

NUEVAS FUNCIONES CONTINUAS PARA EL CÁLCULO DEL SLOPE MASS RATING (SMR): APLICACIÓN MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A LOS TALUDES ROCOSOS DE UNA CANTERA

R. Tomás¹, M. Cano^{1,2}, J.C. Cañaveras³, A. Cuenca⁴, J. Delgado³, A. Estévez³, J. A. Pina³

¹Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. E.P.S.A. Universidad de Alicante. Apartado de correos 99, 03080 Alicante. roberto.tomas@ua.es, miguel.cano@ua.es

²Estructuras Aliben, S.A., C/ Médico Pedro Herrero, 2, 1º A, 03006 Alicante. miguel@aliben.es

³Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Alicante. Apartado de correos 99, 03080 Alicante. Jose.delgado@ua.es, jc.cañaveras@ua.es, antonio.estevez@ua.es, jose.pina@ua.es

⁴Laboratorio de Carreteras, Generalitat Valenciana, Ctra. Ocaña s/n, 03005 Alicante. Cuenca_art@gva.es

Resumen: El Slope Mass Rating (SMR, Romana, 1985) es un índice geomecánico empleado para la caracterización de taludes rocosos. Este índice se obtiene corrigiendo el RMR básico (Bieniawski, 1989) mediante una serie de factores dependientes del paralelismo entre las direcciones de las discontinuidades y el talud (F_1), del buzamiento de las discontinuidades (F_2), de la relación de buzamientos entre las discontinuidades y el talud (F_3), así como del método de excavación empleado (F_4). Tanto el RMR como el SMR se obtienen a partir de la estimación de valores característicos del macizo rocoso empleando para ello funciones discretas. En el presente trabajo se lleva a cabo una revisión de las funciones continuas para el SMR propuestas por Tomás *et al.* (2004) introduciendo cambios en la determinación del parámetro F_3 y del término dependiente del régimen hidráulico (r_G) así como extendiendo su uso a roturas en cuña. Estas funciones son aplicadas a 47 taludes rocosos que previamente habían sido analizados mediante la metodología convencional para hacer un análisis comparativo entre ambos índices. Finalmente se caracterizará el frente rocoso de una cantera abandonada mediante el SMR continuo y discreto haciendo uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos al aplicar la clasificación continua muestran que proporciona valores del SMR superiores a los de la clasificación discreta (del orden de 10 puntos) permitiendo discriminar entre taludes de calidad similar y eliminar la ambigüedad que a veces plantea su cálculo.

Palabras clave: Clasificación geomecánica, SMR, RMR básico, función continua, SIG.

Abstract: Slope Mass Rating (SMR, Romana, 1985) is a geomechanic index used to rock slope characterization. This index is obtained from basic RMR (Bieniawski, 1989) by means of a set of factors that take into account the parallelism between the discontinuities and slope directions (F_1), discontinuity dip (F_2), discontinuity and slope dip relation (F_3), and the method employed for excavation (F_4). RMR and SMR are obtained by means of characteristic values of the rock mass employing discrete functions. In this work we take a revision of the continuous functions proposed by Tomás *et al.* (2004) for SMR, introducing changes in F_3 determination and hydraulic conditions dependent term (r_G) and extending their use to wedge failure. These functions are applied to 47 rock slopes previously analysed by means of conventional methodology to do a comparative analysis of both indexes. Finally we characterize the rock slope of an abandoned open pit by means of both continuous and discrete SMR using a Geographical Information System (GIS). The results obtained applying continuous classification show that they provide SMR values higher than the discrete ones (about 10 points) allowing to discriminate between slopes with similar quality and eliminate the ambiguity resulting of their calculus.

Key words: Geomechanical classification, SMR, basic RMR, continuous function, GIS.

Tomás, R., Cano, M., Cañaveras, J.C., Cuenca, A., Delgado, J., Estévez, A. y Pina, J. A. (2006): Nuevas funciones continuas para el cálculo del Slope Mass Rating (SMR): aplicación mediante un sistema de información geográfica a los taludes rocosos de una cantera. *Revista de la Sociedad Geológica*, 19 (1-2): 87-97

Las clasificaciones geomecánicas constituyen un sistema de comunicación universal entre sus usuarios (ingenieros, geólogos, etc.), mejoran el conocimiento del comportamiento del macizo rocoso y proporcionan una valoración cuantitativa del mismo por medio de un algoritmo aritmético simple (Romana, 1997). Algunos de los índices geomecánicos empleados en la caracterización geomecánica de taludes en roca son el RMS (Selby, 1980), el RMR (Bieniawski, 1989), el SPSC (Hack, 1998), el MRMR modificado (Haines y Terbrugge, 1991), el NSM (Shuk, 1994), el SPSC modificado (Lindsay *et al.*, 2001) y el SMR (Romana, 1985). Esta última goza de una gran aceptación desde su aparición (Romana *et al.*, 2001; 2003; 2005). Una de sus principales ventajas es la exhaustiva definición cuantitativa que hace de los factores de corrección, que dependen de la orientación relativa existente entre el talud y las discontinuidades así como del método de excavación del talud. El SMR se caracteriza por su carácter discreto, asignando a cada parámetro una determinada puntuación en función del valor que adopta la variable que controla dicho parámetro. Como consecuencia, en ocasiones se observa que pequeños cambios en el valor de dicha variable da lugar a notables variaciones del parámetro en cuestión, lo que ocasiona cambios en la calidad asignada al macizo rocoso. Además no hemos de obviar el hecho de que el cálculo de los índices de calidad geomecánica discretos contiene una importante componente de juicio personal que también condiciona el índice de calidad final. Para evitar estos inconvenientes Tomás *et al.* (2004) propusieron una serie de funciones continuas para los diversos parámetros que intervienen en su cálculo basándose en las propuestas por Sen y Sadagah (2003) para el RMR.

De otra parte, la sencillez y sistemática de la clasificación SMR ha hecho que sea empleada por algunos autores como Gögl *et al.* (1998), Serón *et al.* (2001), Irigaray *et al.* (2001; 2003) y Cano *et al.* (2004) a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar la calidad geomecánica de los taludes o laderas naturales en una determinada zona con carácter espacial.

En el presente trabajo se redefinen estas funciones introduciendo nuevas modificaciones para el cálculo del SMR continuo. A su vez se aplicarán las funciones propuestas para llevar a cabo la clasificación geomecánica de los taludes rocosos de una cantera de áridos abandonada en la que está previsto llevar a cabo su restauración.

La clasificación geomecánica SMR

La clasificación geomecánica *Slope Mass Rating* (SMR) propuesta por Romana (1985) para taludes en roca se obtiene por la adición al RMR básico de una serie de factores de ajuste dependientes de la relación geométrica existente entre la discontinuidad y el talud, así como de la suma de un factor dado por el método de excavación, atendiendo a la expresión siguiente:

$$SMR = RMR_{\text{básico}} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad (1)$$

donde:

- El RMR básico se calcula de acuerdo con la clasificación de Bieniawski (1989). Se obtiene como la suma de cinco parámetros que tienen en cuenta la resistencia de la roca matriz, el espaciado entre discontinuidades, el estado de las discontinuidades, las condiciones hidráulicas del

TIPO DE ROTURA		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE	
P	A	$ \alpha_i - \alpha_s $	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	
T		$ \alpha_i - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/T/W	F ₁		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j $ ó $ \beta_i $	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P/W			F ₂	0.15	0.40	0.70	0.85
T	1.00						
P	C	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
W		$\beta_i - \beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
T		$\beta_j - \beta_s$					
P/T/W	F ₃		0	-6	-25	-50	-60
MÉTODO DE EXCAVACIÓN (F₄)							
Talud natural			+15	Voladura normal o excavación mecánica		0	
Precorte			+10	Voladura deficiente		-8	
Voladura suave			+8				
P: rotura plana; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña.							

Tabla I.- Parámetros de corrección F₁, F₂, F₃ y F₄ de la clasificación SMR (modificado de Romana (1985) en Anbalagan *et al.*, (1992)).

macizo y el RQD. Una descripción detallada de esta clasificación puede encontrarse en numerosos manuales.

- F_1 depende del paralelismo entre las direcciones de las discontinuidades (o de la línea de intersección de los planos de rotura, en el caso cuñas) y del talud (Tabla I).
- F_2 se refiere al buzamiento de la discontinuidad (β_j) en roturas planas y de la inmersión (o *plunge*) de la línea de intersección (β_i) en roturas por cuña. Para la rotura por vuelco, F_2 toma siempre el valor 1.0 (Tabla I).
- F_3 se refiere a la relación entre el buzamiento del talud y el buzamiento de la discontinuidad (rotura plana o por vuelco) o la inmersión de la línea de intersección (rotura en cuña) (Tabla I).
- F_4 es un factor de ajuste por el método de excavación empleado (Tabla I).

Funciones continuas del SMR

Tomás *et al.* (2004) propusieron una serie de funciones continuas para el SMR atendiendo a las funciones continuas propuestas por Sen y Sadagah (2003) para el RMR. En este apartado se proponen algunas variaciones puntuales para dichas funciones que afectan fundamentalmente al modo de expresar el término r_G , dependiente de las condiciones hidráulicas de las discontinuidades, y a la manera de expresar el parámetro F_3 mediante una serie de funciones continuas propuestas para los diferentes modos de rotura. Asimismo, como una de las modificaciones más relevantes cabe destacar la ampliación que se lleva a cabo de la clasificación continua con el fin de ampliar el uso de la misma al caso de rotura por cuña.

La primera modificación se ha llevado a cabo considerando la función propuesta por Romana (2005). El citado autor afirma que el mejor modo de determinar con precisión la influencia de las condiciones hidrogeológicas (r_G) es a partir de la relación de presiones intersticiales $r_u = u / \sigma_v$ a través de la expresión:

$$r_G = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{r_u}\right) - 1.5 \tag{2}$$

válida para valores de r_u comprendidos entre 0.02 y 0.7.

Introduciendo esta nueva manera de expresar el término r_G las expresiones continuas del RMR básico quedan como:

$$RMR_{básico} = \begin{cases} 0.2 \cdot RQD + 15.1 \cdot \log(\bar{X}) + 1.670\sigma_p - 2.9 \log(G) + 35.67 + (r_j) \\ 0.2 \cdot RQD + 15.1 \cdot \log(\bar{X}) + 0.075\sigma_c - 2.9 \log(G) + 34.00 + (r_j) \\ 0.2 \cdot RQD + 15.1 \cdot \log(\bar{X}) + 1.670\sigma_p + 10 \log(1/r_j) + 24.17 + (r_j) \\ 0.2 \cdot RQD + 15.1 \cdot \log(\bar{X}) + 0.075\sigma_c + 10 \log(1/r_j) + 22.50 + (r_j) \end{cases} \tag{3}$$

o expresando el RQD en función de la inversa del número de discontinuidades por unidad de longitud ($\lambda = 1/\bar{X}$) según la expresión de Priest y Hudson (1981):

$$RMR_{básico} = \begin{cases} 20(1+0.1\lambda) \cdot e^{-0.1\lambda} - 15.1 \cdot \log(\lambda) + 1.670\sigma_p - 2.9 \log(G) + 35.67 + (r_j) \\ 20(1+0.1\lambda) \cdot e^{-0.1\lambda} - 15.1 \cdot \log(\lambda) + 0.075\sigma_c - 2.9 \log(G) + 34.00 + (r_j) \\ 20(1+0.1\lambda) \cdot e^{-0.1\lambda} - 15.1 \cdot \log(\lambda) + 1.670\sigma_p + 10 \log(1/r_j) + 24.17 + (r_j) \\ 20(1+0.1\lambda) \cdot e^{-0.1\lambda} - 15.1 \cdot \log(\lambda) + 0.075\sigma_c + 10 \log(1/r_j) + 22.50 + (r_j) \end{cases} \tag{4}$$

dónde el *RQD* está expresado en tanto por ciento; \bar{X} es el espaciado medio entre discontinuidades en metros, σ_p es la resistencia a carga puntual en la ecuación y σ_c es la resistencia a compresión simple en la ecuación, ambas expresadas en MPa; r_j es el factor dependiente del estado de las discontinuidades y G es el caudal de agua que se infiltra a través de las discontinuidades del macizo, medido en litros por diez metros de longitud del macizo durante un minuto.

Las expresiones mostradas en (3) y (4) permitirán determinar el RMR básico a partir de diferentes parámetros en función de los datos de los que dispongamos (*RQD* o λ , σ_p o σ_c , G o r_u).

El cálculo del SMR continuo se lleva a cabo mediante la expresión (1) añadiendo al RMR el valor de los factores de corrección F_1 , F_2 , F_3 y F_4 . Según Romana (1993) el parámetro F_1 responde a la función continua:

$$F_1 = (1 - \text{sen}|A|)^2 \tag{5}$$

donde A indica el ángulo entre la dirección de buzamiento del talud (α_s) y de la discontinuidad (α_j) en roturas por vuelco y planas. En el caso de roturas en cuña A se refiere al ángulo formado por la dirección de *plunge* de la línea de intersección de los planos de discontinuidad (α_i) y la dirección del buzamiento del talud (α_s) (Sing y Goel, 1999).

El mismo autor estableció una función continua para el cálculo del parámetro de corrección F_2 :

$$F_2 = \tan^2 B \tag{6}$$

donde B representa el buzamiento de la discontinuidad (β_j) en grados, para la rotura plana y por vuelco, mientras que para roturas en cuña equivale al *plunge* o inmersión (β_i) de la línea de intersección de los planos de la cuña (Sing y Goel, 1999). Esta expresión es válida para valores de B inferiores a 45°, pues para valores superiores F_2 toma el valor de 1.

Sin embargo, no se conoce expresión alguna que permita estimar el parámetro F_3 a partir de la relación de buzamientos (C). Para la determinación de este parámetro (F_3) se proponen las siguientes funciones continuas que se ajustan a los valores

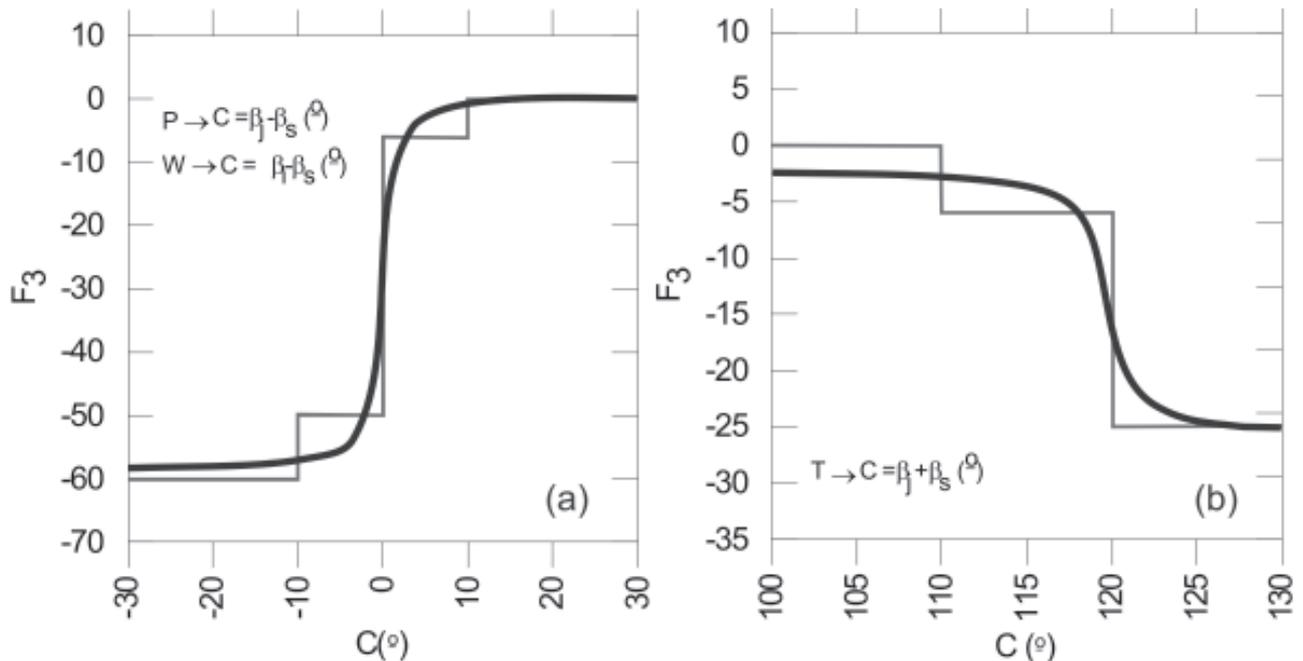


Figura 1.- Funciones de ajuste propuestas para la determinación del parámetro F_3 : a) rotura plana (P) o en cuña (W) y b) rotura por vuelco (T).

medios de los intervalos establecidos en la función discreta (Fig. 1):

$$F_3 = -29 + \frac{1}{3} \cdot \text{atan}C \quad (7)$$

$$F_3 = -14 - \frac{2}{15} \text{atan}(C - 120) \quad (8)$$

La función (7) es aplicable para taludes que presentan roturas planas o en cuña, mientras que la expresión (8) se utiliza en roturas por vuelco. La variable C expresa la relación de buzamientos, que toma los valores $\beta_j - \beta_s$ para rotura plana, $\beta_i - \beta_s$ para rotura en cuña y $\beta_j + \beta_s$ para la rotura por vuelco.

Las funciones (7) y (8) suponen una gran novedad en la estimación del parámetro F_3 . Éste toma los valores originales propuestos por Bieniawski (1989) (variables entre 0 y -60) y condicionan de forma muy importante el índice SMR final. Pensemos, por ejemplo, en un talud con rotura plana y $C=0^\circ$. El valor correspondiente a F_3 es, según la clasificación discreta original (Tabla I), de -25 puntos. Sin embargo, podemos pensar que estaremos del lado de la seguridad si tomamos el valor siguiente ($0^\circ < C \leq 10^\circ$) de -50 puntos, pues un simple error de 1° en la estimación del buzamiento de las discontinuidades o del talud podrían causar este cambio. Esto supone -25 puntos de diferencia en la estimación de F_3 que, dependiendo de los valores de F_1 y F_2 , puede producir cambios sustanciales en el índice final. Al dar un carácter continuo a este índice, así como al resto, se elimina la ambigüedad que se genera en estos casos en que los valores de referencia se encuentran próximos a los extremos de los intervalos

de puntuación. Esta última observación puede hacerse extensiva al resto de parámetros continuos que intervienen en el cálculo del SMR.

Por último, el factor F_4 depende del sistema de excavación del talud y por tanto presenta un carácter descriptivo insustituible.

En consecuencia, sustituyendo en la expresión (1), las funciones correspondientes al RMR básico expresadas en (3) ó (4) y a los factores de corrección F_1 (5), F_2 (6) y F_3 ((7) ó (8)) podemos calcular el SMR.

Asimismo, se propone la siguiente función lineal, basada en los valores discretos propuestos por Romana (1985), que expresa la probabilidad o susceptibilidad de rotura del talud (P en %) en función del valor correspondiente al SMR:

$$P(\%) = 100 - SMR \quad (9)$$

Comparación entre los resultados obtenidos con el SMR continuo y discreto

En el presente apartado se aplican las nuevas funciones continuas propuestas en la sección precedente a una serie de 47 taludes, con el fin de validar su eficacia. Los datos proceden de numerosos trabajos publicados. Los resultados obtenidos al aplicar las funciones continuas y discretas a los casos considerados son los que se muestran en la tabla II y figura 2.

En lo que se refiere a las diferencias absolutas entre los índices discretos y continuos de los diferentes índices geomecánicos, se observa (Tabla III) que la diferencia media absoluta es de 5 puntos para el RMR básico. La diferencia máxima no supera los 12 puntos para la estimación del RMR básico lo que equivale a poco más de media clase (una subclase).

ESTACIÓN	MATERIAL	TIPO DE ROTURA*	RMR BÁSICO (clase)		SMR (clase)		
			Discreto	Continuo	Discreto	Continuo	
1	Caliza	T	66 (IIb)	68 (IIb)	66 (IIb)	66 (IIb)	-
2	Caliza	P	64 (IIb)	65 (IIb)	40 (IVa/IIIb)	42 (IIb)	-
3	Caliza	T	65 (IIb)	67 (IIb)	64 (IIb)	66 (IIb)	-
4	Caliza	T	63 (IIb)	64 (IIb)	59 (IIIa)	63 (IIb)	**
5	Caliza	T	68 (IIb)	71 (IIa)	64 (IIb)	71 (IIa)	*
6	Caliza	T	64 (IIb)	68 (IIb)	60 (IIIa/IIb)	64 (IIb)	-
7	Caliza	P	62 (IIb)	64 (IIb)	62 (IIb)	64 (IIb)	-
8	Caliza	W	57 (IIIa)	59 (IIIa)	36 (IVa)	38 (IVa)	-
9	Caliza	T	54 (IIIa)	58 (IIIa)	53 (IIIa)	58 (IIIa)	-
10	Caliza	T	55 (IIIa)	59 (IIIa)	51 (IIIa)	57 (IIIa)	-
11	Caliza	T	67 (IIb)	68 (IIb)	46 (IIIb)	49 (IIb)	-
12	Caliza	W	54 (IIIa)	57 (IIIa)	34 (IVa)	42 (IIb)	**
13	Caliza	W	70 (IIb/IIa)	72 (IIa)	66 (IIb)	72 (IIa)	*
14	Caliza	T/W	66 (IIb)	67 (IIb)	62/65 (IIb)	66/67 (IIb)	-
15	Caliza	W	72 (IIa)	76 (IIa)	72 (IIa)	76 (IIa)	-
16	Margas	T	35 (IVa)	33 (IVa)	25 (IVb)	27 (IVb)	-
17	Calcarenita	T	68 (IIb)	78 (IIa)	68 (IIb)	78 (IIa)	*
18	Calcarenita	T	71 (IIa)	79 (IIa)	71 (IIa)	77 (IIa)	-
19	Calcarenita	T	53 (IIIa)	63 (IIb)	53 (IIIa)	62 (IIb)	**
20	Calcarenita	T	50 (IIIa/IIIb)	56 (IIa)	50 (IIIa/IIIb)	54 (IIa)	-
21	Calcarenita	T	51 (IIIa)	59 (IIIa)	46 (IIIb)	53 (IIIa)	*
22	Calcarenita	T	64 (IIb)	70 (IIa/IIb)	64 (IIb)	69 (IIb)	-
23	Calcarenita	P	49 (IIIb)	54 (IIIa)	49 (IIIb)	54 (IIIa)	*
24	Calcarenita	T	52 (IIIa)	54 (IIIa)	39 (IVa)	34 (IVa)	-
25	Calcarenita	T	45 (IIIb)	44 (IIIb)	34 (IVa)	35 (IVa)	-
26	Margocaliza	P	57 (IIIa)	61 (IIb)	15 (Va)	21 (IVb)	*
27	Filitas	T	24 (IVb)	21 (IVb)	14 (Va)	15 (Va)	-
28	Pizarras	T	28 (IVb)	25 (IVb)	18 (Va)	16 (Va)	-
29	Dolomía	T	61 (IIb)	72 (IIa)	49 (IIIb)	63 (IIb)	**
30	Dolomía	P	61 (IIb)	72 (IIa)	44 (IIIb)	62 (IIb)	**
31	Dolomía	P	61 (IIb)	72 (IIa)	29 (IVb)	43 (IIb)	**
32	Dolomía	T	65 (IIb)	73 (IIa)	32 (IVa)	42 (IIb)	**
33	Dolomía	T	65 (IIb)	77 (IIa)	32 (IVa)	45 (IIb)	**
34	Dolomía	T	65 (IIb)	72 (IIa)	32 (IVa)	41 (IIb)	**
35	Dolomía	T	65 (IIb)	75 (IIa)	53 (IIIa)	67 (IIb)	**
36	Dolomía	T	65 (IIb)	76 (IIa)	40 (IVa/IIIb)	56 (IIa)	**
37	Dolomía	T	65 (IIb)	75 (IIa)	40 (IVa/3b)	56 (IIa)	**
38	Dolomía	P	69 (IIb)	73 (IIa)	17 (Va)	17 (Va)	-
39	Lutita	W	46 (IIIb)	45 (IIIb)	29 (IVb)	31 (IVa)	*
40	Lutita	P	46 (IIIb)	45 (IIIb)	46 (IIIb)	45 (IIIb)	-
41	Marga	W	42 (IIIb)	42 (IIIb)	53 (IIIa)	50 (IIIa/IIIb)	-
42	Marga	P	62 (IIb)	62 (IIb)	17 (Va)	19 (Va)	-
43	Caliza	P	65 (IIb)	71 (IIa)	65 (IIb)	71 (IIa)	*
44	Mármol	W	64 (IIb)	66 (IIb)	35 (IVa)	51 (IIIa)	**

(-) sin cambios en la subclase ni en la clase; (*) cambio en la subclase; (**) cambio en la clase.

Tabla II.- Índice geomecánico y clases correspondientes a los taludes considerados (en negrita se indica el valor menor -más desfavorable- proporcionado por las diferentes funciones para cada índice geomecánico y cada estación).

Para el *SMR* se ha determinado una diferencia media de 6 ± 5 , mínima de 0 y máxima de 18 puntos lo que implica diferencias medias de menos de una subclase (10 puntos) y máximas inferiores a una clase geomecánica (20 puntos) al estimar los índices a través de las funciones continuas, siendo los valores del *SMR* continuo, generalmente, superiores a los de la clasificación discreta original. Este hecho compensa en cierta medida el carácter pesimista de la clasificación discreta original, pues Romana *et al.* (2001; 2005) han observado que el *SMR* discreto es del orden 5 puntos (media

subclase) menor que el valor real de calidad del talud.

Al hacer este mismo análisis por tipos de rotura para el *SMR* (Tabla IV) observamos que el mayor grado de coincidencia entre los índices discretos y continuos ocurre para la rotura en cuña con una diferencia media de 5 ± 5 puntos y diferencias absolutas comprendidas entre 2 y 17 puntos. En el lado opuesto nos encontramos con las funciones aplicadas para el caso de rotura por vuelco que ofrecen una diferencia media de 7 ± 5 y mínima y máxima respectivamente de 0 y 16 puntos.

	Diferencia media	Diferencia máxima	Diferencia mínima
RMR básico	5 ± 4	12	1
SMR	6 ± 5	18	0

(*) n = nº de casos considerados.

Tabla III.- Diferencias entre los índices geomecánicos continuos y discretos (n*=45).

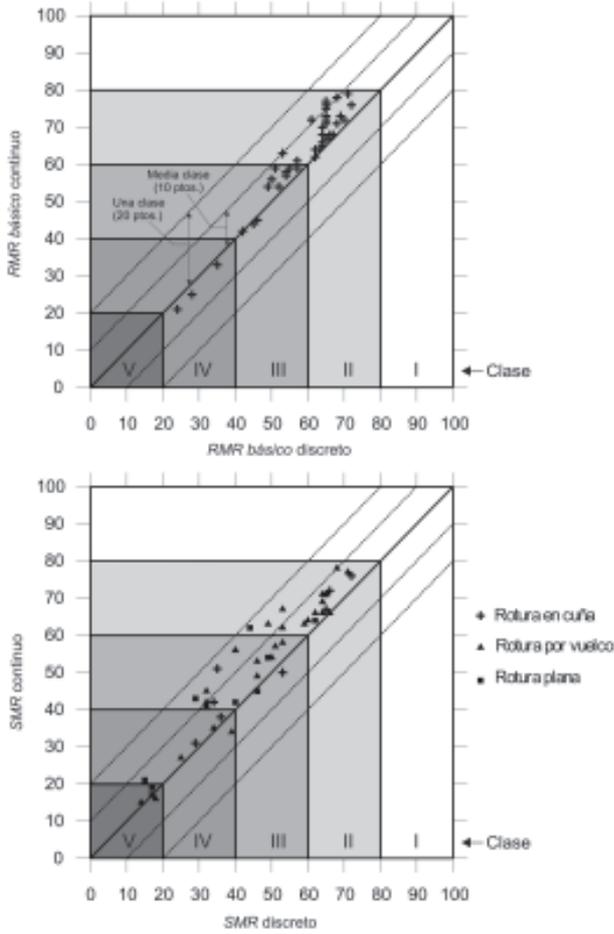


Figura 2.- Comparación entre los índices geomecánicos discretos y continuos.

Por último se han analizado las diferencias que se producían en función de la clase mecánica del talud (Tabla IV). Las máximas diferencias medias y absolutas se observan en la clase III y IV con los valores 8 ± 6 . Los mejores grados de coincidencia corresponden con la clase geomecánica V con

diferencias medias y absolutas inferiores siempre a una subclase.

Aplicación del SMR continuo a los taludes rocosos de una cantera abandonada mediante un SIG

La zona objeto de estudio se encuentra situada en la Sierra de Fontcalent, perteneciente al conjunto de las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Figura 3). La litología del frente, al igual que las propiedades geotécnicas, es muy homogénea.

La roca matriz está constituida básicamente por biomicríticas tableadas de color gris, gris-oscuro a negro, con finos niveles centimétricos de margas gris-verdosas nodulosas. Presenta una resistencia a compresión simple (obtenida mediante análisis esclerométrico) siempre superior a 195 MPa. El RQD es siempre mayor del 95%. La estratificación constituye la única familia sistemática de discontinuidades presentes en el macizo, con orientación prácticamente invariable a lo largo del mismo. Sin embargo, el buzamiento de los estratos presenta variaciones considerables según la zona del frente como consecuencia del plegamiento que afecta a los materiales. En el corte geológico de la figura 3 se observa esta variación del buzamiento.

Las discontinuidades (estratificación) presentan una persistencia siempre superior a 20 m, un espaciado medio que oscila entre 26 y 57 cm y una apertura variable entre 1 y 22 cm. Su superficie es ligeramente rugosa, presentando un estado de meteorización moderado-ligero y estando rellenas de un material blando.

Durante la toma de datos del macizo rocoso y de las discontinuidades se procedió a sectorizar el frente (Fig. 4) atendiendo a criterios fundamentalmente litológicos y geométricos (orientación y pendiente de los taludes). Estos sectores son considerados como entidades poligonales con propiedades geotécnicas y

	s/ TIPO DE ROTURA			s/ CLASE ^(*)				
	W	T	P	I	II	III	IV	V
Nº casos (n)	8	27	10	0	12	14	14	5
Diferencia media $ \overline{SMR_D - SMR_C} $	5 ± 5	7 ± 5	5 ± 6	-	5 ± 3	7 ± 5	8 ± 6	2 ± 2
Diferencia máxima $ \overline{SMR_D - SMR_C} _{MAX}$	17	16	18	-	10	18	17	6
Diferencia mínima $ \overline{SMR_D - SMR_C} _{MIN}$	2	0	0	-	0	1	2	0

W: Rotura en cuña; T: Rotura por vuelco; P: Rotura planar. (*) Según el SMR discreto. En aquellos casos en los que el índice geomecánico marca el límite entre dos clases se ha considerado la más desfavorable (la más baja).

Tabla IV.- Diferencias absolutas entre el SMR discreto (SMR_D) y continuo (SMR_C) y según el tipo de rotura y la clase geomecánica del talud.

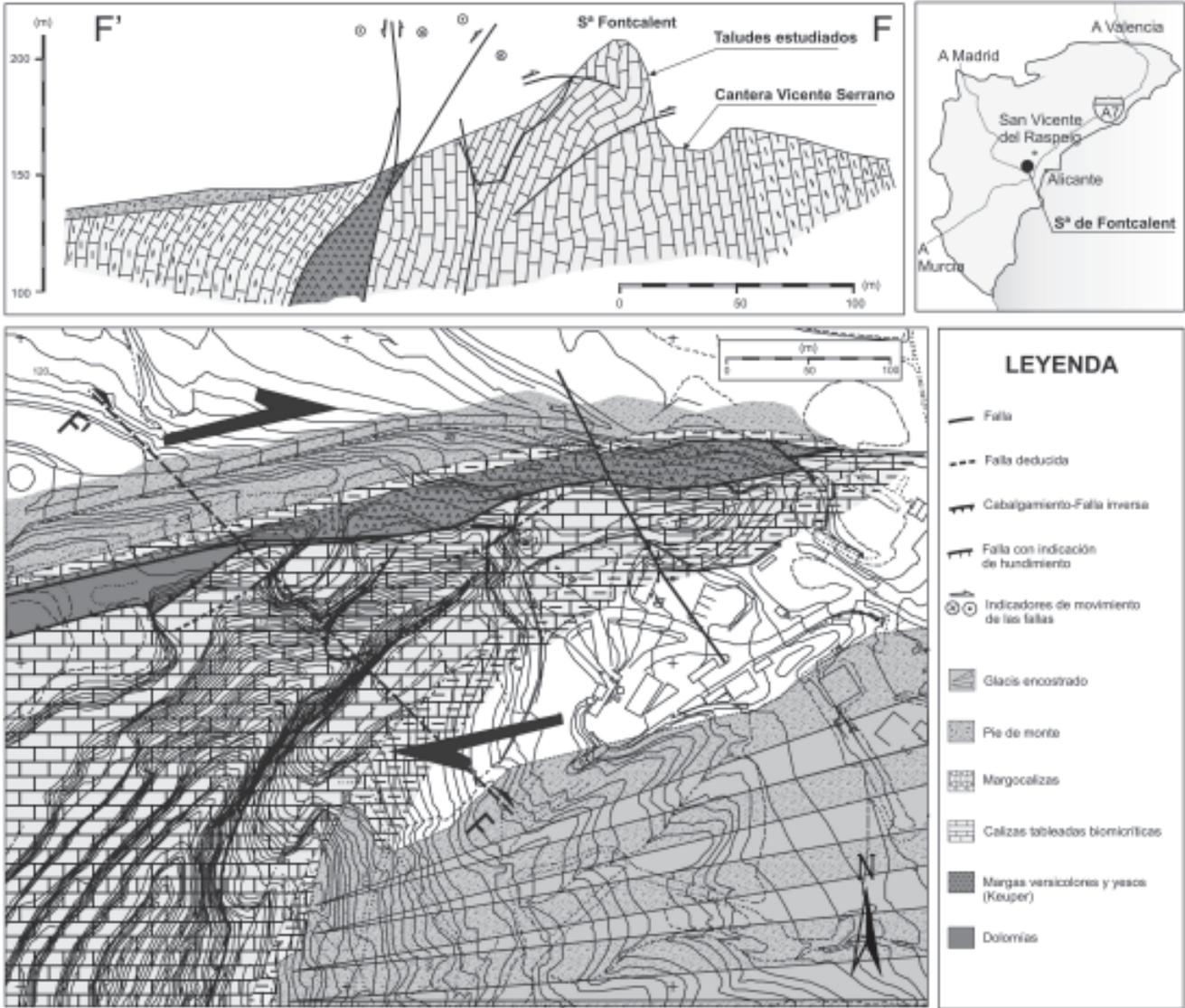


Figura 3.- Situación y geología de la zona de estudio (adaptado de Cano, (2003)).

geomecánicas homogéneas (resistencia a compresión simple, espaciado, abertura, relleno, etc.). El buzamiento y orientación de las discontinuidades también se consideran invariables dentro de cada uno de estos polígonos. Sin embargo, el buzamiento y orientación de los taludes son entidades puntuales extraídas a partir de un MDT a escala 1:2.000 (Fig. 4) y, por lo tanto, diferentes para cada punto del frente de coordenadas (x,y).

El SIG empleado es el Idrisi Kilimanjaro, que, a través de sus herramientas de operación espacial, ha permitido determinar el valor del SMR discreto y del SMR continuo para cada píxel (x,y) del frente estudiado según la metodología planteada por Cano *et al.* (2004). Los resultados obtenidos son los mostrados en la figura 5.

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos mediante el Sistema de Información Geográfica haciendo uso del SMR continuo y discreto han sido representados en las

figuras 6 y 7. En ellas puede observarse que el SMR continuo proporciona valores superiores a los obtenidos mediante el índice SMR discreto tal y como se señaló previamente. Igualmente observamos que para un mismo valor de SMR discreto, las funciones propuestas facilitan distintos valores de SMR continuo.

Para entender mejor este último aspecto imaginemos un talud con problemas de rotura plana en el que $A = 29^\circ$, $B = 21^\circ$ y $C = -1^\circ$. En este caso el

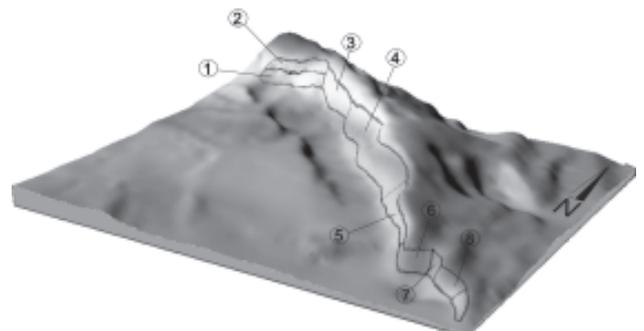


Figura 4.- Perspectiva de la zona de estudio con indicación de los sectores considerados.

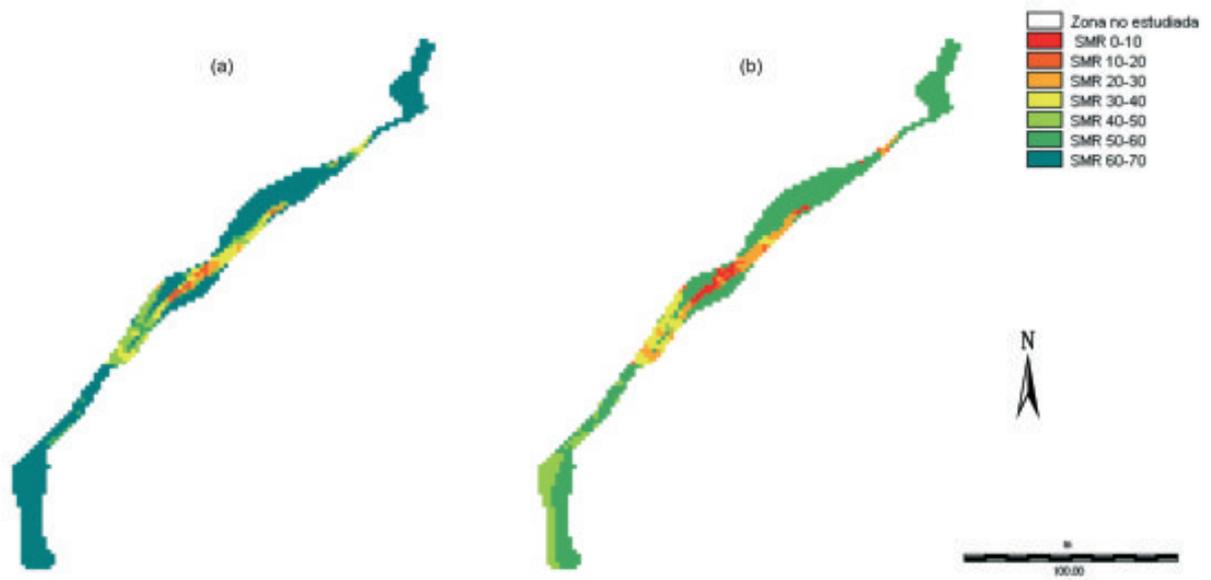


Figura 5.- Valores del SMR obtenidos mediante el SIG, aplicando: a) funciones continuas y b) la clasificación discreta.

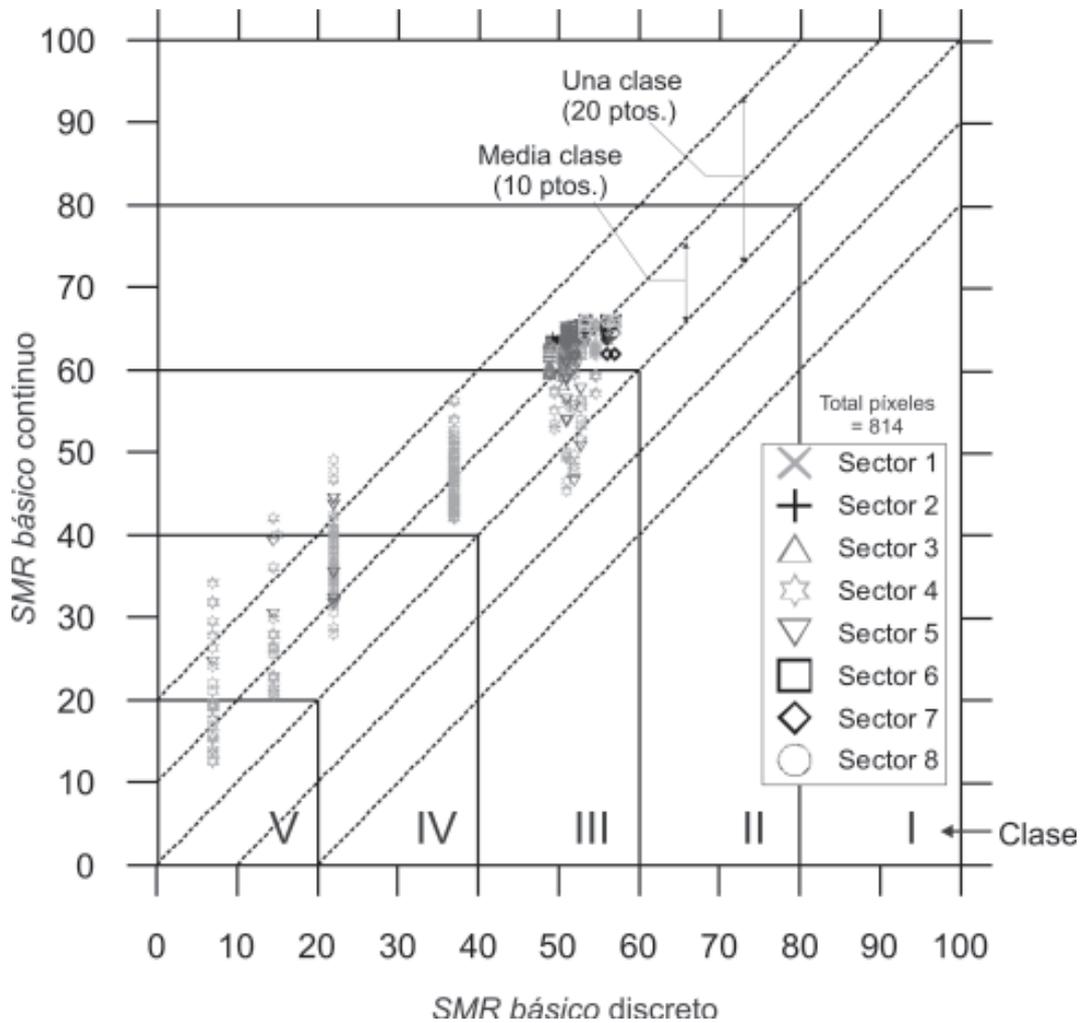


Figura 6.- Comparación de los valores del SMR continuo y discreto obtenidos mediante el SIG.

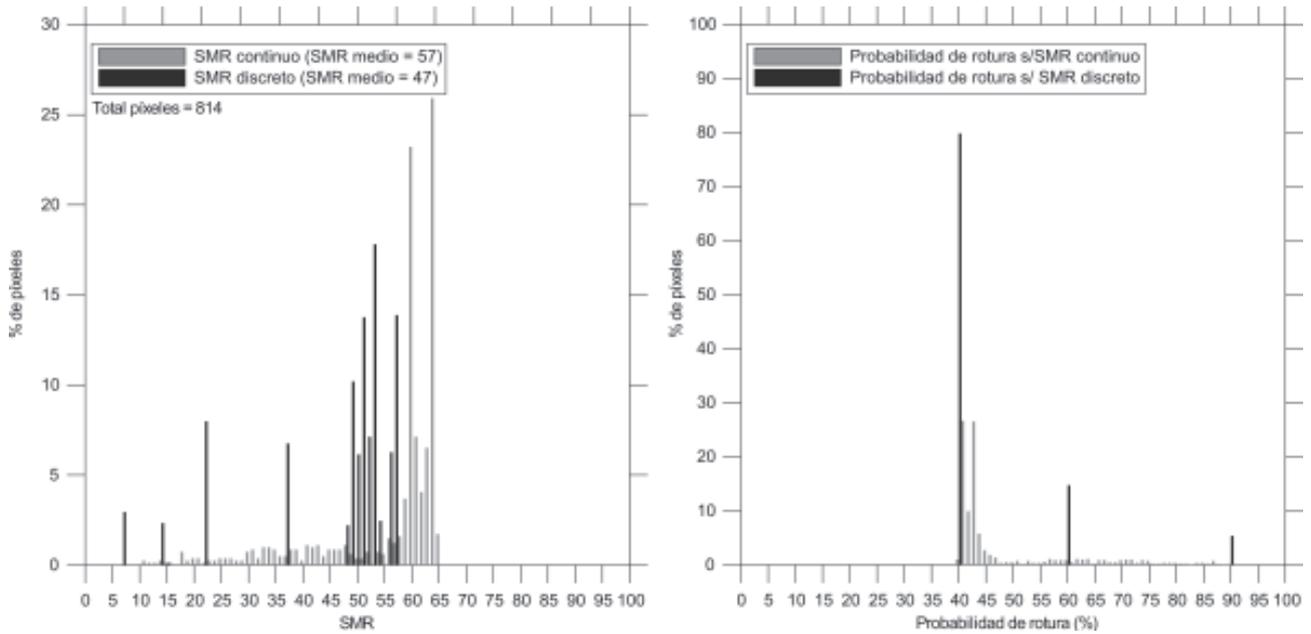


Figura 7.- Distribución de valores de SMR y de probabilidad de rotura obtenidos aplicando las funciones continuas y discretas.

producto $F_1 \times F_2 \times F_3$ tomará el valor de -8 puntos para la clasificación discreta original y -2 puntos para las funciones continuas. Si ahora consideramos un talud con el mismo RMR básico y excavado en idénticas condiciones que el anterior, pero con una geometría diferente ($A = 21^\circ$, $B = 29^\circ$ y $C = -9^\circ$) el producto $F_1 \times F_2 \times F_3$ valdrá de nuevo -8 puntos al aplicar la clasificación discreta y -7 puntos para la continua. Es decir, el SMR discreto asignaría la misma calidad geomecánica a ambos taludes, mientras que el SMR continuo genera un cambio de -5 puntos (media subclase). Esto nos indica que las funciones continuas son sensibles a los pequeños cambios en la geometría del talud y en las propiedades del macizo rocoso, permitiendo discriminar entre taludes que presentan la misma calidad geomecánica según los índices discretos originales.

Otra observación interesante es la gran gama de valores que toma el SMR continuo y discreto para el

sector 4 y 5 (Fig. 6). Esto se debe a que en estas áreas la topografía es muy irregular presentando continuos cambios de orientación y pendiente, que hacen que cambien los valores del SMR.

La figura 7 muestra la distribución de frecuencias de los valores del SMR continuo y discreto en la zona estudiada así como de probabilidades de rotura del talud. Como puede observarse existe un desplazamiento relativo entre ambas debido a la, ya comentada, sobrevaloración del índice final. Asimismo cabe observar que el SMR continuo y la probabilidad de rotura obtenida mediante la expresión (9) presentan una mayor gama de valores que los proporcionados por la clasificación discreta original. Este hecho parece más coherente con el comportamiento de propiedades y fenómenos naturales como lo son las propiedades geomecánicas.

Si comparamos los valores del SMR discreto obtenidos con el SIG (SMR_{SIG} discreto) y los

		SECTOR								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
SMR _{SIG}	DISCRETO	Medio	53 (IIIa)	49 (IIIb)	51 (IIIa)	41 (IIIb)	50 (IIIb)	55 (IIIa)	54 (IIIa)	55 (IIIa)
		Min.-Máx.	51-53 (IIIa)	49-49 (IIIb)	49-53 (IIIa-b)	7-57 (IIIa-Vb)	7-57 (IIIa-Vb)	53-57 (IIIa)	53-57 (IIIa)	53-57 (IIIa)
	CONTINUO	Medio	64 (IIa)	64 (IIa)	61 (IIa)	52 (IIIa)	59 (IIIa)	66 (IIb)	64 (IIa)	66 (IIb)
		Min.-Máx.	63-64 (IIa)	63-64 (IIa)	0-64 (IIa-Vb)	13-66 (IIb-Va)	2-66 (IIb-Vb)	65-66 (IIb)	62-66 (IIb-a)	64-66 (IIb-a)
SMR convencional		52 (IIIa)	49 (IIIb)	51 (IIIa)	63 (IIa)	45 (IIIb)	53 (IIIa)	40 (IVa)	53 (IIIa)	

Tabla V.- Tabla comparativa de los resultados obtenidos mediante el SIG (para funciones continuas y discretas) y el método convencional.

calculados para el mismo frente mediante la metodología convencional (SMR convencional), la cual asigna un solo valor de SMR para todo el talud o sector, observamos (Tabla V) que en general existe una excelente coincidencia entre los valores medios discretos calculados mediante el SIG y los calculados por medio de la metodología convencional, dado que los sectores en que ha sido dividido el frente presentan características geométricas (pendiente y orientación) bastante constantes, lo que hace fácil la determinación de una orientación y una pendiente media para calcular el SMR convencional.

Conclusiones

Las clasificaciones geomecánicas constituyen una herramienta de gran utilidad para la caracterización de macizos rocosos. Entre ellas, el Slope Mass Rating (SMR) es una de las más empleadas a nivel internacional para la caracterización de taludes en roca dada su sencillez y la exhaustiva definición cuantitativa que hace de los factores de corrección.

En el presente trabajo se han expuesto una serie de expresiones que permiten obtener el SMR a través de funciones continuas, lo que limita la intervención del juicio personal a la hora de estimar los parámetros que intervienen en su cálculo. Las principales novedades introducidas respecto a las funciones propuestas por Tomás *et al.* (2004) son la posibilidad de determinar el factor F_3 (muy influyente en el resultado final) de forma continua y poder expresar el término dependiente del estado hidráulico de las discontinuidades (r_G) en función de la relación de presiones intersticiales (r_u).

Una de las principales ventajas del SMR continuo es que no presenta ambigüedad alguna en su cálculo, permitiendo discriminar la calidad de taludes con propiedades geomecánicas y geometría similares y, por lo tanto, que ostentan el mismo índice SMR discreto. Asimismo, las funciones continuas propuestas para el cálculo del SMR facilitan la creación de rutinas informáticas que determinen el valor del SMR para los parámetros de entrada establecidos. En contrapartida, está la dificultad que presentan de ser aplicadas durante la toma de datos frente a la clasificación discreta que se determina a partir de tablas, resultando más útil y cómoda de usar en el campo.

Las funciones continuas propuestas proporcionan valores del SMR, en general, superiores a los obtenidos a través de la clasificación discreta original (del orden de una subclase, 10 puntos). Este hecho compensa en cierto modo la valoración pesimista que genera el SMR original.

Los SIG proporcionan una potente herramienta para la gestión y procesado de toda la información geomecánica y geotécnica de taludes, permitiendo calcular, mediante análisis espaciales, índices geomecánicos como el SMR con gran facilidad y sencillez. En el caso que nos ocupa se ha determinado el SMR del frente de una cantera mediante las

funciones continuas propuestas y la discreta original, lo que ha permitido comparar un gran número de resultados a la vez que demostrar la utilidad de la metodología empleada. El análisis comparativo llevado a cabo con los resultados obtenidos mediante el SIG ha vuelto a dejar patente que el SMR continuo proporciona valores superiores a los obtenidos mediante la clasificación discreta original.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos CTIDIB/2002/177 y GV04B/556 y los grupos de investigación GRUPOS04/085 (Generalitat Valenciana) y VIGROB2005031 (Universidad de Alicante).

Referencias bibliográficas

- Anbalagan, R., Sharma, Sanjeev y Raghuvanshi, T.K. (1992): Rock Mass Stability Evaluation Using Modified SMR Approach. En: *6th National Symposium on Rock Mechanics*. Proceedings, 1: 258-268.
- Bieniawski, Z.T. (1989): *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, Chichester, 251 p.
- Cano, M. (2003): *Consideraciones acerca de la sierra de Fontcalent y sus canteras. Actuaciones puntuales en su restauración*. TFC Ingeniería Geológica, Universidad de Alicante, 197 p + 4 planos.
- Cano, M., Tomás, R., Delgado, J., Cañaveras, J.C., Estévez, A. y Pina, J.A. (2004): Aplicación del SMR para la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos mediante un Sistema de Información Geográfica. En: *Territorio y Medioambiente. Métodos cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica* (C. Conesa y J.B. Martínez Eds.). Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección de la Asociación de Geógrafos Españoles y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia, Murcia, 55-68.
- Gögl, M.L., Ronzani, G., Strada, C. y Zamai, V. (1998): Caratterizzazione geomecánica ed applicazione di tecniche GIS ai fini della valutazione di stabilità di pareti rocciose. *Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica*, 75: 65-74.
- Hack, H.R.G.K. (1998): *Slope Stability Probability Classification*. ITC Delf Publication, Enschede, Netherlands, 273 p.
- Haines, A. y Terbrugge, P.J. (1991): Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification system. En: *7th Congress on Rock Mechanics, ISRM*. Proceedings, 1: 887-892.
- Irigaray, C., Fernández, T. y Chacón, J. (2001): Evaluación de la estabilidad en taludes rocoso. Evaluación del SMR mediante un SIG. En: *V Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*. Comunicaciones, 1: 417-428.
- Irigaray, C., Fernández, T. y Chacón, J. (2003): Preliminary Rock-Slope-Susceptibility assesment using GIS and the SMR classification. *Natural Hazard*, 30: 309-324.
- Lindsay, P., Campbell, R.N., Fergusson, D.A., Gillard, G.R. y Moore, T.A. (2001): Slope stability probability classification, Waikato Coal Measures, New Zealand. *International Journal of Coal Geology*, 45: 127-145.
- Priest, S.D. y Hudson, J.A. (1981): Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and*

- Geomechanics Abstracts*, 18: 183-197.
- Romana, M. (1985): New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. En: *International Symposium on the role of rock mechanics, ISRM*. Proceedings: 49-53.
- Romana, M. (1993): *A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating*. En: *Comprehensive Rock Engineering* (J.A. Hudson, Ed.). Pergamon Press, Oxford, 45 p.
- Romana, M. (1997): El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. En: *IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Comunicaciones, 3: 955-1011.
- Romana, M., Serón, J.B. y Montalar, E. (2001): La clasificación geomecánica SMR: Aplicación experiencias y validación. En: *V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Comunicaciones, 1: 393-404.
- Romana, M., Serón, J.B. y Montalar, E. (2003): SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. En: *International Symposium on the role of rock mechanics, ISRM*. Proceedings: 1-4.
- Romana, M. (2005): Nota sobre la valoración del 5º parámetro (condiciones hidrogeológicas) del RMR básico en función de r_u (razón de presiones intersticiales). En: *VI Simposio de taludes y laderas inestables*. Comunicaciones, 1: 221-226.
- Romana, M., Serón, J.B., Jordá, L. y Vélez, M.I. (2005): La clasificación geomecánica SMR para taludes: Estado actual, aplicación y experiencia internacional. En: *VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Comunicaciones, 1: 239-250.
- Selby, M.J. (1980): A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with test from Antarctica and New Zeland. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 24: 31-51.
- Sen, Z., Sadagah, H. (2003): Modified rock mass classification system by continuous rating. *Engineering Geology*, 67: 269-280.
- Serón, J.B., Romana, M., Montalar, E., Cruzado, J.M. y Denia, J.L. (2001): Aplicación de la clasificación geomecánica SMR: mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). En: *V Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*. Comunicaciones, 1: 405-416.
- Shuk, T. (1994): Key elements and applications of the natural slope methodology (NSM) with some emphasis on slope stability aspects. En: *4th South American Congress on Rock Mechanics, ISRM*. Proceedings: 955-960.
- Singh, B. y Goel, R.K. (1999): *Rock Mass Classification. A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier, Amsterdam, 267 p.
- Tomás, R., Cuenca, A. y Delgado, J. (2004): Modificación del Slope Mass Rating (SMR) a través de funciones continuas. *Ingeniería Civil*, 134: 17-24.

Apéndice

- RMR básico*: Basic Rock Mass Rating.
- RMR*: Rock Mass Rating.
- SMR*: Slope Mass Rating.
- r_{RQD} : Factor dependiente del *RQD*.
- r_G : Factor dependiente de la resistencia a compresión simple o resistencia a carga puntual.
- r_X : Factor dependiente del espaciado medio entre discontinuidades.
- r_j : Factor dependiente del estado de las discontinuidades.
- r_G : Factor dependiente de las condiciones hidráulicas del macizo.
- r_u : relación de presiones intersticiales.
- RQD*: Rock Quality Designation, (%).
- \bar{X} : Espaciado medio entre discontinuidades, (m).
- λ : número de discontinuidades por unidad de longitud, (discontinuidades/m).
- σ_p : Resistencia a carga puntual, (MPa).
- σ_c : Resistencia a compresión simple, (MPa).
- G: Caudal, (litros /10 metros/1 min).
- β_j : Buzamiento de la discontinuidad, (°).
- β_i : Buzamiento de la intersección de dos discontinuidades (inmersión o *plunge*), (°).
- β_s : Buzamiento del talud, (°).
- α_j : Dirección de buzamiento de la discontinuidad, (°).
- α_i : Dirección de *plunge* de la intersección de dos discontinuidades, (°).
- α_s : Dirección de buzamiento del talud, (°).
- A: Ángulo entre la dirección de buzamiento del talud (α_s) y la dirección de buzamiento de la discontinuidad (α_j) o la dirección de *plunge* (α_i) de la intersección de dos discontinuidades, (°).
- B: Buzamiento de la discontinuidad (β_j) o de la línea de intersección de las discontinuidades (β_i), (°).
- C: Relación entre buzamientos de las discontinuidades (β_j o β_i) y del talud (β_s), (°).

Manuscrito recibido el 19 de septiembre de 2005
Aceptado el manuscrito revisado el 1 de marzo de 2006