

CORRELACIONES ENTRE LAS CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS Q Y RMR EN EL TUNEL EXPLORATORIO DE “LA LINEA”, CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA

CORRELATIONS BETWEEN THE RMR AND Q GEOMECHANICAL CLASSIFICATIONS AT “LA LÍNEA” EXPLORATORY TUNNEL, COLOMBIAN CENTRAL ANDES

ÁLVARO DE JESÚS CASTRO CAICEDO

PhD., Ing. M.M., Profesor, Universidad Nacional de Colombia, ajcastro@unal.edu.co

DIANA MARCELA PÉREZ PÉREZ

marcelapp@gmail.com

Recibido para evaluación: 21 de Junio de 2012 / Aceptación: 20 de Junio de 2013 / Recibida versión final: 02 de Diciembre de 2013

RESUMEN: Se presentan aquí los resultados de correlaciones propuestas para las clasificaciones de macizos rocosos RMR y Q obtenidos a partir de levantamientos de los terrenos excavados durante la construcción del Túnel Piloto de la Línea, de 8,55 km de extensión en la Cordillera Central de Colombia.

Se obtuvieron correlaciones para sectores delimitados con base en criterios geológicos y geotécnicos. Se evalúa estadísticamente la calidad de las correlaciones propuestas concluyendo que son aceptables. Se espera que las correlaciones sean de utilidad en el diseño y construcción del túnel principal, llamado Segundo Centenario.

Palabras clave: Clasificación RMR. Clasificación Q. Túnel de La Línea. Túnel Segundo Centenario. Colombia.

ABSTRACT: Correlations between the RMR and Q geomechanical classifications schemes obtained during underground geotechnical surveys at the 8.55 km length “La Línea Pilot Tunnel” (TPL) within the Central Andes of Colombia are presented.

Correlations were defined based on geological and geotechnical evidences. The correlations were statistically assessed concluding that these proposals are acceptable. The proposed correlations are expected to be useful in the design and construction of the La Línea roadway tunnel.

Keywords. RMR Rock Mass Classification. Q Rock Mass Classification. La Línea Tunnel. Segundo Centenario Tunnel. Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Las clasificaciones geomecánicas se utilizan en los estudios geotécnicos con el objetivo de determinar y evaluar de forma cuantitativa y cualitativa la calidad de los terrenos con el fin de definir aspectos de diseño, construcción, soporte y estabilidad. La clasificación se realiza por observaciones y mediciones sistemáticas en el terreno, sin embargo estas operaciones de campo dependen en buena medida de la experiencia de quien las realiza por lo cual puede existir subjetividad. Una forma de superar esta limitación consiste en obtener las clasificaciones por diferentes métodos. Las clasificaciones RMR Rock Mass Rating, (Bieniawski, 1989) y Q (Barton, 2007) son las más difundidas.

Las correlaciones empíricas entre clasificaciones determinadas en el mismo terreno tienen tal vez su

mayor utilidad en el caso de túneles exploratorios, puesto que su información sobre estado del terreno, sostenimiento, y autosoporte, principalmente, pueden ser fundamentales para optimizar el diseño y la construcción de la obra principal, como es el objetivo de la excavación del Túnel Piloto de La Línea (TPL). Esto especialmente si se considera que los factores de las clasificaciones RMR y Q son diferentes, es decir, el disponer de una correlación obtenida en el terreno incluye en el resultado aspectos no evaluados por uno de los dos métodos y que pueden ser importantes para la obra.

El TPL se encuentra ubicada en la parte centro-occidental de Colombia dentro del proyecto de cruce vial de la Cordillera Central, hace parte de la troncal Bogotá-Buenaventura, en el tramo Armenia-Ibagué. La Figura 1 presenta la localización.

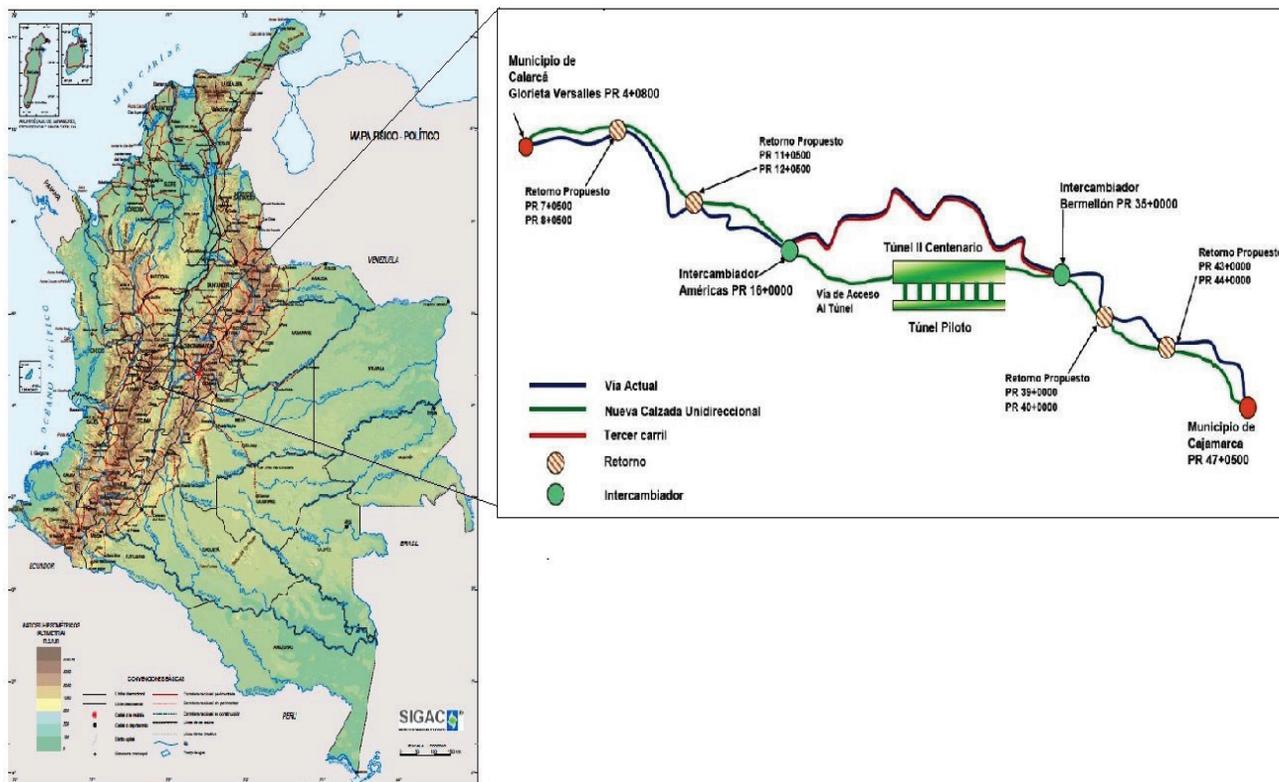


Figura 1. Localización del Túnel Piloto y el Túnel II Centenario de La Línea en Colombia. Elaborado a partir de mapa del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y de gráfica de www.calarca.net.

2. CORRELACIONES ENTRE LOS ÍNDICES RMR Y Q

La relación entre los índices de calidad RMR y Q puede expresarse en forma general como:

Donde dependen del tipo y estado de la roca y de su condición in situ. Se han propuesto distintas correlaciones empíricas para RMR y Q como las presentadas en la Tabla 1, estas correlaciones tienen aplicación local.

Tabla 1. Correlaciones entre el índice RMR y el índice Q, de González de Vallejo (2004) y elaboración propia.

AUTOR	CORRELACIÓN RMR - Q
Barton, 1995.	$RMR=15 \log(Q)+50$
Bieniawski, 1976, 1989.	$RMR=9 \ln(Q)+44$
Rutledge y Preston, 1978,	$RMR=13.5 \ln(Q)+43$
Moreno E. 1981.	$RMR=12.5 \ln(Q)+55.2$
Abad et al 1983.	$RMR=10.53 \ln(Q)+41.83$
Cameron Clark, Budavari 1981.	$RMR=5 \ln(Q)+60.8$

Kaiser y Gale (1985) proponen la expresión general: , con base en estudios probabilísticos. Las correlaciones deben emplearse como medio para valorar la consistencia y la calidad de los datos de campo, más que como reemplazo directo, dadas las diferencias de parámetros que existen entre los sistemas Q y RMR.

Los sistemas no deben necesariamente conducir a una valoración similar, es aconsejable aplicar un único sistema y estimar aquellos factores no incluidos por separado, por ejemplo la orientación de las discontinuidades en Q.

3. LAS CORRELACIONES EN EL TÚNEL EXPLORATORIO DE LA LÍNEA

Las correlaciones fueron realizadas a partir de los levantamientos geotécnicos efectuados durante la excavación del túnel en extensión de 8.554m durante los años 2010 y 2011. Se identificaron distintas unidades litológicas dentro de un ambiente complejo y con límites de tipo estructural. El estudio geológico realizado para la licitación de la construcción del Túnel Piloto (ver Figura 2), permite diferenciar las zonas homogéneas descritas en la Tabla 2. Los levantamientos geotécnicos en construcción se

realizaron en los días subsiguientes a los avances con explosivos o mecánicos, determinando sectores visualmente homogéneos y con apoyo de herramientas manuales como los martillos geológicos y Schmidt, usados para reconocer la dureza superficial, las litologías y el *Strength Reduction Factor* de método Q. Los terrenos homogéneos por tanto fueron determinados acorde con el avance de la excavación y después de análisis de los sectores atravesados. En las Figuras 3 y 4 se puede observar la variación de los valores de RMR y Q encontrada en este trabajo a lo largo del TPL.

Tabla 2. Zonas geológicas en el terreno del TPL. Invías (2004) y elaboración propia.

UNIDAD	SECTOR	UNIDAD	LITOLOGIAS Inicio	ABCISA (Km)		LONGITUD (m)	
				Fin			
COMPLEJO QUEBRADAGRANDE	Miembro volcánico	A	Suelo residual	Suelo residual	K0+011	K0+050	61
		B	Miembro volcánico	Diabasas	K0+050	K1+235	1185
		C	Falla Alaska	Metadiabasas y lutitas	K1+235	K1+300	65
	Miembro volcánico sedimentario	D	Miembro volcánico sedimentario	Diabasas, chert, areniscas, lutitas	K1+300	K1+945	645
		E	Falla El Viento	Metapelitas oscuras grafitosas, cuarcitas y metadiabasas verdes	K1+945	K1+990	45
		F	Miembro volcánico sedimentario	Diabasas, chert, areniscas, lutitas	K1+990	K2+600	610
	Miembro sedimentario volcánico	G	Miembro sedimentario volcánico	Areniscas, areniscas conglomeráticas, diabasas, lutitas	K2+600	K2+935	335
	Miembro sedimentario	H	Miembro metasedimentario A	Metalutitas, metalodolitas y metalimolitas	K2+935	K2+970	35
		I	Falla La Vaca	Lutitas, lodolitas y areniscas finas	K2+970	K3+160	190
		J	Miembro metasedimentario	Metalutitas, metalodolitas y metalimolitas	K3+160	K3+850	690
	Miembro tectonizado	K	Miembro milonítico	Esquistos verdes cuarzosericítico, cuarcitas	K3+850	K4+335	485
FALLA	L	Falla La Soledad		K4+335	K4+870	535	

UNIDAD	SECTOR	UNIDAD	LITOLOGIAS Inicio	ABCISA (Km)		LONGITUD (m)	
				Fin			
C. CAJAMARCA	Gabros	M	Gabros de la Línea	Gabros, Anfibolitas	K4+870	K6+080	1210
	Esquistos	N	Complejo Cajamarca	Esquistos verdes, esquistos grises	K6+080	K7+750	1670
		O	Falla la Cristalina		K7+750	K7+830	80
PORFIDOS	Tpad	P	Contacto del Pórfido Andesítico con el Complejo Cajamarca	Pórfido con xenolitos de esquisto	K7+830	K8+105	275
		Q	Pórfido Andesítico	Pórfido Andesítico	K8+105	K8+542	437

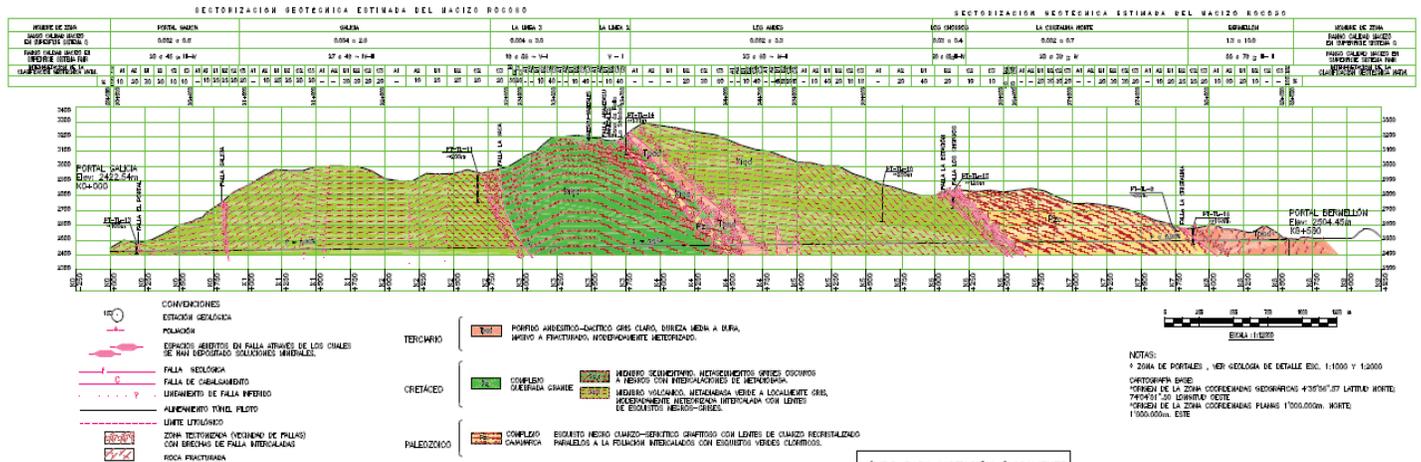


Figura 2. Perfil geológico del terreno en el Túnel Piloto de La Línea (Invias, 2004).

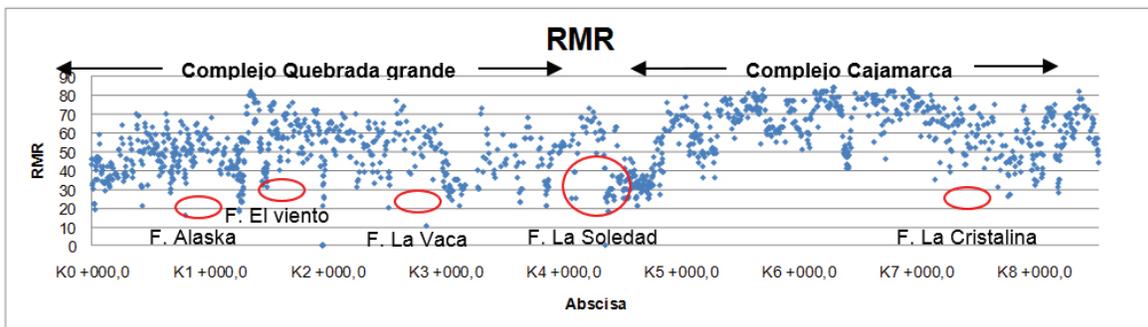


Figura 3. Valores de la clasificación RMR en el terreno atravesado por el Túnel Piloto de La Línea, son señaladas algunas fallas geológicas.

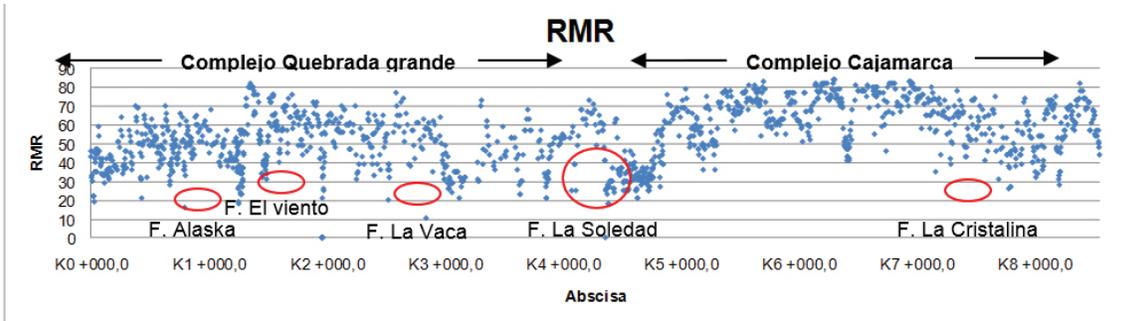


Figura 4. Valores de la clasificación Q en el terreno atravesado por el Túnel Piloto de La Línea.

En el TPL la relación directa RMR-Q se presenta en la Figura 5a, donde es visible una acumulación de puntos en el sector de bajos valores. Se realizó una transformación logarítmica, Figura 5b, donde los valores de Q son remplazados por los valores de $\ln(Q)$, procedimiento realizado con el fin de establecer una

correlación acorde con las presentadas en la Tabla 1. En la Figura 5b se observa que la transformación logarítmica resulta en distribución de los datos con mayor homogeneidad, hecho que facilita la interpretación y el establecimiento de tendencias entre las dos variables.

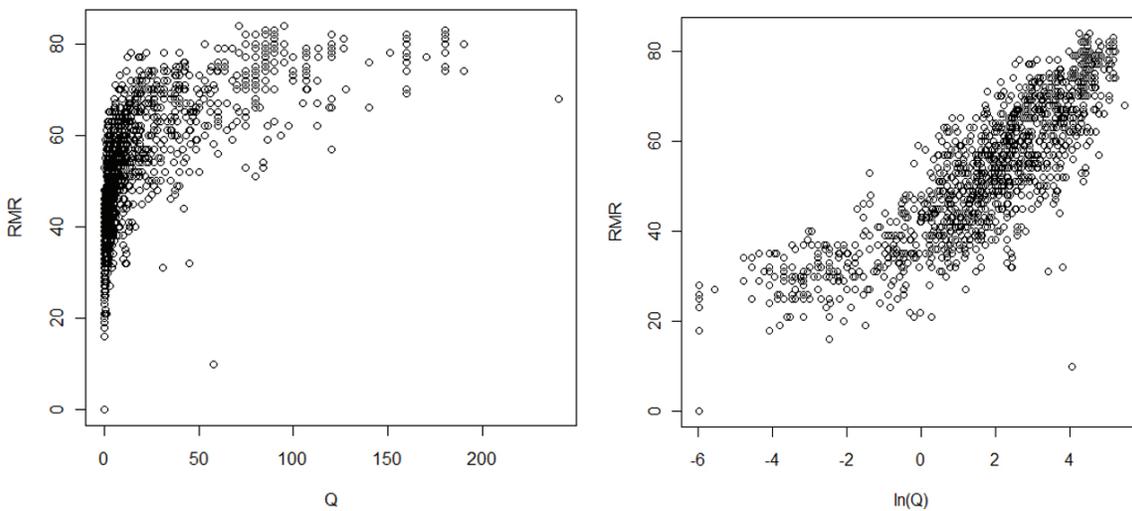


Figura 5. a) Relación entre Q y RMR. b) Relación entre el RMR y la transformación logarítmica de Q.

4. CORRELACIONES POR SECTORES DURANTE EXCAVACIÓN DEL TÚNEL

Se realizaron correlaciones lineales dispuestas por paquetes litológicos del TPL, en la Figura 6 el color de cada punto representa un sector geotécnico. La evaluación de la correlación para el total de los datos es mostrada en la Figura 7; se presenta un ajuste lineal que se aleja para los valores altos y bajos del conjunto, por esto se realiza una segunda correlación, una para

los datos de Q inferiores a 1 y otra para los datos de Q mayores a 1, Figura 8, obteniendo una mayor claridad de la tendencia de los datos.

En las Figuras 9 a 12 se presentan algunos ejemplos de correlaciones por unidades geológicas, aquí, por evaluación del coeficiente de determinación R del ajuste. Los valores para clasificar la calidad de la regresión fueron fijados de manera arbitraria y se presentan en la Tabla 3; los resultados de correlación para cada caso están en la Tabla 4.

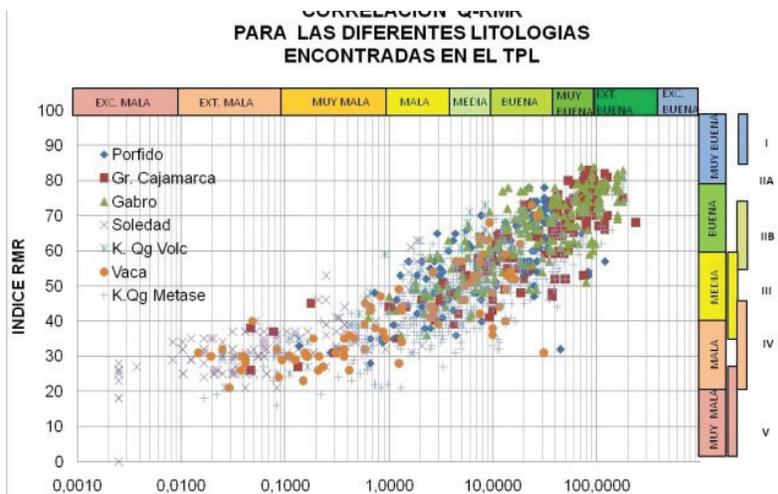


Figura 6. Relación entre el Q y el RMR en las principales unidades litológicas.

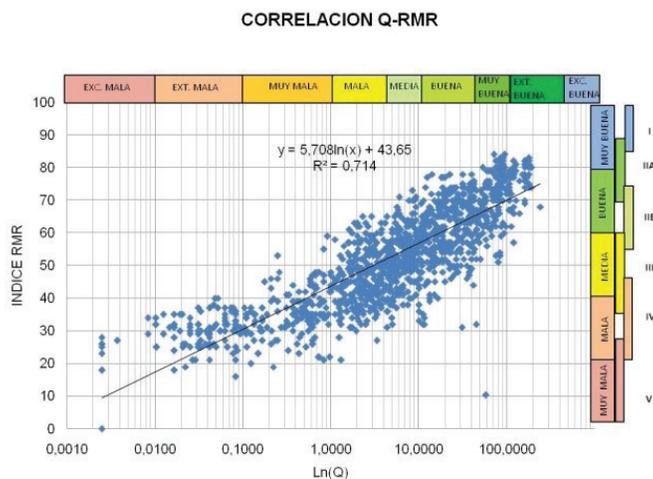


Figura 7. Correlación general en el TPL.

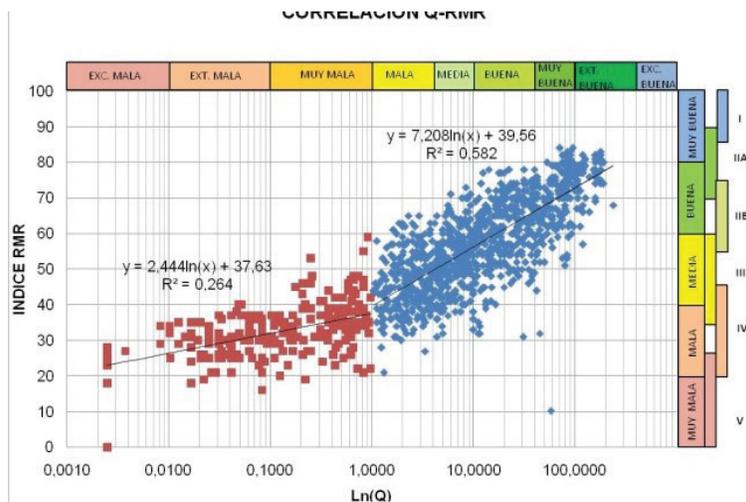


Figura 8. Correlación LnQ-RMR para Q menor y mayor a 1.

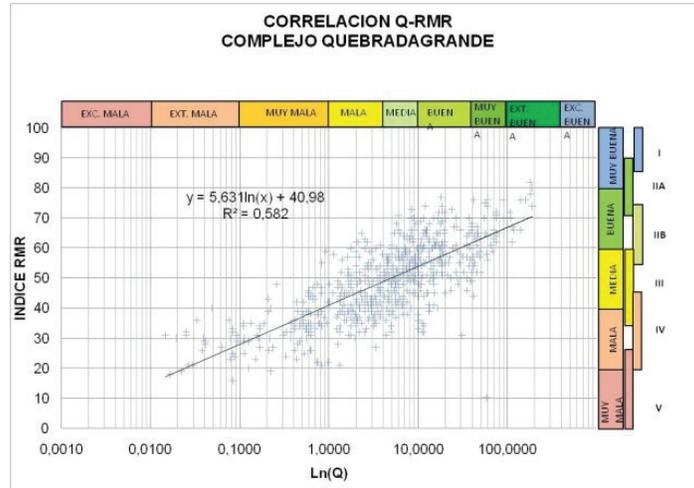


Figura 9. Correlacion LnQ-RMR en el Complejo Quebradagrande.

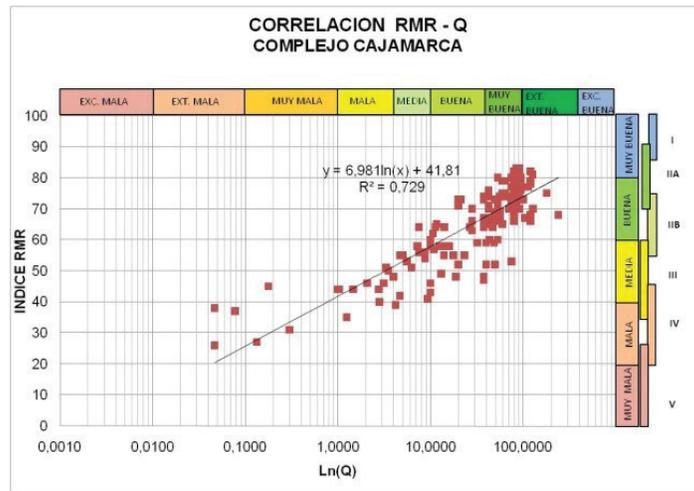


Figura 10. Correlacion LnQ-RMR en el Complejo Cajamarca.

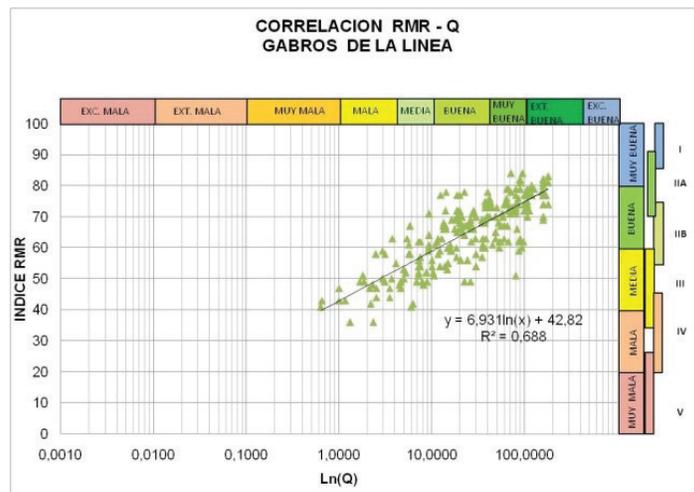


Figura 11. Correlacion LnQ-RMR en los Gabros de La Linea.

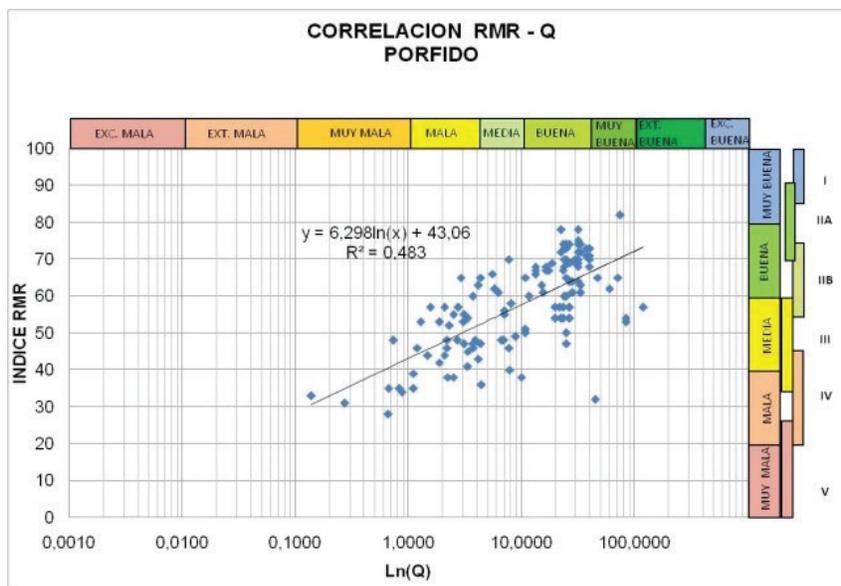


Figura 12. Correlación LnQ-RMR en el cuerpo pórfido.

Tabla 3. Clasificación del grado de correlación establecida en este trabajo.

CORRELACIÓN	VALOR O RANGO de R ²
Buena	$0.6^2 \leq R^2 < 1$
Regular	$0.5 \leq R^2 < 0.6$
Mala	$R^2 < 0.5$

Tabla 4. Correlaciones obtenidas y su calidad según el Coeficiente.

UNIDAD O SECTOR	ECUACIÓN	R ²	CALIDAD DE LA CORRELACIÓN
Todo el túnel	$RMR = 5,7 \ln(Q) + 43,6$	0,71	Buena
Para Q < 1	$RMR = 2,4 \ln(Q) + 37,6$	0,26	Mala
Para Q > 1	$RMR = 7,2 \ln(Q) + 39,5$	0,58	Regular
Complejo Quebradagrande	$RMR = 5,6 \ln(Q) + 40,9$	0,58	Regular
Quebradagrande metasedimentario	$RMR = 6,3 \ln(Q) + 38,5$	0,60	Buena
Qubradagrande volcánico	$RMR = 6,4 \ln(Q) + 45,4$	0,77	Buena
Falla La Vaca	$RMR = 4,6 \ln(Q) + 40,7$	0,62	Buena
Falla La Soledad	$RMR = 3,5 \ln(Q) + 42,5$	0,55	Regular
Complejo Cajamarca	$RMR = 6,9 \ln(Q) + 41,8$	0,73	Buena
Gabros de la Línea	$RMR = 6,9 \ln(Q) + 42,8$	0,68	Buena
Pórfido	$RMR = 6,2 \ln(Q) + 42,0$	0,48	Mala

La separación de la base de datos en paquetes litológicos menores resultó ser útil para el caso del Complejo Quebradagrande, donde el coeficiente

de correlación aumentó a 0,77 en el miembro volcánico.

5. CONCLUSIONES

Tanto la clasificación Q como la RMR son ampliamente utilizadas en tunelería, por lo cual la obtención de correlaciones entre los dos métodos son especialmente útiles en el caso de túneles con objetivo exploratorios para obras subterráneas de mayor sección y complejidad, como el Túnel Segundo Centenario. El uso de los dos métodos debe considerar que sus parámetros son diferentes, y por tanto rigurosamente no comparables, sin embargo, según Barton (2006), es posible utilizar las correlaciones para determinar los tiempos de autosporte y el módulo de deformación del macizo rocoso, entre otros parámetros de interés.

En este trabajo se elaboraron ecuaciones de correlación RMR-Q del tipo lineal bajo transformación logarítmica de Q con la intención de ser comparables con las propuestas de la bibliografía (Tabla 1); sin embargo es posible que se obtengan correlaciones de mayor calidad con ecuaciones diferentes a la lineal. En comparación con las propuestas citadas en dicha Tabla, se observa que las obtenidas en el TPL están próximas de las de Bieniawski (1989) y Kaiser y Gale (1985).

Es de resaltar que las ecuaciones obtenidas son de carácter local y pueden ser empleadas en futuros trabajos sobre la zona, especialmente en el diseño y construcción del Túnel Bicentenario

Fue observado que subdividir los sectores geotécnicos no mejora necesariamente la calidad de las correlaciones, esto posiblemente por la disminución del número de datos incluidos en el cálculo de la correlación.

REFERENCIAS

- [1] Abad, J., Celada, B., Chacón, E., Gutierrez, V., Hidalgo, E. 1983. Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mines galleries and to design their supports. Proc. 5th int. Congress on Rock Mechanics. ISRM. Melbourne. (In Ramirez y Alejano, 2004).
- [2] Barton, N. (1995). The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote Lecture, 8th ISRM Congress, Tokyo, 3: 1023-1032, Balkema, Rotterdam. (In Barton 2006)
- [3] Barton N. 2006. Rock mass characterization and modelling aspects of mining and civil engineering. Proc. VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Cartagena 2006.
- [4] Bieniawski, Z. T., 1976. Rock Mass Classifications in rock engineering. Exploration for rock engineering. Ed Z. T. Bieniawski A. A. Balkema. Johannesburg. (In Bieniawski, 1989.)
- [5] Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons. USA.
- [6] Cameron-Clark, I. S., Budavari, S. (1981) Correlation of Rock mass classification parameters obtained from borehole an in-situ observations. Engineering Geology 17. pp. 19-53 (In Bieniawski, 1989.)
- [7] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, mapa físico político de Colombia escala 1:5'000000.
- [8] Instituto Nacional de Vías, Invia, (2004). Construcción del Túnel Piloto-Fase I del Túnel de La Línea. Gómez Cajiao, Consultoría Colombiana, Estudios Técnicos S. A.
- [9] Gonzalez de Vallejo I., 2004 Ingeniería Geológica. Pearson Educación. Madrid .
- [10] Kaiser T. K. Gale A. D., 1985. Evaluation of cost and empirical support design at B. C. Rail Tumbler Ridge Tunnels. Canadian Tunneling, pp 77-106.
- [11] Moreno Tallon E. (1980) Aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los túneles de Pajares. II Curso de sostenimientos activos en galerías y túneles. Fundación Gomez-Pardo, Madrid. (In Ramirez y Alejano, 2004.)
- [12] Ramirez, P., Alejano, L. (2004) Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes. Red DESIR. Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/14183> [descargado 26 de agosto de 2013].
- [13] Rutledge, J. C., Preston, R. L. (1978) Experience with engineering classification of rock. Proc. Int. Tunnel Symp. Tokyo. (In Bieniawski 1989).
- www.calarca.net. [descargado 26 de agosto 2013].