

Geotechnical and structural characterization of the Ignimbritas of the Saraguro group in the sector of Santa Isabel-Pucará, Ecuador

Milton Flor-Jiménez¹, Harry Avilés-Morani¹, Michelle Villalta-Echeverría¹, Israel Murillo-Lozano¹, Kenny Escobar-Segovia¹, Maurizio Mulas^{1,2},

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra FICT, Campus Gustavo Galindo km 30.5 vía Perimetral, P.O. Box 09-05-5683, Guayaquil, Ecuador; mflor@espol.edu.ec,

hsaviles@espol.edu.ec, micdevil@espol.edu.ec, isbomuri@espol.edu.ec, kescobar@espol.edu.ec, mmulas@espol.edu.ec

²Instituto Panamericano de Geografía e Historia - Sección Nacional del Ecuador

Abstract -- The present study details the geotechnical and structural characterization of the Ignimbrites of the Saraguro Group on the Pasaje - Santa Isabel road. The investigation allowed the structural and geotechnical characterization of these ignimbritic products. In this research, RMR and SMR methods are used to quantify, determine the quality of rock masses and suggest mechanisms to improve their stability. The rock mass appears of "poor quality" according to the RMR methodology, and partially stable according to the SMR. Some stability solutions are presented according to the conditions of the massif.

Keywords– Ignimbritas, Stratigraphy, RMR, SMR, Geotecnia

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.233>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Caracterización geotécnica y estructural de las Ignimbritas del grupo Saraguro en el sector de Santa Isabel-Pucará, Ecuador

Milton Flor-Jiménez¹, Harry Avilés-Moran¹, Michelle Villalta-Echeverría¹, Israel Murillo-Lozano¹, Kenny Escobar-Segovia¹, Maurizio Mulas^{1,2},

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra FICT, Campus Gustavo Galindo km 30.5 vía Perimetral, P.O. Box 09-05-5683, Guayaquil, Ecuador; mflor@espol.edu.ec,

hsaviles@espol.edu.ec, micdevil@espol.edu.ec, isbomuri@espol.edu.ec, kescobar@espol.edu.ec, mmulas@espol.edu.ec

²Instituto Panamericano de Geografía e Historia - Sección Nacional del Ecuador

Resumen.- El presente estudio detalla la caracterización geotécnica y estructural de las Ignimbritas del Grupo Saraguro en la vía Pasaje – Santa Isabel. La investigación permitió caracterizar estructural y geotécnicamente estos productos ignimbríticos. En esta investigación se utilizan los métodos RMR y SMR para cuantificar, determinar la calidad de los macizos rocosos y sugerir mecanismos para mejorar su estabilidad. El macizo rocoso se presenta de "mala calidad" en acuerdo a la metodología RMR, y parcialmente estable de acuerdo al SMR. Algunas soluciones de estabilidad son presentadas en acuerdo a las condiciones del macizo.

Palabras claves.- Ignimbritas, Estratigrafía, RMR, SMR, Geotecnia.

I. INTRODUCCIÓN

Las ignimbritas son depósitos generados por corrientes piroclásticas de densidad [1], y son caracterizadas por su importante cobertura areal y se encuentran estrechamente relacionados con eventos volcánicos muy intensos que a su vez pueden generar una caldera [2]. En naturaleza las ignimbritas pueden presentarse soldadas y no soldadas [1]. En vulcanología, la soldadura se expresa por las dramáticas variaciones en la textura, estructura y propiedades físicas de los depósitos fragmentales [3], [4], [5]. El área de estudio está ubicada en el sur ecuatoriano (Fig. 1), en los límites fronterizos entre las provincias de Azuay, El Oro y Loja. En el sector de Pasaje-Santa Isabel se encuentran secuencias ignimbríticas con espesores variables [6], desde 1 metro hasta 600 metros, que comprende un área de 436 kilómetros cuadrados. La finalidad de este trabajo es aplicar a rocas ignimbríticas modalidad de caracterización del macizo rocoso que se aplica a diferentes tipología de roca para implementar los estudio de estabilidad a lo lado de las carreteras.

II. MARCO GEOLÓGICO

La Cordillera de Los Andes ecuatorianos presenta diferencias morfotectónicas generadas por los esfuerzos de la actividad geodinámica entre la placa de Nazca y una corteza oceánica acretada a la parte continental del Ecuador (Placa Sudamericana).

Como resultado de la convergencia de estas placas, existen deformaciones geomorfológicas creadas por la dinámica de un gran número de fallas inversas [7]. Estas fallas están presentes en el cratón Sudamericano y en la parte sedimentaria del oriente ecuatoriano.

El sector Pasaje – Santa Isabel se encuentra conformada por depósitos volcano-sedimentarios que conforman la Cuenca Girón – Santa Isabel. Esta es el resultado de una actividad volcánica desarrollada desde el Eoceno Tardío hasta el Mioceno Temprano [6]. Los depósitos ignimbríticos pertenecen al Grupo Saraguro (20-29 Ma) y al Grupo Santa Isabel (18–9 Ma) [8]. La bibliografía actual presenta información vulcanológica poco detallada sobre los rasgos de los depósitos de estos grupos y tampoco sobre la ubicación del centro eruptivo. Los depósitos muestran litofacies proximales hasta distales, siendo la evidencia de procesos eruptivos que los generaron en diferentes periodos de tiempo [9]. Las variaciones en las litofacies de los depósitos piroclásticos presentes en la zona de estudio permiten establecer la ubicación de la posible fuente eruptiva.

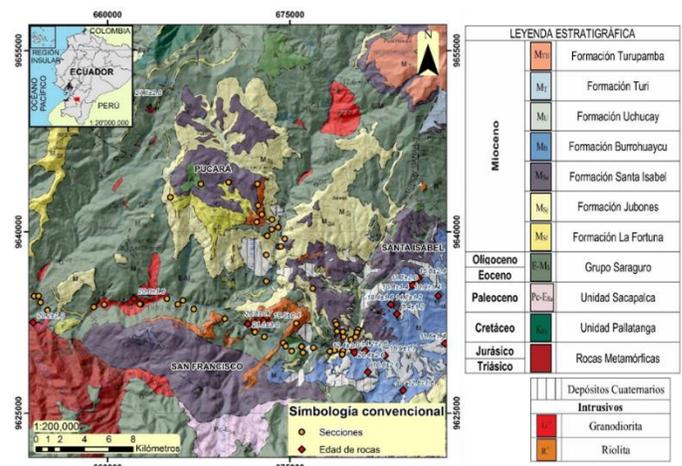


Fig. 1. Ubicación de las secciones estratigráficas estudiadas. La base es el mapa geológico de Pratt y otros, 1997. Las dataciones son obtenidas por Hungerbühler D., 1997.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.233>

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

III. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

La caracterización del macizo rocoso corresponde a un trabajo de análisis de diferentes parámetros, de acuerdo con métodos, los cuales pretenden cuantificar la calidad del macizo rocoso [10].

La cuantificación de cada uno de los parámetros se debe efectuar de manera detallada, mediante observaciones y mediciones registradas en campo, al igual que ensayos en laboratorio [10].

Una estación geomecánica corresponde a un conjunto de características particulares y diferentes en un macizo rocoso, basado en la orientación de las discontinuidades, litología, etc. [11], e influye en el diseño posterior de estabilización.

Una estación geomecánica generalmente abarca una longitud entre 5 – 10 m del macizo rocoso. Es descrita en campo mediante el uso de estadillos normalizados [11].

Los datos que se deben tomar en campo para una adecuada caracterización de un macizo rocoso son los siguientes:

- Orientación de las discontinuidades, al igual que de las excavaciones.
- Profundidad, si es posible, valoración preliminar de los estados tensionales en el entorno.
- Litología.
- Perfil de rugosidad de las discontinuidades.
- Longitud y separación de las juntas.
- Resistencia a compresión de la matriz rocosa, al igual que de las superficies en las discontinuidades.
- Estados de las superficies y el relleno de las discontinuidades.
- Presencia de agua y estimación de los caudales.

La matriz rocosa se define como un material homogéneo y continuo (exento de discontinuidades), isotópico y lineal. Los aspectos que deben ser establecidos en campo (Tabla I) son:

- Caracterización geológica: composición mineralógica, forma y granulometría de los minerales, color y dureza.
- Meteorización. Estimado visualmente en campo y definido mediante el ISRM como:

TABLA I
Grado de meteorización de la matriz rocosa. (ISRM, 1978)

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>	<i>Grado</i>
Fresco	No se aprecian signos visibles de Meteorización	I
Ligeramente meteorizado	La decoloración indica meteorización	II
Moderadamente Meteorizado	Menos de la mitad del material está desintegrado en suelo	III
Muy meteorizado	Más de la mitad del material rocoso está desintegrado en suelo	IV
Completamente Meteorizado	Todo el material rocoso está desintegrado en suelo	V
Suelo residual	Toda la roca se ha convertido en suelo	VI

A partir del grado IV, el material es considerado por su comportamiento geotécnico como suelo. Además, que estos términos son generales y pueden ser modificados para situaciones específicas [11].

La resistencia a compresión simple, se establece en campo mediante el uso del martillo geológico o con el martillo Schmidt (Tabla II).

TABLA II
Estimación de la Resistencia a Compresión Simple con el martillo geológico. (ISRM, 1978)

<i>Grado</i>	<i>Descripción</i>	<i>Identifica</i>	<i>Valor (MPa)</i>
R1	Roca muy débil	Deleznable con el pico del martillo	1 – 5
R2	Roca débil	Se desconcha con dificultad con navaja	5 – 25
R3	Roca media	No se raya ni se desconcha con la navaja	25 – 50
R4	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo geológico para romper la muestra	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura	Solo rompen esquirlas de la muestra con el martillo geológico	> 250

El comportamiento mecánico del macizo rocoso se encuentra condicionado por la presencia de las discontinuidades. Las mismas que pueden estadísticamente ser agrupadas, basándose en sus medidas estructurales. El grupo de discontinuidades se denominan familias o sets [11].

Sin embargo, existen discontinuidades cuyo comportamiento es singular o particular, estadísticamente hablando carecen en similitud con respecto al resto [11]. Generalmente corresponden a fallas geológicas locales.

La caracterización de las discontinuidades (Fig. 2) se efectúa en campo, las propiedades a detallar son:

- Tipo de discontinuidad.
- Orientación.
- Espaciado y frecuencia.
- Abertura.
- Continuidad o persistencia.
- Rugosidad.
- Relleno.
- Filtraciones o estado de flujo.
- Meteorización.

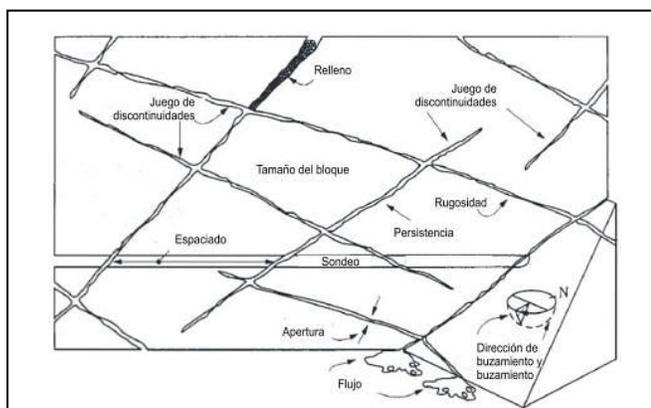


Fig. 2 Propiedades de las discontinuidades.
Hudson J., 1989 modificada.

TABLA III

Principales tipos de discontinuidades [11].

<i>Discontinuidad</i>	<i>Singular</i>	<i>Sistemática</i>
Planares	Fallas	Planos de estratificación Diaclasas o juntas Microfallas
	Diques	Planos de esquistosidad Juntas estiolíticas
	Kink Bands y planos axiales	Intersección de discontinuidades Planares
Lineales	Eje de pliegues	Lineaciones

En esta investigación para cuantificar la estabilidad del macizo rocoso se emplearon los siguientes métodos:

Rasgos, clasificaciones y principales técnicas de caracterización

Terzaghi (1946) propuso la primera metodología para caracterizar un macizo rocoso, empleado para la elaboración de túneles. Deere y otros (1967) desarrolló la Designación de la Calidad de la Roca (RQD), a partir de testigos de perforación. [10]. El RQD es uno de los índices más importantes para la estimación de la calidad de una masa rocosa y se define como el porcentaje de fragmentos mayores a 10 cm, sobre la longitud total del testigo extraído [11].

$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{Longitud de fragmentos} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total de la perforación}} \times 100$$

Palmstrom (1982), establece el cálculo del RQD para los casos en los cuales se carece de testigos. Esta estimación se basa en el análisis del número de discontinuidades por unidad de volumen [10].

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

TABLA IV

Calidad del macizo rocoso en función de la estimación del Rock Quality Designation (RQD)

<i>RQD (%)</i>	<i>CALIDAD</i>
< 25	Muy Mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy Buena

El término J_v , se refiere al índice volumétrico de discontinuidades y puede ser estimado mediante la sumatoria de los inversos de los espaciados medidos de cada una de las familias de discontinuidades (Jordá-Bordehore y otros, 2016)

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots$$

Bieniawski (1976), establece el índice RMR ("Rock Mass Rating") para determinar la calidad del macizo rocoso. Esta metodología será explicada con mayor detalle más adelante. (Cabrera, 2010).

Hoek y otros (1998), propuso el índice geológico de resistencia (GSI), cuantificando la calidad del macizo en base al grado de fracturación, estructuras geológicas, dimensiones de los fragmentos y la alteración de las diferentes juntas [10].

IV. METODOLOGÍA

En este trabajo, el análisis de los macizos rocosos se efectuó mediante estaciones geomecánicas, ubicadas en la vía Pasaje – Santa Isabel.

A partir de la información levantada en cada una de las estaciones geomecánicas, en la fase de gabinete se determinan los índices geomecánicos a emplear (RMR, SMR, Q, entre otros). Además de ensayos de carga uniaxial efectuada sobre cilindros de 5.5 cm de radio y 11 cm de altura.

Rock Mass Rating (RMR)

Corresponde a un método mediante el cual se logra determinar la calidad de un macizo rocoso. Establecido por Bieniawski (1976), relaciona varios parámetros de diseño y de sostenimiento [11].

La valoración de cada uno de los parámetros permite cuantificar al macizo. Bieniawski (1989) define los parámetros a cuantificar en campo y establece la ecuación para determinar la calidad del macizo rocoso [11].

$$RMR_{BÁSICO} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

$$RMR_{CORREGIDO} = RMR_{BÁSICO} + F_6$$

F₁: Resistencia de la roca.

F₂: Rock Quality Designation (RQD).

F₃: Separación entre las discontinuidades.

F₄: Estado de las juntas.

F₅: Presencia de agua en las discontinuidades.

F₆: Disposición de las discontinuidades con respecto al mecanismo de excavación

1	Resistencia de la roca sana (MPa)	Carga puntual	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Preferible ver compresión uniaxial		
		Compresión simple	> 250	100 – 250	50 – 75	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
Valoración (F1)		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%) Rock Quality Designation	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 0.06			
		Valoración (F2)	20	17	13	8	3		
3	Separación entre diaclasas (m)	> 2.00	0.60 – 2.00	0.20 – 0.60	0.06 – 0.20	< 0.06			
		Valoración (F3)	20	15	10	8	5		
4	Estado de las juntas	Muy rugosas, discontinuidades sin espacios, bordes sanos	Ligeramente rugosas, aberturas de más de 1mm, bordes duros	Ligeramente rugosas aberturas de más de 1mm, bordes blandos	Espejos de falla o relleno < 5 mm o separación entre 1-5 mm	Relleno blando superior a 5mm o abertura > 5mm			
		Valoración (F4)	30	25	20	10	0		
5	Presencia de agua en las discontinuidades	Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo			
		Valoración (F5)	15	10	7	4	0		

Fig. 3 Parámetros básicos para el cálculo del RMR [13].

Para determinar las condiciones de las discontinuidades (F₄) se analizan los siguientes parámetros:

PARAMETRO	VALORACIÓN				
	< 1 mm	1 - 3 mm	3 - 10 mm	10 - 20 mm	> 20 mm
Longitud	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
Separación (Apertura)	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Estriada
	6	5	3	1	0
Rugosidad	Ninguno	Relleno duro		Relleno blando	
	6	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Relleno	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

Fig. 4 Clasificación de acuerdo a las condiciones de las discontinuidades [13].

Los parámetros anteriores permiten la obtención del RMR básico. Para obtener el RMR corregido se debe tener en cuenta la orientación de las discontinuidades y su relación con la excavación. [11].

DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE DE EXCAVACIÓN				DIRECCIÓN PARALELA AL EJE		Buz. 0° - 20° en cualquier dirección
Excavación a favor buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

Fig. 5 Relación entre la dirección de las discontinuidades y la excavación [13].

La cuantificación de la relación entre las direcciones de las discontinuidades y la excavación se la realiza empleando la siguiente figura:

DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO	Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12
Cimentaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25
Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Fig. 6 Corrección por la dirección de las discontinuidades [13].

Posterior a la cuantificación de cada uno de los parámetros, este método establece las siguientes calidades para el macizo rocoso:

CLASIFICACIÓN	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Valoración	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Fig. 7 Calidad de la roca en base al RMR corregido [13]

Slope Mass Rating (SMR)

Método desarrollado por Romana (1993) para determinar el nivel de estabilización de taludes elaborados sobre macizos rocosos [11]. La cuantificación de este método se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$SMR = RMR_{BÁSICO} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

Donde:

F_1 . Está relacionado con el paralelismo de las discontinuidades y el buzamiento del talud.

$$F_1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{100} \tan^{-1} \left(\frac{1}{10} |A| - 17 \right) [14].$$

F_2 . Corresponde al buzamiento de la junta.

$$F_2 = \frac{9}{16} + \frac{1}{195} \tan^{-1} \left(\frac{17}{100} B - 5 \right) [14].$$

F_3 . Relación entre los buzamientos de las discontinuidades y el talud.

$$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \tan^{-1} C \quad (1) [14].$$

$$F_3 = -13 - \frac{1}{7} \tan^{-1}(C \cdot 120) \quad (2) [14].$$

La ecuación 1 se aplica cuando la rotura de efectuó de forma planar o en cuña, mientras que la 2 cuando corresponda a una rotura por vuelco.

F_4 . Factor de ajuste, depende del método de excavación del talud.

TIPO DE ROTURA			MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	A	$ a_j - a_s $	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
T		$\frac{ a_j - a_s }{-180}$					
W		$ a_i - a_s $					
P/T/W	F_1		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	B	$ \beta_j $	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
W		$ \beta_i $					
P/W	F_2		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T			1.00				
P	C	$ \beta_j - \beta_s $	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< (-10°)
W		$ \beta_i - \beta_s $					
T		$ \beta_j + \beta_s $	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
P/W/T	F_3		0	-6	-25	-50	-60

Fig. 8 Parámetros F_1 , F_2 Y F_3 del SMR ("Slope Mass Rating") [11].

El factor F_4 , relacionado con el método de excavación del talud se lo cuantifica con la siguiente tabla:

TABLA V
Corrección del F4 del SMR ("Slope Mass Rating") [11].

Método de excavación	F4
Talud natural	+15
Precorte	+10
Voladura suave	+8
Voladura normal o excavación mecánica	0
Voladura deficiente	-8

Una vez cuantificado cada uno de los parámetros establecidos en el SMR [12]. Se definen las siguientes calidades de taludes

N° Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Completamente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Completamente estable
Roturas	Grandes plano o circular	Planar o grandes cuñas	Planar a lo largo de algunas juntas	Algunas roturas en bloque	Sin roturas
Probabilidad de rotura	0.9	0.6	0.4	0.2	0

Fig. 9 Clasificación de taludes SMR ("Slope Mass Rating") [11].

IV. DATOS

Los datos de dirección de buzamiento y buzamiento para cada una de las discontinuidades que pertenecen a la primera estación geomecánica, ubicada en coordenadas UTM - WGS84 (662655, 9634018), son las siguientes:

TABLA VI
Medidas estructurales de la estación geomecánica 1

J_1 Dip direction/Dip	J_2 Dip direction/Dip
219°/84°	314°/84°
230°/85°	321°/81°
224°/80°	319°/79°
220°/66°	320°/80°
210°/64°	318°/84°
215°/82°	312°/79°
230°/58°	314°/75°
231°/51°	316°/82°
206°/58°	317°/83°
220°/46°	311°/85°

Los valores de compresión simple medidos en campo, utilizando el esclerómetro o martillo de Smith, son los siguientes:

TABLA VII
Datos de compresión simple medidos en campo estación 1

Compresión simple (MPa)		
59	24	33
57	44	32
27	43	17
12	21	10
22	47	35
25	42	43
43	40	15
31	53	29
46	29	26

Las medidas de dirección de buzamiento y buzamiento para cada una de las discontinuidades que pertenecen a la segunda estación geomecánica, ubicada en las coordenadas UTM - WGS84 (676939, 9630404), son los siguientes:

TABLA VIII
Medidas estructurales de la estación geomecánica 2

Dip direction/Dip			
J1	J2	J3	J4
0°/65°	200°/52°	286°/76°	50°/70°
345°/64°	215°/44°	266°/86°	48°/79°
0°/66°	188°/33°	215°/30°	48°/66°
354°/61°	215°/43°	206°/31°	66°/82°
336°/65°	187°/68°	215°/19°	57°/74°
343°/67°	189°/57°	198°/38°	65°/80°
345°/78°	200°/55°	209°/45°	63°/76°
345°/71°	200°/37°	208°/20°	66°/76°
348°/70°	195°/25°	210°/25°	62°/82°
10°/55°	198°/26°	206°/32°	67°/78°

Los valores de compresión simple medidos en campo, utilizando el esclerómetro o martillo de Smith, son los siguientes:

TABLA IX
Datos de compresión simple medidos en campo estación 2

Compresión simple (MPa)		
26	12	12
34	18	14
28	34	35
35	31	13
19	41	31
27	26	43
27	13	38
15	10	20
22	35	37

Además, en el laboratorio se efectuó el ensayo de compresión simple de 5 muestras tomadas en campo, con la finalidad de realizar la comparación con los datos obtenidos en campo.

ALTURA (mm)	DIAMETRO (mm)	AREA (mm ²)	MASA (g)	FUERZA (KN)	CARGA (MPa)
110	55	2376	627	103	43
110	55	2376	629	110	46
110	55	2376	556	102	43
110	55	2376	630	85	36
110	55	2376	613	279	118
110	55	2376	677	441	186
110	55	2376	651	377	159

Fig. 10 Datos de compresión simple, obtenidos en laboratorio

V. DISCUSIÓN

Analizando los datos obtenidos se determinaron los valores de $RMR_{BÁSICO}$ y $RMR_{CORREGIDO}$, obteniendo los siguientes resultados:

TABLA X
Cuantificación $RMR_{BÁSICO}$

$RMR_{BÁSICO}$			
FACTOR		VALOR	PONDERACIÓN
F_1	Compresión Simple	32.7	4
F_2	RQD	5.96	3
F_3	Espaciado	60 – 200 mm	8
F_4	Estado diaclasas	3 – 10 m	13
F_5	Presencia de agua	Seco	10
TOTAL			38

La excavación del talud de la primera estación geomecánica (662655, 9634018), es a favor del buzamiento con un ángulo entre 20°- 45° (situación favorable).

El factor de corrección por la orientación de las discontinuidades resta dos puntos (-2) al valor de $RMR_{BÁSICO}$. Permitiendo determinar el $RMR_{CORREGIDO}$ y a su vez establecer una “muy mala calidad” del macizo rocoso.

La cuantificación del SMR (“Slope Mass Rating”) para la primera estación geomecánica es la siguiente:

TABLA XI
Cuantificación del SMR

FACTOR	VALOR
F_1	0.15
F_2	1.00
F_3	0

La excavación efectuada sobre el macizo corresponde a una voladura suave. Basado en la Tabla V, el cuarto factor recibe una ponderación de +8.

Con los valores anteriores se determina el valor del SMR:

$$SMR = RMR_{BÁSICO} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

$$SMR = 38 + (0.15 * 1.00 * 0) + 8$$

$$SMR = 46$$

Este valor permite definir al talud como “parcialmente estable”. Las recomendaciones para mejorar la estabilidad de este talud en acuerdo a las indicaciones de Tomás y otros. (2015) son:

- El uso de concreto: Hormigón proyectado, concreto dental, contrafuertes y/o vigas.
- Uso de pernos o anclaje sobre las paredes del talud. El procedimiento para determinar el $RMR_{BÁSICO}$ y $RMR_{CORREGIDO}$ en la segunda estación es el mismo.

Las cuantificaciones de los factores se muestran en la siguiente figura:

TABLA XII
Cuantificación RMR_{BÁSICO}

FACTOR		VALOR	PONDERACIÓN
F_1	Compresión Simple	25	2
F_2	RQD	20	3
F_3	Espaciado	60 – 200 mm	8
F_4	Estado diaclasas	3 – 10 m	17
F_5	Presencia de agua	Ligeramente húmedo	10
TOTAL			40

La excavación del talud de la primera estación geomecánica, es a favor del buzamiento con un ángulo entre 20°- 45° (situación favorable).

El factor de corrección por la orientación de las discontinuidades se le resta dos puntos (-2) al valor de RMR_{BÁSICO}. Permitiendo determinar el RMR_{CORREGIDO} y a su vez establecer una “muy mala calidad” del macizo rocoso (ver Fig. 7).

La cuantificación del Calificador de talud (“Slope Mass Rating” - SMR) para la segunda estación geomecánica es la siguiente:

TABLA XIII
Cuantificación del SMR

FACTOR	VALOR
F_1	0.15
F_2	1.00
F_3	0

La excavación efectuada sobre el macizo corresponde a una voladura suave. Basado en la Tabla V, el cuarto factor recibe una ponderación de +8.

Con los valores anteriores se determina el valor del SMR:

$$SMR = RMR_{BÁSICO} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

$$SMR = 48 + (0.15 * 1.00 * 0) + 8$$

$$SMR = 56$$

Este valor permite definir al talud como “parcialmente estable” (Ver Fig. 9). Las recomendaciones para mejorar la estabilidad de este talud [14] son: El uso de concreto (Hormigón proyectado, concreto dental, contrafuertes y/o vigas) y uso de pernos o anclaje sobre las paredes del talud.

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de la caracterización de los macizos rocosos de origen ignimbríticos ubicados en la vía Pasaje – Santa Isabel mediante la cuantificación del RMR y SMR, hemos definido su calidad.

El macizo rocoso analizado se presenta de “mala calidad” al ser caracterizado mediante el método RMR, sin embargo, es parcialmente estable de acuerdo al SMR, en acuerdo con los resultados obtenido. Sin embargo, se necesitan estudios más detallados aplicando esta metodología de estudio para determinar las acciones de corrección con la finalidad de mejorar su estabilidad.

Esta metodología de estudio puede ser aplicable también a rocas, que en su historia geológica presentan enfriamiento rápido con formaciones de diaclasas con orientación variable.

REFERENCES

- [1] Branney, M. J. & Kokelaar, B. P. (1997) Giant bed from a sustained catastrophic density current flowing over topography: Acatlán ignimbrite, Mexico. *Geology*, 25, 115-118.
- [2] Walker G.P.L. (1983) Ignimbrite types and ignimbrite problems. *J Volcano Geotherm Res* 17:65-88.
- [3] Ross, C.S., Smith, R.L., 1961. Ash-flow tuffs: their origin, geologic relations, and identification. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 366 (81 pp.).
- [4] Ragan, D.H., Sheridan, M.F., 1972. Compaction of the bishop Tuff, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 83, 95– 106.
- [5] Mulas, M. (2013). Depositional and welding processes in low aspect ratio ignimbrites: examples from the Sulcis Volcanic District (Sardinia, Italy) (Doctoral dissertation, Università degli Studi di Cagliari).
- [6] Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egtüz, A., Peterson, D. E., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1), 75-124.
- [7] Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D., Winkler, W., 1999. Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics* 307, 255–276.
- [8] Pratt, E; Figueroa, J & Flores, B. (1997). Informe N° 1, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Mapa escala 1: 200.000. *Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 3° S and 4° S. CODIGEM -BGS, Quito – Ecuador* 58 pp.
- [9] Cas, R., & Wright, J. V. (2012). *Volcanic successions modern and ancient: A geological approach to processes, products and successions.* Springer Science & Business Media.
- [10] Cabrera Car, M. M. (2010). Influencia de la Persistencia de una Familia de Discontinuidades en la Estabilidad frente al Deslizamiento de una Presa de Gravedad (Doctoral dissertation, Caminos).
- [11] Jordá, B., L., Martín-García, R., Alonso-Zarza, A. M., Jordá, R., & Romero-Crespo, P. L. (2016). Stability assessment of shallow limestone caves through an empirical approach: application of the stability graph method to the Castañar Cave study site (Spain). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1469- 1483.
- [12] ROMANA, M. R. Slope Mass Rating (SMR)-La aplicación de la clasificación de Bieniawski a los taludes. *Comprehensive Rock Engineering*, 1993, vol. 3, p. 575-599.
- [13] Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification of jointed rock masses. *Exploration for Rock Engineering*. Johannesburg: Balkema, 97, 106.
- [14] TOMÁS, Roberto; CANO, Miguel; RIQUELME, Adrián. (2015) Evaluación de la calidad geomecánica de taludes inestables en la zona andina mediante la aplicación de la clasificación Slope Mass Rating