados superficialmente con daños.

Los espesores de las unidades geotécnicas terciarias y el diámetro de galerías subterráneas (D), en el sector de Zaruma, se relacionan con los volúmenes de asientos (Vs). Los resultados proponen que a medida que disminuye el recubrimiento terciario (Hp), se incrementa el Vs; sin embargo, la influencia de la heterogeneidad del macizo y la geometría de las galerías subterráneas, a medida que avanza la excavación inadecuada, adopta Vs diferenciales en el macizo terciario, debido a sobreexcavación.

A partir de los espesores de Hp y D se sugiere emplear la relación entre ellos como un parámetro de control inicial, con el propósito de identificar indicios de sobreexcavación, complementado con el monitoreo geodésico. El parámetro se muestra en la Tabla 4.

Considerando, la proporcionalidad inversa entre Hp y Vs se plantea un parámetro de control para la estimación de volúmenes, no obstante, la heterogeneidad en la geometría de la galería genera variaciones en Vs, que podría modificar la ponderación. El parámetro se muestra en la Tabla 5. Los parámetros se encuentran calibrados, de acuerdo con las recomendaciones de [17] y [12], rangos de asentamientos admisibles.

Tabla 4: Parámetro de recubrimiento terciario a considerar en el criterio de control

Parámetro de Recubrimiento Terciario	Condiciones
$H_p/D > 19,20$	Normal
$6,20 < H_p/D < 19,20$	Regular
$4,50 < H_p/D < 6,20$	Intenso
$H_p/D < 4,50$	Muy Intenso

D=diámetro de galería

Tabla 5: Parámetro de volumen de asientos a considerar en el criterio de control

Volumen de Asientos (%)	Condiciones
$V_s > -1,05$	Normal
$-1,08 < V_s < -1,37$	Regular
$-17,31 < V_s < -1,37$	Intenso
$V_s < -17,31$	Muy Intenso

El método de subsidencias semiempírico aplicado en el sector de Zaruma, posterior a las obras de mitigación, expone los siguientes asentamientos máximos:

Tabla 6: Resultados de asentamientos máximos en zona urbana.

Abscisa (m)	Asentamiento máx. (mm)	Sector	Medida Estructural
0+250	- 28,67	La Colón	Sostenimiento y Estabilización
0+225	- 7,64	La Colón	Sostenimiento y Estabilización
0+100	- 6,11	Av. Gonzalo Pizarro	Impermeabilización
0+300	- 0,03	La Inmaculada	Sostenimiento y Estabilización
0+075	- 0,12	Av. Gonzalo Pizarro	Impermeabilización
0+175	- 3,39	Municipio	Impermeabilización

Los asentamientos estimados mediante la metodología semiempírica en sectores de la zona urbana varían entre -0.03 mm a -28.67 mm. Los mayores asentamientos se registran en el sector La Colón, donde se implementaron medidas estructurales de sostenimiento y estabilización. En los sectores de Gonzalo Pizarro, Municipio y La Inmaculada se observan valores mínimos, con medidas de impermeabilización y estructurales, ver Tabla 6.

Los resultados sugieren que la variación de los espesores en la unidad de relleno, en relación con el diámetro de galerías subterráneas y el método de excavación aplicado, podría generar asentamientos hacia la

excavación. Considerando el material de relleno no tiene suficiente cohesión, debido a que es un material de residuo producto del colapso, podría continuar extendiéndose longitudinalmente y desarrollar inestabilidades en superficie. Sin embargo, se sugiere monitorear a lo largo del tiempo, para aprobar o descartar la hipótesis.

5. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el análisis de los asentamientos máximos, mediante secciones longitudinales en el sector de Zaruma se presentan por el material de la sobrecarga, macizos rocosos, geología, y extracción de mineral informal, entre otros. Además, la metodología preliminar implementada puede ser utilizada como base del monitoreo geodésico en el control de deformación superficial.

Los hallazgos basados en la aplicación del método semiempírico para la estimación de asentamientos calibrado, mediante el extendido estudio de [12], expusieron que la configuración geométrica y litológica de las galerías exhiben la deformación del terreno, no obstante, la cobertura terciaria sobre las galerías presenta asentamientos máximos susceptible a daños. Asimismo, la redistribución de tensiones en el interior de la cobertura incrementó el volumen de asentamientos desencadenados por la excavación artesanal. En los modelos tenso deformacionales elaborados por [13], posterior a medidas estructurales del 2017 se evidencian asentamientos de - 5 mm en la Inmaculada, igualmente se describe una deformación máxima de - 30 mm. Seguidamente [22], reportó el asentamiento máximo de socavón - 24 mm. En nuestros resultados se evidencia el mayor asentamiento - 28,67 mm en la zona de transición entre la Colón e Inmaculada relacionado con, la deformación de la cobertura terciaria, sobre las galerías subterráneas. Así como, un proceso de relajamiento entre ambos socavones, posterior a la implementación de las medidas estructurales con valores entre - 0,60 a - 7,64 mm. En el sector se reportó una subsidencia activa en diciembre del 2022 [30]. Posterior al evento se programó un monitoreo geodésico en las zonas de remediación, evidenciando hallazgos con desplazamientos verticales menores a - 20 mm [31]. La evolución temporal de los asentamientos registrados se atribuye al reajuste progresivo del estado tensional en el macizo rocoso, en combinación con la influencia del control ejercido sobre excavaciones informales. La interacción entre los factores descritos modifica la distribución de esfuerzos y la respuesta deformacional en superficie.

El asentamiento máximo sugiere vigilancia desde superficie, a través de un monitoreo geodésico, de acuerdo con la distribución de la cobertura terciaria entre los 16 perfiles de asentamiento vinculados con las

galerías subterráneas. Los límites admisibles de criterios de daños, parámetros de control de indicios de sobreexcavación y volumen de asentamientos podrían ser beneficiosos en una eventual implementación del sistema de monitoreo en el sector, ver Tablas 3, 4 y 5.

El enfoque descrito permite sistematizar el asentamiento máximo siguiendo el análisis de deformación superficial en respuesta a la excavación de las galerías subterráneas y aplicación de extracción de mineral no convencional. A pesar de identificar la afectación de la sobrecarga que corresponde a la cobertura terciaria y geometría de la galería, nuestro estudio y el desarrollado por [13], revelaron existencia de áreas con posibles subsidencias. Los datos obtenidos permitieron identificar asentamientos máximos en sectores de influencia de la sección longitudinal en contraste con las obras de mitigación. La investigación proporciona una oportunidad para aplicar y validar nuevas metodologías en el estudio de subsidencias, contribuyendo al avance del conocimiento sobre los procesos de subsidencia subterráneas y deformación superficial.

La investigación sobre subsidencias subterráneas en Ecuador, particularmente en el caso de Zaruma, se ha desarrollado a partir de métodos observacionales y de la necesidad de respuesta ante eventos catastróficos en ciudades mineras. Este contexto ha generado un impulso para establecer procedimientos fundamentados en el análisis de la amenaza minera.

En el estudio se elaboraron secciones topográficas y litológicas sobre las galerías, posteriormente se evaluaron distintos escenarios de asentamientos en las secciones longitudinales entre los socavones Gonzalo Pizarro y La Inmaculada. Las condiciones de asentamiento se realizaron con la aplicación de un método semiempírico, para la evaluación del asentamiento máximo y la superficie de subsidencia.

El análisis del asentamiento máximo y la superficie de subsidencia requiere de la aplicación del monitoreo geodésico con respecto al criterio de daño admisible, generando información para combinar con técnicas de teledetección y métodos directos de investigación subterránea.

Aunque, se identificaron áreas con asentamientos quedan trabajos adicionales por ser realizados. Por ejemplo, nuevas secciones longitudinales en la zona para correlacionar los asentamientos en diferentes sectores con la aplicación de métodos analíticos y numéricos para un comportamiento del macizo rocoso elasto – plástico [21], así como, la implementación de asentamientos longitudinales y actualización de la topografía subterránea. Otro importante objetivo es identificar la técnica de explotación minera que detalle la viabilidad económica, de acuerdo con la morfología del cuerpo

mineral, en conformidad con la topografía, geología y extracción minera.

Finalmente, nuestro enfoque tiene implicaciones teóricas-empíricas, debido que esto representa un sistema inicial de caracterización de asentamientos con la intención de aplicar en una red de monitoreo.

6. CONCLUSIONES

En el presente documento se exponen los resultados obtenidos mediante, la aplicación de un método semiempírico previamente desarrollado por [17] y [12], orientado a la estimación del asentamiento máximo en una sección crítica representativa. El análisis se realizó en el contexto de las obras de mitigación que se implementaron para controlar la deformación inducida por el socavón ubicado en el sector de La Colón. La variabilidad observada en los asentamientos muestra comportamiento diferencial en el material con baja cohesión en el sector del socavón y su zona de influencia, exponiendo un criterio de daño admisible basado en el estado tensional post excavación y en las propiedades mecánicas degradadas del macizo rocoso afectado.

El método adoptado, para determinar el asentamiento máximo de los materiales que conforman la sobrecarga terciaria encima de las bóvedas de galerías subterráneas, estudió el comportamiento de los materiales posterior a las obras de mitigación e identificó un asentamiento en la abscisa 0+250 m, entre los socavones provocados en los sectores de La Colón y La Inmaculada.

El proceso de asentamiento máximo entre los socavones La Colón y La Inmaculada se puede subdividir en dos escenarios; el primero, corresponde al asentamiento máximo de socavón La Inmaculada con valor de -24 mm [22]. El segundo escenario corresponde a la propagación del asentamiento hacia la Colón con valores posteriores a las obras de mitigación de $-28,67$ mm; por tanto, se sugiere la presencia de una zona de relajamiento entre los dos socavones que necesita monitoreo geodésico inicial.

El comportamiento de los materiales de la cobertura terciaria, según lo descrito, en las unidades geotécnicas sugiere un comportamiento elástico orientado como una respuesta inicial del material, evidenciando deformaciones, bajo condiciones de cargas estáticas y dinámicas asociadas con excavación artesanal. Además, los materiales se encuentran afectados por la alteración del depósito mineral, de forma que puede generar un asentamiento máximo por influencia de condiciones del macizo rocoso y disminución de propiedades friccionales, a lo largo de los planos de discontinuidad, con tendencia a facilidad de fracturamiento [32].

Con base en los resultados de asentamiento se sugiere simular el proceso de subsidencia, considerando el

método de excavación en relación con: la geometría de la galería para el diseño de soportes en la obra subterránea mediante, el método de convergencia – confinamiento [21], debido al comportamiento de la cobertura terciaria y al criterio de rotura para suelos y rocas. La simulación deberá permitir la identificación de secciones críticas con enfoque de extracción y sostenimiento, así como, la evaluación de las cargas dinámicas y estáticas.

La estabilidad de las galerías subterráneas debe evaluarse cuidadosamente considerando que los esfuerzos de la excavación se transfieren alrededor del macizo rocoso [33]. Esta transferencia de esfuerzos, además, puede generar un asentamiento máximo a mayor escala, paralelo al filón mineral.

La evaluación propuesta resume el comportamiento del suelo y la efectividad de las obras de mitigación en el socavón de La Colón ofreciendo un marco propicio para la gestión de riesgos y el diseño de futuras intervenciones en infraestructura similar.

7. RECOMENDACIONES

Los autores sugieren realizar un análisis de subsidencia y predicción con datos medidos, aplicado a los socavones ubicados en los sectores Gonzalo Pizarro, Colón e Inmaculada orientado por métodos analíticos y numéricos.

Plan de monitoreo geotécnico [34]. La implementación del plan se establecerá a través de, bases fijas de pilares geodésicos para el monitoreo de movimientos diferenciales de asentamiento, inclinómetros entre galerías subterráneas e infraestructuras, piezómetros abiertos, así mismo, el control de grietas y fisuras en la zona urbana.

Implementación de metodología de explotación minera que exponga la viabilidad económica, de acuerdo con la morfología del cuerpo mineral y minimice la amenaza por subsidencia.

Los resultados de asentamiento, permiten sugerir la simulación de la subsidencia por el método de excavación acompañado de un análisis tenso - deformacional de las obras subterráneas.

La combinación de las metodologías permitirá analizar las secciones críticas con un enfoque de extracción y sostenimiento, así como, gestionar los riesgos, garantizando la estabilidad de las obras subterráneas y las infraestructuras en superficie.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Singh y B. Dhar, “Sinkhole Subsidence due to mining,” *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 327-341, 1997.
- [2] C. Beevers y K. Wardell, “Recent research in mining subsidence,” *Trans I*, pp. 114: 223-244, 1954-1955.
- [3] M. Dejean y F. Martin, “Amplitude of subsidence of underground openings subject to the influence of mining adjacent and below,” *Proc.Szmp.Subsidence in Mines Austr*, pp. 1-5, 1973.
- [4] I. Sovinc, N. Hass y M. Ribicic, “Prediction and evaluation of subsidence above a thick coal seam,” *Numerical Models in Geomechanics*, pp. 814-819, 1982.
- [5] Y. Hiramatsu, H. Okamura y K. Sugawara, “Surface subsidence and horizontal displacement caused by mining inclined coal seams,” de *Proc. 4th Congress International Society for Rock Mechanics*, Montreux, 1979.
- [6] M. Clayton, M. Dugie, A. Le Richie, C. Mckane y A. Davies, “Development of a monitoring network for surface subsidence at New Golds New Afton block cave operation,” *Australian Centre for Geomechanics*, 2018.
- [7] F. Ren, D. Zhang, J. Cao, M. Yu y S. Li, “Study on the Rock Mass Caving and Surface Subsidence Mechanism Based on an In Situ Geological Investigation and Numerical Analysis,” *Hindawi*, p. 18, 2018.
- [8] BGC ENGINEERING INC, “Caving-Induced Subsidence Impact on Apache Leap, Highway US-60 and Devil’s Canyon,” *Vancouver - Canada*, 2020.
- [9] E. Jirankova y M. Lazecky, “Ground surface uplift during subsidence trough formation due to longwall mining in the shaft protection pillar of the CSM Mine,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 81, pp. 01-16, 2022.
- [10] R. Peck, “Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground.,” In *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics*, pp. Volume 7, pp. 225–290, 1969.
- [11] G. Yanxia, L. Yiwen, T. Pengju y M. Chunqiao, “Modification of Peck Formula to predict surface settlement of tunnel construction in water-rich sandy cobble strata and its program implementation,” *MDPI Sustainability*, pp. 14, 14545., 2022.

- [12] F. Rubio y C. Oteo, Nuevo Modelo Madrid para la estimación de asientos producidos en túneles con tuneladoras EPB de gran diametro, Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2010.
- [13] D. Burbano, A. Rivadeneira, A. Cerón y T. Garcia, “Análisis tenso-deformacional de las obras de remediación implementadas para estabilizar la subsidencia minera bajo la Escuela La Inmaculada, Zaruma - Ecuador,” Investigación y Desarrollo Figempa, pp. 12:01-14, 2021.
- [14] Z. Gu, Y. Zhao, R. Gao y L. Wu, “Research on the prediction Model of Mine Subsidence based on Object-Oriented and Probability Integration Method,” Wiley, p. 14, 2022.
- [15] P. Billingsley, “Geology of the Zaruma Gold District of Ecuador,” Second Pan-American Scientific Congress, p. VolLXXIV:74, 1926.
- [16] M. Jácome, G. Martinez y M. Valdes, “Detection of terrain deformation using InSAR techniques in relation to results on terrain subsidence (Ciudad de Zaruma, Ecuador,” Remote Sensing, , p. 12(10),. 2020.
- [17] L. Ammirati, N. Mondillo y D. Martire, “Monitoring land surface deformation associated with gold artisanal mining in the Zaruma City (Ecuador),” Remote Sensing, 2020.
- [18] P. Carrión, M. Aguilar, F. Morante, M. Dominguez, C. Sanchez, A. Sanchez, J. Briones, R. Blanco, J. Rizo y E. Berrezueta, “Surface and underground geomechanical characterization of an area affected by instability phenomena in zaruma mining zone (Ecuador),” Sustainability (Switzerland), vol. 13, pp. 1-18, 2021.
- [19] P. Carrión, J. Solórzano, M. Chávez, R. Blanco, F. Morante, M. Aguilar y J. Briones, “Evaluation of Geomechanical Features and Stability for the recommendations and rehabilitation of the Humberto Molina Hospital, Zaruma, El Oro, Ecuador,” WIT Transactions on Ecology and the Environment, vol. 241, pp. 01-12, 2020.
- [20] C. Oteo, M. Arnaiz, J. Trabada y M. Melis, The Madrid Model: a semi empirical method for subsidence estimating, Oslo: World Tunell Congress, 1999.
- [21] C. Carranza y C. Fairhurst, “The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion,” International Journal of Rock Mechanics, vol. 36, pp. 777-809, 1999.
- [22] E. Moreno, Aplicación de modelos teóricos para estimar la subsidencia minera que afecta el área de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría”, cantón Zaruma.”, Quito: thesis, UCE FIGEMPA, Quito, Ecuador, 2019.
- [23] F. Sandrone y V. Labiouse, “Analysis of the evolution of road tunnels equilibrium conditions with a convergence - confinement approach,” Rock Mech Rock Eng, vol. 43, pp. 201-2018, 2010.
- [24] A. Vakili, J. Albrecht y M. Sandy, “Rock Strength Anisotropy and its importance in underground geotechnical design,” de Third Australasian Ground Control in Mining Conference AUSROCK, AUSROCK, 2014.
- [25] C. Oteo y C. Sagaseta, Manual de túneles y obras subterráneas: subsidencia producida por Túneles, Calor López Jimeno., 1997.
- [26] C. Sagaseta y C. Oteo, Análisis de la subsidencia originada por la excavación de túneles, Madrid: 1er Simposio Nacional de Túneles, 1974.
- [27] USAC, “Previsión de asientos durante la excavación de túneles de línea,” Instrucción técnica USA-IT003, Madrid, 2001.
- [28] T. Pratt, F. Figueroa y B. Flores, “Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 3° and 4° S,” Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental Report 1 CODIGEM-BGS, Quito, 1997.
- [29] P. Schutte, “Geochronology, geochemistry, and isotopic composition (Sr,Nd,Pb) of Tertiary Porphyry Systems in Ecuador,” Université de Genève Department de Minéralogie, Genève, 2010.
- [30] IIGE, “Estudio de prospección geológico geofísico del sitio de la Inmaculada socavón 27 diciembre 2022,” IIGE, Quito, 2022.
- [31] IIGE-DGI, “Informe Ejecutivo,” Proyecto de Zonificación Geotécnica de las ciudades de Zaruma y Portovelo, Quito, 2023.
- [32] H. Belyadi, E. Fathi y F. Belyadi, “Rock Mechanical Properties and In Situ Stresses,” Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs, pp. 207-224, 2017.
- [33] P. Wang, H. Li, Y. Li y B. Cheng, “Stability analysis of backfilling in subsiding area and optimization of the stoping sequence,” J Rock Mech Geotech Eng, vol. 5, pp. 478-485, 2013.
- [34] A. Leventhal, T. Hull, A. Steindler, D. Matheson, D. Kray, D. Christie, G. Robinson y I. Sheppard, “Management of mine subsidence impact upon mainline railway infrastructure - the continued flirtation of underground mining with the brick arch culvert at Myrtle Creek, Tahmoor,” International Journal of Geotechnical Engineering , vol. 8, n° Maney&Son, pp. 414-418, 2014.