

GEOMECHANICAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF THE EFFECTS OF ROCK MASSIF IN ZARUMA CITY, ECUADOR

Paúl Carrión Mero, PhD.^{1,4}, Roberto Blanco Torrens, PhD^{1,5}, César Borja Bernal, M.Sc.⁶, Maribel Aguilar Aguilar, Ing.^{1,4}, Fernando Morante Carballo, PhD^{1,2,3}, and Josué Briones Bitar, Ing.¹

¹ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. pcarrion@espol.edu.ec, maesagui@espol.edu.ec, briones@espol.edu.ec

² ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Geo-recursos y Aplicaciones GIGA, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. fmorante@espol.edu.ec,

³ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. fmorante@espol.edu.ec,

⁴ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. mchavez@espol.edu.ec.

⁵ Facultad de Geología y Minas, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Avenida Calixto García 15, 83300 Moa, Cuba

⁶ Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, Ingeniería Geológica, geologoborja@gmail.com

Abstract -- Mining as an industrial activity requires a comprehensive study of all its implications to develop it in a sustainable environment, not only the environmental section but a network with industrial safety, risk studies, aquifer protection and even the development of cities. Informal mining activity occurring in Zaruma city, Ecuador Cultural Heritage, it has generated affectations in the rock mass located below the village, subjecting people and infrastructure to constant risks. The aim of the present project is to evaluate the stability of the massif by the geomechanical characterization and valuation of the existing stability conditions, which allow the delineation of prevention and control strategies according to the security of the citizens. The methodology for this work is performed through i) Configuration of the stability problem in the urban center of Zaruma, ii) Geomechanical characterization based on the physical and mechanical properties of the rocks such as the degree of fracturing, Rock Quality Designation (RQD), Index Geology of Resistance (GSI) and degree of deterioration of the massif, iii) Analysis of the main effects of the massif considering natural aspects and mining works,

iv) Evaluation of stability conditions using the RMR of Bieniawski and Laubscher criteria in their classification (MRMR), with the establishment of prevention and control measures. From the analysis performed, it can be affirmed that the rock mass of the study sector presents MRMR values were between 26 and 64 corresponding to a fair-poor classification of the massif, representing potential instability conditions, considering also the occurrence of possible affectations that worsen with the passing of time, which makes it possible to recommend lines of control and prevention that must be applied urgently

Keywords – Rock massif, informal mining, geomechanical characterization, RMR, GSI.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.362>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y ANÁLISIS DE LAS AFECTACIONES DEL MACIZO ROCOSO EN EL CASCO URBANO DE ZARUMA, ECUADOR.

Paúl Carrión Mero, PhD.^{1,4}, Roberto Blanco Torrens, PhD^{1,5}, César Borja Bernal, M.Sc.⁶, Maribel Aguilar Aguilar, Ing.^{1,4}, Fernando Morante Carballo, PhD^{1,2,3}, and Josué Briones Bitar, Ing.¹

¹ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. pcarrion@espol.edu.ec, maesagui@espol.edu.ec, briones@espol.edu.ec

² ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Geo-recursos y Aplicaciones GIGA, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. fmorante@espol.edu.ec,

³ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. fmorante@espol.edu.ec,

⁴ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. mchavez@espol.edu.ec.

⁵ Facultad de Geología y Minas, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Avenida Calixto García 15, 83300 Moa, Cuba

⁶ Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, Ingeniería Geológica, geologoborja@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Resumen– La minería como actividad industrial, requiere un estudio integral de todas sus implicaciones para desarrollarla en un ámbito sostenible, no solamente el apartado ambiental sino un tejido de interacciones con la seguridad industrial, estudios de riesgos, protección de acuíferos e incluso el desarrollo de ciudades. La actividad minera informal que ocurre en la ciudad de Zaruma, Patrimonio Cultural del Ecuador, ha generado afectaciones en el macizo rocoso ubicado por debajo del casco urbano, sometiendo a las personas e infraestructuras del lugar a riesgos constantes. El objetivo del presente proyecto es evaluar la estabilidad del macizo mediante la caracterización geomecánica y valoración de las condiciones de estabilidad existentes, que permitan el delineamiento de estrategias de prevención y control acorde a la seguridad de la ciudadanía. La metodología para este trabajo se realiza mediante i) Configuración del problema de la estabilidad en el centro urbano de Zaruma, ii) Caracterización geomecánica en base a las propiedades físico mecánicas de las rocas como grado de fracturación, Rock Quality Designation (RQD), Índice Geológico de Resistencia (GSI) y grado de deterioro del macizo, iii) Análisis de las principales afectaciones del macizo considerando aspectos naturales y labores mineras, iv) Evaluación de las condiciones de estabilidad empleando el RMR de Bieniawski y criterios de Laubscher en su clasificación (MRMR), con el establecimiento de medidas de prevención y control. A partir del análisis realizado, se puede afirmar que el macizo rocoso del sector de estudio presenta valores de MRMR en el rango 26-64 que corresponde a la clasificación normal-mala del macizo, representando condiciones potenciales de inestabilidad, considerando además la ocurrencia de posibles afectaciones que se agravan con el transcurso del tiempo, que permite recomendar líneas de control y prevención que deben ser aplicadas urgentemente.

Palabras claves– Macizo rocoso, minería informal, caracterización geomecánica, RMR, GSI.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.3> 2

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”, 24-26 July 2019, Jamaica.

generados como medio de sostenimiento por las compañías, que operaban hasta los años 70, lo que ha provocado una afectación a la estabilidad en esos sitios.

Todo esto ha producido algunas afectaciones en los terrenos y obras de superficie, y ha creado situación potencial de peligro, que puede ser agravada por la continuación de trabajos que hagan pequeños mineros en los sectores considerados susceptibles de pérdida de estabilidad.

Otro aspecto a tener en cuenta es que en muchos casos no se conocen ni la ubicación exacta, ni el volumen de estos vacíos, lo que agrava más la situación. A partir de esta problemática se realiza un trabajo de investigación cuyo principal objetivo es definir las afectaciones principales que se han producido en el macizo rocoso mediante la caracterización geomecánica y la valoración de la estabilidad del sector.

II. ENTORNO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

La zona de estudio para este trabajo es el cantón Zaruma perteneciente a la provincia de El Oro, ubicado al sur del país como de observa en la Fig.1.

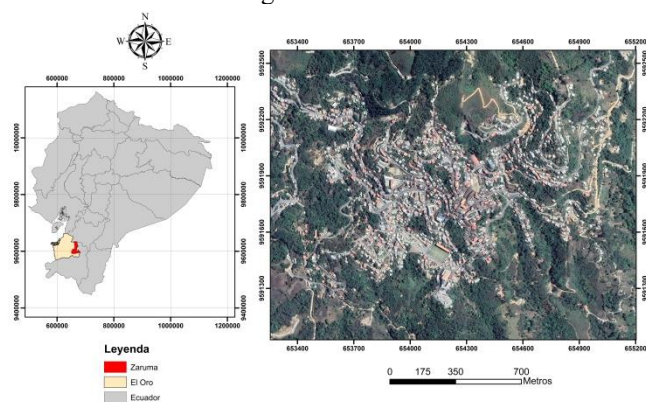


Fig.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Según CODIGEN [6]. y Carrión [7].el área minera en consideración se extiende desde Portovelo por el sur, con dirección norte (Zaruma), hasta el noroeste (Ayapamba). Es decir, su trend de mineralización abarca una extensión aproximada de 16 km de largo y una franja de 5 km de ancho, alcanzando hasta 1.5 km de profundidad. Estamos frente a una serie de vetas epitermales que tienen una dirección preferencial norte-sur, noreste, con inclinaciones que varían desde la vertical hasta 45-70° al este.

Geología Regional. – Los elementos estructurales más importantes de la región constituyen las fallas Piñas-Portovelo y Puente Buza-Palestina. La primera de las mencionadas divide a la zona en dos áreas geológicamente diferentes: al norte de la falla, rocas volcánicas e intrusivas Cretácicas-Terciarias y al sur, rocas metamórficas asignadas tentativamente al Paleozoico [6,8].

El sistema de vetas tiene su origen al norte de la falla Piñas-Portovelo y se ubican en la parte central del área andesítica.

De acuerdo a Barragán [8], el núcleo de la Cordillera Occidental está constituido por rocas metamórficas de edad paleozoica. Sobre ellas yacen adosadas grandes paquetes volcánicos de origen oceánico. Todo esto en conjunto, esta intruido por rocas ígneas. Algunas huellas profundas de eventos tectónicos regionales de alto significado metalogénico y sísmológico se manifiestan en direcciones NNE y NNO.

Algunas de las formaciones que allí se encuentran son del Complejo Metamórfico el Oro de edad paleozoica, sobre las que yacen adosadas capas de sedimentos metamorfizados, tales como pizarras y conglomerados con clivaje. Otras unidades presentes son la Fm. Celica que sobreyace discordante al Complejo Metamórfico el Oro, que comprende tobas andesíticas a dacíticas y andesitas, de edad Albiana, la Fm. Sacapalca que comprende lavas andesíticas, brechas tobáceas, conglomerados, lutitas lacustres y tobas dacíticas, y por último, el Grupo Saraguro, conformado por tobas soldadas de composición dacítica a riolítica, lavas andesíticas, material volcánico y rocas sedimentarias.

Geología Estructural. – Según Blanco [9] y Carrión [7].Regionalmente la zona está caracterizada por una tectónica disyuntiva, en la que predominan principalmente tres direcciones de fallamiento:

Fallas NO-SE. En varias de las labores mapeadas se observan fallas de este tipo, las mismas que tienen relación con la falla más importante de todo el Distrito, como es la Falla Piñas-Portovelo (NW-SE).

Fallas NE-SO y NE-SSO. Se presentan en algunas labores mineras, donde se pudo observar desplazamientos horizontales, pero con magnitud reducida, el desplazamiento es sinistral. Este sistema de fallas es probablemente conjugado con las fallas Piñas-Portovelo y Puente Buza-Palestina.

Estructuras N-S. Se observan principalmente dentro de todas las galerías estudiadas, que estarían dentro del área de vetas, donde han controlado el emplazamiento de la mineralización. Casi en su totalidad existe una componente de buzamiento hacia el este.

Geología Local. – Los trabajos de mapeo subterráneo de las treinta labores mineras a escala 1:5000 ponen en evidencia andesitas mayormente piroclásticas con stock de granodiorita, que se distinguen de la Formación Celica por su color (ausencia del verde), siendo su composición ligeramente más ácida, por su menor grado de tectonismo, y por estar generalmente más afectadas por la alteración hidrotermal (silicificación) [8,10].

Las secuencias volcánicas se disponen como tres fajas conocidas de oeste a este con los nombres de Serie Faique, Serie Portovelo o Andesita de Portovelo y Serie Muluncay. Las rocas volcánicas han sido intruidas por pequeños stocks de diorita-granodiorita, de cuarzo-monzonita y pórfidos andesíticos.

Para el contexto del presente estudio, se hace referencia a dos series que están aflorando:

Serie Portovelo. Es característica por su coloración rojiza, debido al intemperismo de diversos sills andesíticos, que

incluye una serie de rocas que varían en composición de básicas a ácidas, representada por flujos de colores oscuros.

Serie Muluncay. Está formada por rocas volcánicas compuestas por andesitas piroclásticas y flujos de lava, que se encuentran en la mayor parte de las labores mineras mapeadas; presentan rumbos de N 40-50°O (Minas Nos. 4, 13, 6, 27, etc.)

Características Hidrológicas. – De acuerdo con Carrión [7], generalmente las rocas encajantes de las vetas son lavas y no poseen, consecuentemente, porosidad ni permeabilidades primarias, por lo tanto, la circulación de las aguas se produce a través de las discontinuidades. En los sectores de roca deteriorada, la permeabilidad se incrementa.

En el sistema hidrogeológico del sector Zaruma y Portovelo, la zona saturada está condicionada a las discontinuidades que sirven de conductos en el seno del macizo rocoso y es un acuífero de tipo fisurado-libre-interior. Los niveles freáticos están, en términos generales a los 5 m de la superficie. Los socavones situados a cotas menores se convierten prácticamente en galerías de drenaje y desfogue, por lo que los niveles freáticos se vuelven también más bajos, ya que el agua fluye por estas galerías.

II. METODOLOGÍA

Se empleó una metodología integral de investigación que comprendió, tanto trabajos experimentales, como de gabinete. Esta metodología está formada por tres fases que se detallan a continuación:

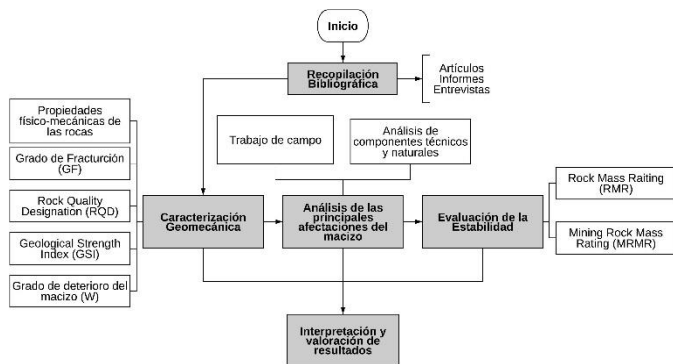


Fig.2 Metodología empleada en el estudio.

A. Sistematización de la información

Se analizan informes sobre distintos trabajos realizados en el sector de estudio por diferentes instituciones: Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), dirección de minería, entidades consultoras, Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y otras.) y se procesa toda la información existente sobre la temática de estudio, la geología de la zona y la cartografía digital e impresa. Además, se realizan entrevistas a expertos profesionales de la minería, trabajadores del sector, representantes de diferentes instituciones, prensa y pobladores de la ciudad.

B. Caracterización Geomecánica

Se obtuvo diferentes parámetros geotécnicos (RQD, Grado de fracturación, GSI, Grado de deterioro del macizo, estado de las discontinuidades, entre otros) de superficie y excavaciones subterráneas abandonadas y en activo, en donde existe amenaza de pérdida de estabilidad e incluso de afectaciones a la superficie (hundimientos y deslizamientos), causadas por la actividad minera.

El área de estudio se dividió en 7 sectores con diferentes estaciones o puntos subterráneos como se observa en la Fig.3.

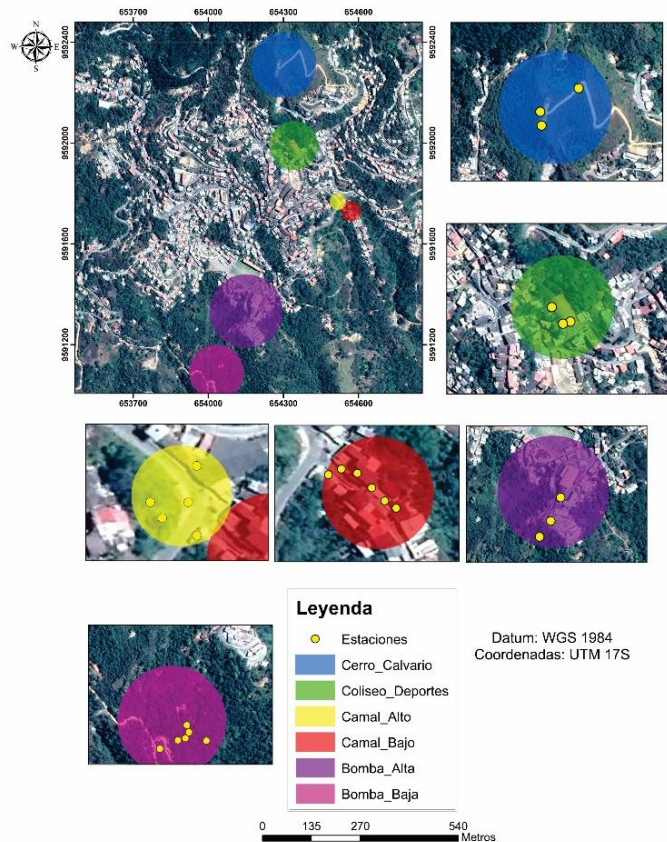


Fig.3 Ubicación de los diferentes sectores y 27 estaciones estudiadas.

Propiedades físico-mecánicas de las rocas. - Se eligieron sitios representativos para la toma de muestras, (fundamentalmente calicatas y algunas perforaciones). Con estas muestras de rocas se realizan diferentes ensayos en laboratorio: resistencia a compresión lineal por el método estándar (con relación altura diámetro entre 1.2 a 1.5), densidad de las rocas (con el método picnométrico). La cohesión y el ángulo de fricción interna son obtenidos de la construcción de los círculos Mohr y su envolvente, también se emplea eventualmente la fórmula dada por Hoek.

Grado de Fracturación (GF). - De acuerdo con Blanco, Santos & Carrión [11], el grado de fracturación (GF) del macizo se valora a partir del análisis del coeficiente de fracturamiento (K_f) (1) y la caracterización de las fracturas (K_{cf}). Dónde:

$$K_f = \frac{a}{A} \times 100\% \quad (1)$$

a: Área ocupada por fracturas

A: Área total

Para obtener K_{cf} , se emplea una tabla de clasificación propuesta por Bieniawski.

Rock Quality Designation (RQD). - El RQD, se determina a partir del estudio de testigos y utilizando el método propuesto por Priest y Hudson [12]., con la fórmula (2):

$$RQD = 100 \times e^{-0.1\lambda} \times (0.1\lambda + 1) \quad (2)$$

λ : Promedio de discontinuidades por metro.

De acuerdo a la valoración obtenida se obtiene una clasificación para la calidad de roca que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Calificación cuantitativa de RQD [13].

RQD (%)	Calidad de la Roca
25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Normal
75-90	Buena
90-100	Muy Buena

Geological Strength Index (GSI). - El GSI se determina por la expresión (3) :

$$GSI = RMR - 5, \quad (3)$$

Cuando el $RMR > 23$

De acuerdo con Hoek [14] y Hoek, Kaiser & Bawden [15] el GSI es un método de caracterización del macizo rocoso, que permite estimar su resistencia. Para el trabajo en campo es común el empleo del esquema dado por Hoek y Marino [16] que se muestra en la Fig.4.

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80				
		70			
VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60			
			50		
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
				30	
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
					10
LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			

Fig.4 Diagrama de índice geológico de resistencia [16].

Grado de deterioro del macizo rocoso (W). - Para valorar el grado de deterioro del macizo en los sectores estudiados se considera: la observación visual (cambio de coloración y grado de desmoronamiento de las rocas entre otros indicadores), y la determinación de algunos índices de fácil empleo, como fueron: el Índice de Arenosidad (Ia), a partir de la clasificación de Suarez [17] y el Índice de Estoicidad (Kt) dado por Blanco [9], entre otros.

El índice de arenosidad (Ia) se obtiene a partir de la facilidad con que la roca puede ser cortada con un cuchillo u otro instrumento cortante, para valorar este índice se emplea la clasificación dada por Suarez [17]. El índice de estoicidad se define por la relación entre la pérdida de resistencia a compresión lineal que sufre la roca al deteriorarse, con respecto a la resistencia de la roca en estado sano.

C. Análisis de las principales afectaciones del macizo

Para cumplimentar estos estudios del estado en que se encuentran las excavaciones y las manifestaciones de pérdida de estabilidad del macizo se realizan recorridos que posibilitan la obtención de la información necesaria para realizar un diagnóstico adecuado de la situación.

Para ello son analizadas algunas de las situaciones más representativas que provocan situaciones de peligro en el sector estudiado, como son:

- Formación de bóvedas (chimeneas) por encima de excavaciones o vacíos.
- La existencia de excavaciones y vacíos abandonados sin ninguna medida para su sostenimiento y conservación.
- Problemas con el diseño y eliminación de pilares.
- Afectaciones de terrenos y obras de superficie (asentamientos).
- Realización de trabajos de voladuras en zonas no aptas para ello.

D. Evaluación de estabilidad en excavaciones subterráneas

Para evaluar la estabilidad se utiliza la clasificación dada por Bieniawski [18] y el criterio de estabilidad dado por Laubscher [19].

De acuerdo con Laubscher [19], el Mining Rock Mass Rating (MRMR) emplea los parámetros de la clasificación RMR de Bieniawski [18], al cual se ajustan diferentes criterios como tensiones inducidas por actividad minera, deterioro de rocas, orientación de discontinuidades y acción de voladuras. El valor del MRMR se obtiene de la suma ponderada de distintos parámetros que se muestran en las ecuaciones (4) y (5) a continuación:

$$RMR(\text{valor in situ}) = v(\text{IRS}) + \left[v \left(\frac{FF}{m} \right) \text{ ó } v(\text{RQD} + J_s) \right] + v(\text{C. D.}) \quad (4)$$

$$MRMR = RMR * C_w * C_o * C_s * C_b \quad (5)$$

Donde:

IRS = Intact Rock Strength.

RQD = Rock Quality Designation.

FF/m= Frecuencia de Discontinuidades.

- Js= Espaciado entre discontinuidades.
- C.D.= Condición de las Discontinuidades.
- Cw= Ajuste por meteorización.
- Co= Ajuste por orientación de las discontinuidades.
- Cs= Ajuste por tensiones inducidas.
- Cb= Ajuste por efecto de voladuras

A partir de los valores obtenidos para MRMR se puede clasificar la calidad del macizo de acuerdo a la

Tabla 2 Calificación cualitativa del Macizo Rocoso según MRMR [19].

MRMR	Calidad del Macizo
0-20	Muy mala
20-40	Mala
40-60	Regular
60-80	Buena
80-100	Muy Buena

También para obtener criterios sobre la estabilidad de excavaciones subterráneas, se utiliza el concepto dado por Slesarev en la década de los 60 y reflejado por Laubscher en el siguiente gráfico (Fig.5).

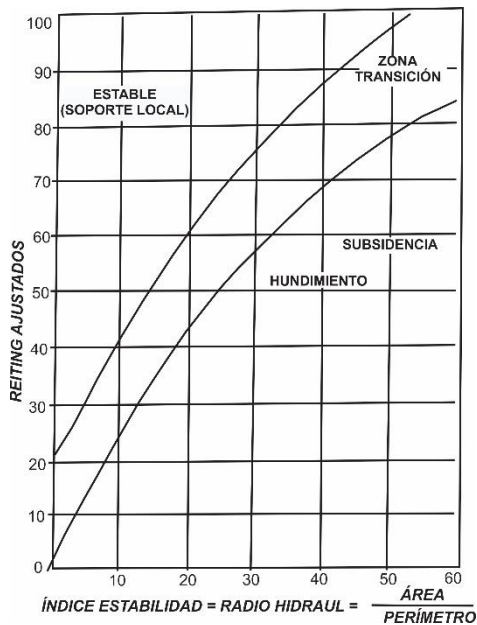


Fig.5 Gráfico usado por Laubscher para estimar la estabilidad [19].

III. RESULTADOS

Como resultados del estudio realizado se obtienen los siguientes:

- Caracterización geomecánica del macizo.
- Principales afectaciones del macizo.
- Evaluación de las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas.

B. Caracterización geomecánica del macizo

Los resultados obtenidos de los estudios experimentales realizados, tanto en condiciones subterráneas, como en superficie se muestran en las siguientes tablas:

Propiedades físico-mecánicas de las rocas, estado del macizo y afectaciones.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

Tipo de roca	Resistencia lineal a la compresión (MPa)	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción interna (Grados)
Andesita	20-46	0.18-0.46	19-37
Conglomerado Tobáceo	45-76	0.34-0.45	28-41
Andesita con inclusiones duras	30-65	0.24-0.40	23-39

Tabla 4. Estado del macizo rocoso por estaciones

Sector	Estación	Estado en que se encuentra el macizo
Camal Alto	1	Poco resistente muy agrietado y meteorizado.
	2	Medianamente meteorizado algo resistente y medianamente agrietado.
	3	Poco meteorizado y medianamente agrietado y resistente.
	4	Ligeramente meteorizado y medianamente agrietado. Resistente.
	5	Ligeramente agrietado y meteorizado. Resistente.
Camal Bajo	6	Muy meteorizado y agrietado. Poco resistente.
	7	Muy meteorizado medianamente agrietado. Poco resistente.
	8	Muy meteorizado, medianamente agrietado. Poco resistente.
	9	Medianamente meteorizado y agrietado, medianamente resistente.
	10	Medianamente agrietada y meteorizada. Resistente.
	11	Muy meteorizada, medianamente agrietada y poco resistente.
Bomba Baja	12	Medianamente meteorizada y agrietado. Medianamente resistente.
	13	Muy meteorizado. Medianamente meteorizado y algo resistente.
	14	Medianamente Meteorizado y agrietado. Medianamente resistente.
	15	Macizo algo agrietado y meteorizada. Resistencia Media.
	16	Macizo medianamente agrietado. Roca meteorizada. Resistente.
	17	Muy alterada. Medianamente agrietado. Medio Resistente.
	18	Ligeramente agrietado y meteorizado. Resistente.
Bomba Alta	19	Roca poco meteorizada. Medianamente agrietado y resistente.
	20	Algo meteorizado y agrietado. Resistente.
	21	Medianamente agrietada y meteorizada. Resistente.
Coliseo de Deportes	22	Muy deteriorada y agrietada. Poco resistente.
	23	Poco meteorizada y agrietamiento. Resistente.
	24	Medio agrietada y medio meteorizada. Resistente.
Calvario	25	Poco agrietada, medio meteorizada y medianamente resistente.

	26	Medio agrietada y meteorizada. Algo resistente.
	27	Muy meteorizada, medio deteriorada. Poco resistente.

Tabla 5. Afectaciones que presenta el macizo rocoso por estaciones

Sector	Estación	Afectaciones
Camal Alto	1	Roca Alterada, muchos desprendimientos. Mal estado.
	2	Existe desprendimiento. Hay sectores en mal estado.
	3	Algunos desprendimientos. Se ve roca en buen estado.
	4	Existen desprendimientos y sectores en mal estado.
	5	Desprendimientos en algunos sectores.
Camal Bajo	6	Desprendimientos. Macizo alterado. Mal estado.
	7	Desprendimientos. Macizo alterado. Mal estado.
	8	Mal estado. Roca muy deteriorada. Derrumbes.
	9	Sectores con desprendimientos y presencia de roca de baja calidad.
	10	Sector con caída de roca. En general macizo medianamente conservado.
	11	Desprendimientos en varios sectores y roca deteriorada.
Bomba Baja	12	Existen desprendimientos locales. En general mal estado.
	13	Rocas deterioradas, desprendimientos. Macizo mal estado.
	14	Se producen desprendimientos.
	15	Caída de pedazos de roca
	16	Desprendimientos en sectores. Macizo en mal estado.
	17	Macizo deteriorado, poco estable. En mal estado.
	18	Desprendimientos en algunos sectores. Macizo en aparente buen estado.
Bomba Alta	19	Caída de pedazos de roca
	20	Caída de pedazos de roca
	21	Desprendimientos aislados. Sectores con deterioro del macizo.
Coliseo de Deportes	22	Macizo muy deteriorado, desprendimientos. Mal estado.
	23	Macizo poco deteriorado. Algunos desprendimientos aislados.
	24	Roca bastante meteorizada. Desprendimientos en sectores.
Calvario	25	Caída de pedazos de roca y existencia de rocas deterioradas en distintos sectores del macizo.
	26	Desprendimientos y sectores del macizo deteriorados.
	27	Roca deteriorada. Desprendimientos. Macizo en mal estado.

Tabla 6. Resultados obtenidos para GF, GSI y W

Sector	Estación	Grado de Fracturamiento (GF)	Índice geológico de resistencia (GSI)	Grado de deterioro (W)
Camal Alto	1	IV	25	IV
	2	III	33	III
	3	III	40	II
	4	III	47	II-III
	5	II	54	II-III
Camal Bajo	6	IV	21	IV
	7	III	18	IV
	8	III	23	IV
	9	III	30	III
	10	III	38	III
	11	III	19	IV
Bomba Baja	12	III	42	III
	13	III	30	IV
	14	III	37	III
	15	II-III	42	II-III
	16	III	39	II-III
	17	III	32	IV
	18	II	57	II
Bomba Alta	19	III	40	II
	20	III	58	II
	21	III	28	III
Coliseo de deportes	22	IV	23	IV
	23	II	59	II
	24	III	25	III
Calvario	25	II	30	III
	26	III	27	III
	27	III	24	IV

A. Principales afectaciones del macizo

De los estudios realizados se obtiene lo siguiente:

Formación de embudos (bóvedas) por encima de las excavaciones. - En diferentes sectores estudiados, aparecen grandes embudos (o bóvedas) por el techo de las excavaciones, los que son provocados por: la influencia de antiguas labores mineras, la inestabilidad existente en el sector por la influencia de trabajos de arranque, el mal diseño y/o construcción de la excavación entre otras causas.

Aunque a primera vista en general el macizo aparenta ser estable, esto se puede considerar como una situación temporal de equilibrio inestable, ya que con el transcurso del tiempo y debido al deterioro del macizo, cinética de bloques y la influencia de otros trabajos y cercanía a la superficie entre otros factores; se pueden manifestar y desarrollar otros fenómenos de pérdida de estabilidad, como por ejemplo: La formación de una segunda bóveda o embudo por sobre la primera (Fig.6) o producir movimiento de bloque que tiendan a descender hacia la excavación (Fig.7).

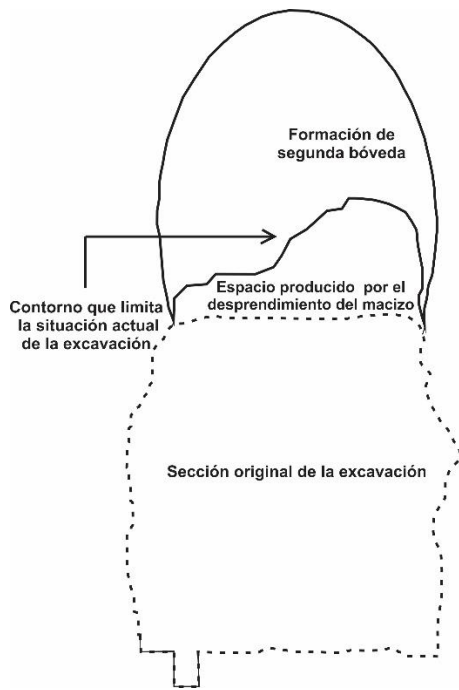


Fig.6 Fenómenos de pérdida de estabilidad por la formación de una segunda bóveda.

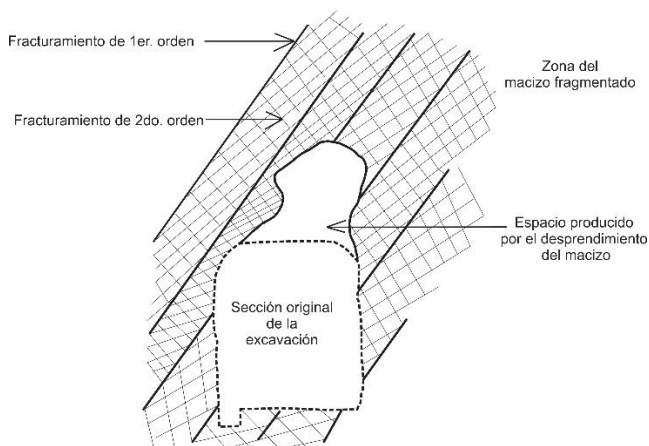


Fig.7 Fenómeno de pérdida de estabilidad por el descenso de bloques.

Existencia de situaciones de peligrosidad en sectores "abandonados". - Existen diferentes sectores que están abandonados, cuya existencia provoca una gran inestabilidad. Muchos de estos sectores debido a su total abandono son zonas de alta peligrosidad, las que en dependencia de su ubicación y área que ocupan pueden afectar significativamente a otros sectores vecinos del macizo e incluso crear una zona de afectación mucho mayor, que puede provocar afectaciones a la superficie. (Fig.8).



Fig.8 Sector explotado y abandonado.

Es por ello, que se recomienda el empleo de medidas de estabilización para garantizar que no influyan sobre el resto del macizo. Como procedimiento para realizar el plan de estabilización de estos sectores se recomienda lo siguiente:

- Primer paso: Ubicación del sector objeto de estudio, definición de su estado actual, evaluación del grado y tipo de afectación que se manifiesta en excavaciones vecinas y en la superficie.

- Segundo paso: Caracterización geólogo-geomecánica del macizo rocoso, en el sector que abarca el estudio: Propiedades mecánicas del macizo, su comportamiento mecánico estructural, grado de deterioro que presenta, presencia de agua, estabilidad y el establecimiento del modelo de comportamiento.

- Tercer paso: Implementación de las medidas técnicas que se consideren necesarias.

Problemas de diseño y eliminación de pilares. - En el sector de estudio existen muchas situaciones de peligro provocadas por el no diseño, mal diseño o incumplimiento de lo proyectado, que en ocasiones fueron diseñados con dimensiones por debajo de las necesarias (Fig.9). Esto provoca que a causa de una acción externa o simplemente con el transcurso del tiempo estos pilares se destruyan y provoquen movimientos en el macizo, los que en muchos casos llegan a manifestarse en la superficie.



Fig.9 Pilar mal diseñado que soporta una elevada carga vertical.

Otras situaciones son cuando, sin la existencia de un plan técnicamente fundamentado y la toma de las medidas pertinentes, se han eliminado pilares en forma anárquica, lo que provoca la caída del techo del espacio subterráneo o excavación y la correspondiente afectación en la superficie (asentamientos y hundimientos) como se han producido en el sitio de estudio.

Afectaciones al terreno y obras de superficie (asentamientos y hundimientos). - Este fenómeno es muy común, tanto en el sector de estudio, como en otros sectores del país donde se desarrolla la pequeña minería. Esto ha sido provocado por la falta de estudios del macizo y la realización de trabajos mineros sin las fundamentaciones técnicas y de seguridad necesarias y en muchos casos irresponsabilidades de los mineros.

En dependencia de un grupo de factores: Profundidad del vacío o excavación, sus dimensiones, características mecánicas estructurales del macizo, condiciones de yacencia, presencia de agua y otros. En este fenómeno pueden manifestarse esfuerzos de asentamientos de diferentes magnitudes, del terreno de superficie, hasta su hundimiento.

Por lo general este proceso de desplazamiento del macizo por encima del vacío o excavación-asentamientos en el terreno de superficie puede durar en tiempo prolongado y en ocasiones se hace difícil predecir cuándo se puede manifestar.

F. Evaluación de la estabilidad

Tabla 7. Resultados obtenidos para RMR, MRMR y RH

Sector	Estación	RMR	MRMR	RH
Camal Alto	1	29	32	6
	2	37	41	7
	3	49	52	8
	4	51	54	8
	5	58	60	9
Camal Bajo	6	25	30	6
	7	22	26	<6
	8	24	27	<6
	9	34	42	7
	10	42	45	7

	11	23	28	<6
Bomba Baja	12	46	51	8
	13	34	40	7
	14	41	47	7
	15	46	49	7
	16	43	41	7
	17	36	40	7
	18	61	63	9
Bomba Alta	19	44	49	7
	20	62	64	9
	21	32	35	6
Coliseo de deportes	22	27	31	<6
	23	63	61	9
	24	29	33	6
Calvario	25	34	37	6
	26	31	32	6
	27	28	31	6

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La acción del agua provoca diferentes afectaciones, tanto en la superficie, como en las galerías subterráneas: desestabilización de taludes y laderas, afectación de diferentes obras de superficie, contribución al deterioro del macizo rocoso y afectación al estado de estabilidad de los espacios denudados. El agua, al fluir a través de las discontinuidades o fracturas, provoca la disolución y arrastre del material de relleno, cuya consecuencia es la degradación de la calidad del macizo rocoso. Por otro lado el agua puede ser absorbida por la porosidad secundaria de la roca constituyendo un elemento adicional en el proceso de deterioro.

En muchos sectores de la zona de estudios se observa una alta densidad de excavaciones subterráneas, las que, en ocasiones, no están a las distancias de seguridad mínimas requeridas unas de otras, o que por el uso de explosivos sin conocimiento provocan altos niveles de vibraciones que en muchas ocasiones superan los límites permitidos para macizos rocosos con calidad mala, produciendo un aumento en la probabilidad de su pérdida de estabilidad.

Del análisis de los resultados obtenidos del RMR, MRMR y del RH (Radio Hidráulico) se observa que en la mayoría de los casos el macizo es potencialmente inestable, y que se relaciona en algunos casos con la baja resistencia y grado de deterioro del macizo y en otros además con su grado de fracturación, y concuerda con la clasificación normal-mala del MRMR obtenida por Sánchez & Sánchez [20] y con el análisis de subsidencia por la actividad minera de Campoverde [21]. Los pocos sitios que presentan estabilidad, se debe a su pequeña sección transversal, la misma que limita el mecanismo de pérdida de estabilidad.

En base a los datos y observaciones realizadas en campo de los diferentes tipos de afectaciones, estos se muestran en la Tabla 8 con sus respectivas causas y consecuencias. Estas afectaciones dependen directamente de la minería no técnica que ocurre en el sector.

Tabla 8. Causa-Consecuencia de los diferentes tipos de afectaciones.

Tipo de afectación	Causas que la producen	Consecuencias
Formación de embudos (bóvedas) por encima de las excavaciones.	Por influencia de otras labores mineras, la inestabilidad existente en el sector debido al mal estado del macizo y al mal diseño y/o construcción de la excavación.	Ampliación significativa del área de la sección de la excavación, lo que provoca una mayor inestabilidad y aumenta la posibilidad de movimientos de bloque.
Existencia de situaciones de peligrosidad en sectores "abandonados"	Abandono de excavaciones sin su cierre técnico o sellado	Posibles derrumbes en la excavación con la posibilidad de su propagación a sectores vecinos y al macizo situado por encima de ellas, lo que podría, con el transcurso del tiempo, provocar afectaciones a la superficie.
Problemas de diseño y eliminación de Pilares	* Mal diseño del pilar * Depredación parcial del pilar * Eliminación de pilares sin plan técnico.	Al aumentar la carga sobre el espacio subterráneo y disminuir la acción del sostenimiento se pueden producir derrumbes parciales o totales en la excavación.
Afectaciones al terreno y obras de superficie (asentamientos y hundimientos)	* Ubicación de excavaciones a poca profundidad (no acorde a las características mecánico-estructurales del macizo) sin la aplicación de las medidas adecuadas. * Pueden suceder cuando se aumenta la densidad de excavaciones en un sector.	Hundimientos de terrenos de superficie con la destrucción parcial o total de las obras ubicadas dentro de la zona de afectación.

V. CONCLUSIONES

En base a la situación existente en las excavaciones subterráneas, debido a la pérdida gradual de calidad del macizo y estabilidad de las excavaciones con el transcurso del tiempo y en muchos casos sin fortificar, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

El macizo se encuentra muy fracturado y deteriorado (por efecto de la meteorización y la atmósfera subterránea, por el hecho de estar casi todas las excavaciones sin revestimiento). Esto es un proceso que está en desarrollo y como es lógico existe tendencia a la disminución de las características de resistencias del macizo y de su capacidad portadora.

La mayoría de los sectores estudiados presentan un RMR en el rango 22-58 y MRMR entre 26-54, clasificándolos de manera general como macizos rocosos de calidad media-mala que representan condiciones de inestabilidad potenciales, requiriendo medidas de estabilización urgentes.

Digital Object Identifier: (to be inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

Dentro del análisis de las principales afectaciones que ocurren en el sector de estudio se identificaron cuatro relacionados directamente con las excavaciones subterráneas y el diseño y eliminación de pilares que como se mostró en la Tabla 8, provocan como consecuencias derrumbes parciales o totales en las excavaciones y subsidencias del terreno en superficie.

REFERENCIAS

- [1] Lane, K. (2004). Unlucky strike: gold and labour in Zaruma, Ecuador. *Colonial Latin American*, 65-84.
- [2] Velásquez, P., Veiga, M., & Hall, K. (2009). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *ELSEVIER*, 226-232.
- [3] Astudillo, C. (2007). El sudor del sol: Historia de la minería oreña. Ediciones la Tierra.
- [4] Sandoval, F. (2001). Small scale mining in Ecuador, Report to MMSD. *Environmental and Sustainable Development*, 28-75.
- [5] Blanco, R., Carrión, P., & Watson, R. (2006). Pequeña Minería Subterránea: Problemas Actuales Relacionados con los Riesgos Geodinámicos y Criterios para su Minimización o Solución. Guayaquil: Imprenta Mistral.
- [6] CODIGEN. (1995). Riesgos Geológicos-Geotécnicos de la ciudad de Zaruma por efecto de labores mineras en el casco urbano. Quito.
- [7] Carrión, P. (2003). Diagnóstico de la situación geomecánica y de la contaminación de Zaruma y Portovelo.
- [8] Barragán, J., Veloz, E., Cando, M., & Muñoz, L. (2001). *Evaluación del impacto de la actividad minera en la zona urbana de Zaruma*. Quito: Dirección Nacional de Geología.
- [9] Blanco, R. (2000). *Informe Preliminar de Diagnóstico sobre la situación Geomecánica y de Contaminación de Zaruma y Portovelo*. Guayaquil: Red CYTED XII-D Aplicada a la Minería Sostenible y Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [10] Carvajal, A., Watson, R., Carrión, P., Chávez, M., Blanco, R., González, A., . . . Pillajo, E. (2004). *Zonificación Preliminar del área del Casco Urbano de Zaruma, según el grado de Riesgo Geodinámico*. Guayaquil: CYTED.
- [11] Blanco, R., Santos, E., & Carrión, P. (2018). *Propiedades de las rocas y del macizo rocoso*. Guayaquil: Grupo Compás.
- [12] Priest, S. D., & Hudson, S. D. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.*, 135-148.
- [13] Deere, D., & Deere, D. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. (L. Kirkaldie, Ed.) *Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984*, 91-101.
- [14] Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *News Journal*, 4-16.
- [15] Hoek, E., Kaiser, P., & Bawden, W. (1995). Support of underground excavation in hard rock. *Rotterdam: Balkema*.
- [16] Hoek, E., & Marino, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in a weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and tunnelling international*, 45-51.
- [17] Suarez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. *Bucaramanga: Publicaciones UIS*.
- [18] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- [19] Laubscher, D. (1975). Class distinction in rock masses. *Coal gold base min S Afr*.
- [20] Sánchez, C., & Sánchez, A. (2018). *"EVALUACIÓN DE AMENAZAS GEODINÁMICAS EN EL ENTORNO DE LA ACTIVIDAD MINERA EN LA CONCESIÓN MINERA PALACIOS"*. Guayaquil.
- [21] Campoverde, C. (2017). *"ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA POR LA ACTIVIDAD MINERA EN EL CASCO URBANO DE ZARUMA. CASO DE ESTUDIO ESCUELA LA INMACULADA"*. Guayaquil.