

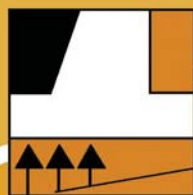
BOLETIN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MECANICA DEL SUELO E INGENIERIA GEOTECNICA

EFFECTO DEL DESGASTE DE LA ROCA Y DE LA VELOCIDAD DE ENSAYO EN LA DETERMINACIÓN MEDIANTE TILT TEST DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN BÁSICO DE JUNTAS DE EN ROCA. Pérez-Rey, I.; Delleró, H.; Alejano, L.R.; Grande, E.; Muñoz, A.; Arzú, J.

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE TESTIGOS DE ROCA. Perucho, A.; Crisóstomo, J.

REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA SMR. Tomás; R.; Romana, M.; Serón, J.B.

SIMULACIÓN DE ENSAYOS TRIAXIALES DE GRANITO MEDIANTE EL CÓDIGO PFC. Castro, U.; Alejano, L.R.; Mas, D. ; Arzúa, J.



Nº 190 JULIO-OCTUBRE 2017

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA

SEDE: Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
Calle de Alfonso XII, 3 - 28014 - España

JUNTA DIRECTIVA

PRESIDENTE:	Fernando Pardo de Santayana Carrillo
VICEPRESIDENTE:	Antonio Soriano Peña
VOCAL- SECRETARIO:	Herminia Cano Linares
VOCALES:	César Sagaseta Millán Carlos Oteo Mazo José María Rodríguez Ortiz José María Echave Rasines Antonio Gens Solé (Vicepresidente de ISSMGE) Claudio Olalla Marañón Gustavo Armijo Palacios Leoncio Prieto Tercero Goran Vukotic Enrique Dapena García

VOCALES REPRESENTANTES:	José Estaire Geep (Soc. Esp. Mec. Rocas) José Luis García de la Oliva (Lab. Geotecnia) Manuel Romana (Col. Ing. Caminos) Peter Tanner (Inst. Eduardo Torroja) Pedro Ramírez Oyanguren (Col. Ing. de Minas) Pilar Rodríguez Monteverde (Consejo Sup. de Arquitectos) Representante Inst. Ing. Civiles
--------------------------------	--

El Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica publica trimestralmente sus artículos de contenido geotécnico, conjuntamente con la Revista "Ingeniería Civil", del CEDEX.

NOTA: Las opiniones emitidas en los artículos del "Boletín" son responsabilidad exclusiva de sus autores y no tienen por qué coincidir, necesariamente, con las de la Sociedad, o las de sus órganos de gobierno, ni con las del propio Comité de Redacción del Boletín.

BOLETÍN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA

Nº 190 JULIO-OCTUBRE 2017.

COMITÉ DE REDACCIÓN

PRESIDENTE	Carlos Oteo Mazo
SECRETARIO	Juan Enrique Dapena García
VOCALES	Fernando Muzás Labad
	Vicente Cuéllar Mirasol
	José María Rodríguez Ortiz
	Alcibíades Serrano González

SUMARIO

EFECTO DEL DESGASTE DE LA ROCA Y DE LA VELOCIDAD DE ENSAYO EN LA DETERMINACIÓN MEDIANTE TILT TEST DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN BÁSICO DE JUNTAS DE ROCA. <i>Ignacio Pérez-Rey, Hatim Delleró, Leandro R. Alejano, Elisa Grande, Andrea Muñoz, Javier Arzú.....</i>	5
ESTUDIO ESTADÍSTICO DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE TESTIGOS DE ROCA. <i>Áurea Perucho Martínez, Juanives Crisóstomo Masetto.....</i>	15
REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA SMR. <i>Roberto Tomás, Manuel Romana, José Bernardo Serón.....</i>	25
SIMULACIÓN DE ENSAYOS TRIAXIALES DE GRANITO MEDIANTE EL CÓDIGO PFC <i>Uxía Castro Filgueira, Leandro R. Alejano, Diego Mas Ivars, Javier Arzúa.....</i>	33

Revisión del estado actual de la clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR)

Review of the Current Status of the Geomechanic Classification Slope Mass Rating (SMR)

Roberto Tomás^{1*}, Manuel Romana², José Bernardo Serón³

Resumen

El Slope Mass Rating (SMR) es una clasificación geomecánica empleada para la caracterización de taludes rocosos, que se calcula corrigiendo el RMR básico mediante una serie de factores dependientes de: (a) el paralelismo entre los rumbos de las discontinuidades y del talud (F_1); (b) el buzamiento de las discontinuidades (F_2); (c) la relación de buzamientos entre las discontinuidades y el talud (F_3); y (d) el método de excavación empleado (F_4). Desde su publicación en el año 1985 hasta la actualidad, esta clasificación ha gozado de un uso muy extendido en todo el mundo. Además, numerosos autores han llevado a cabo modificaciones o variaciones en la clasificación original para su adaptación a diversas situaciones particulares. Asimismo, ha sido aplicada a partir de proyección estereográfica o Sistemas de Información Geográfica, e incorporada a la normativa técnica de diversos países. En la actualidad, el desarrollo de las tecnologías emergentes ha propiciado la aparición de programas informáticos para el cálculo del SMR, así como el desarrollo de metodologías basadas en el empleo de nubes de puntos 3D para la caracterización de taludes mediante el uso de este índice. En el presente trabajo se lleva a cabo una revisión del uso del SMR a lo largo de los últimos 30 años, centrandó nuestra atención en las modificaciones o adaptaciones más importantes de la clasificación original, su uso en el campo de la mecánica de rocas y las tendencias futuras en el empleo de esta clasificación geomecánica.

Palabras clave: SMR, RMR, mecánica de rocas, clasificaciones geomecánicas, slope.

Abstract

Slope Mass Rating (SMR) is a geomechanic classification used for the characterization of rocky slopes, which is calculated adjusting the basic RMR through several factors depending on: (a) the parallelism between the discontinuity and slope directions (F_1); (b) the dip of the discontinuities (F_2); (c) the relationship between the dip of the discontinuities and the slope (F_3); and (d), the excavation method (F_4). From the publication of the SMR in 1985 up to date, this classification has been widely used worldwide. Moreover, several authors have either modified or changed the original classification in order to adapt it to different particular situations. Furthermore, it has been applied by using stereographic projection or Geographical Information Systems, having been incorporated to the technical standards of several countries. Nowadays, the development of emerging technologies has favoured the creation of software for the calculation of SMR, as well as the development of new methodologies based on the use of 3D point clouds to the characterization of the slopes using this index. In this work, a review of the current state of the SMR over the last thirty years is presented, focusing our attention on the most important modifications and adaptations of the original classification, its use in the rock mechanics field, and future trends in the use of this geomechanic classification.

Keywords: SMR, RMR, rock mechanics, geomechanic classification.

1. INTRODUCCIÓN

Las clasificaciones geomecánicas constituyen un sistema de comunicación universal entre sus usuarios, 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 Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski, 1989), Rock Mass Strength (RMS, Selby, 1980), Slope Mass Rating (SMR, Romana, 1985), Slope Rock Mass Rating (SRMR, Robertson, 1988) y Slope Stability Probability Classification (SSPC, Hack, 1998). De entre todas las anteriores, el SMR goza de una gran aceptación desde su aparición (Romana *et al.*, 2005) debido a su sencillez de aplicación y 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. En el presente trabajo se revisan las experiencias acumuladas a lo largo de los últimos treinta años en la aplicación del Slope Mass Rating, así como las

* Autor de contacto: roberto.tomas@ua.es

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos e Ingeniero Geólogo. Profesor Titular de Universidad Dpto. de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior de Alicante, Universidad de Alicante, Apdo. Correos 99, 03080 Alicante, España.

² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático emérito de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Valencia.

³ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Titular de Escuela Universitaria. Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Valencia.

modificaciones, adaptaciones o variantes que se han desarrollado en torno a ella.

2. LA CLASIFICACIÓN SMR ORIGINAL

El Slope Mass Rating (SMR) es una clasificación geomecánica desarrollado por Romana (1985) para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos. El SMR se obtiene corrigiendo el RMR básico (RMR_b) de Bieniawski (1989) a través de una serie de factores dependientes de la geometría del talud y de las discontinuidades y añadiendo otro factor dependiente del método de excavación mediante la expresión:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad [1]$$

F_1 depende del paralelismo (A en la tabla 1) entre las direcciones de buzamiento de las discontinuidades (α_j) y el talud (α_s) y varía entre 0,15 y 1,0. Alternativamente, Romana (1993) propuso la siguiente función continua para el cálculo de F_1 .

$$F_1 = (1 - \text{sen}|A|)^2 \quad [2]$$

F_2 se refiere al buzamiento de la junta (B), siendo β_j en roturas planas. Su valor varía entre 0,15 y 1,0. En cierto modo, este parámetro considera la resistencia a esfuerzo cortante de la discontinuidad. Al igual que para el parámetro F_1 , Romana (1993) propuso la siguiente función continua alternativa a los valores discretos:

$$F_2 = \tan^2 B \quad [3]$$

F_3 (tabla 1) depende de la relación entre los buzamientos del talud (β_s) y las discontinuidades (β_j). Este

parámetro mantienen los valores propuestos originalmente por Bieniawski (desde 0 hasta -60 puntos) que son siempre negativos y expresan la posibilidad de que las discontinuidades afloren en la superficie del talud (Romana, 1993) para roturas planas. Para el caso de rotura por vuelco no se considera que puedan darse situaciones “Desfavorables” o “Muy desfavorables” dado que este mecanismo de rotura generalmente no produce rotura súbitas e incluso, en ocasiones, los taludes pueden ser estables pese a verse afectado por este modo de rotura.

F_4 es un factor de ajuste por el método de excavación empleado (tabla 2). Incluye talud natural, precorte, voladura suave, voladura normal o excavación mecánica y voladura deficiente. Este factor considera que los taludes naturales son más estables debido al equilibrio natural alcanzado a lo largo del tiempo. El precorte y las voladuras suaves (recorte) bien ejecutados incrementan la estabilidad de los taludes en media clase (i.e. +10 puntos) y +8 puntos, respectivamente. Las voladuras normales y las excavación mecánicas, generalmente realizadas mediante ripado acompañado o no de prevoladuras poco cuidadas, no tienen influencia alguna en la estabilidad del talud definitivo, por lo que el factor F_4 adopta el valor de 0 puntos.

La tabla 3 muestra las diferentes clases de estabilidad definidas por Romana (1985). La experiencia acumulada ha demostrado que los taludes con un SMR inferior a 20 son inestables, no habiéndose identificado taludes con valores de SMR inferiores a 10. Romana (1985) propuso una guía de recomendaciones generales para el sostenimiento de taludes rocosos en función del valor del SMR basada en las observaciones realizadas en numerosos taludes inventariados. Estas recomendaciones proporcionan una primera aproximación de gran utilidad durante las fases preliminares de un proyecto o diseño. Obviamente, la elección definitiva de las medidas correctoras de un talud rocoso queda fuera del alcance de una clasificación geomecánica.

Tabla 1. Parámetros de corrección para el SMR (Romana, 1985)

Tipo de rotura		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	A = $ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T						
P/T	F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	B = β_j	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P						
T	F_2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
			1,00			
P	C = $\beta_j - \beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
T						
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60

ROTURA: P plana; T vuelco. DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO: α_j discontinuidad; α_s talud. BUZAMIENTO: β_j discontinuidad; β_s talud.

Tabla 2. Valores correspondientes al factor F_4 (Romana, 1985)

Método de excavación	F_4
Talud natural	+15
Precorte	+10
Voladura suave	+8
Voladura normal o excavación mecánica	0
Voladura deficiente	-8

3. ADAPTACIONES DEL SMR

Desde la presentación del SMR en el año 1985, la clasificación no ha sufrido cambios sustanciales, excepto el ajuste de los factores F_1 y F_2 a través de las ecuaciones (2) y (3) y la subdivisión de las clases en subclases de 10 puntos. Sin embargo, numerosos autores han adaptado el SMR a sus necesidades, modificando la metodología o los parámetros de corrección. En los siguientes subapartados se describen las aplicaciones y adaptaciones más importantes desarrolladas durante los treinta últimos años.

3.1. Funciones continuas

El SMR original se calcula asignando una puntuación específica a cada parámetro de la clasificación (i.e. F_1 a F_3) en función del valor adoptado por la variable que controla el parámetro considerado (i.e. paralelismo entre las direcciones de buzamiento del talud y de la discontinuidad, buzamiento de la discontinuidad y relación de buzamientos). Sin embargo, el carácter discreto de la clasificación puede generar variaciones mayores en los parámetros debido a pequeños cambios en el valor de la variable, y por ende en los valores de SMR y en la calidad del macizo rocoso. Si además tenemos en cuenta que

algunos de los parámetros considerados en las clasificaciones geomecánicas presentan una alta variabilidad e incertidumbre en su determinación, se entiende que el uso de funciones discretas pueda condicionar el índice de calidad final del talud.

Para reducir el mencionado efecto, Tomás *et al.* (2007) propusieron una serie de funciones continuas asintóticas (figura 1) para los factores de corrección F_1 (ec. (4)), F_2 (ec. (5) para rotura plana y cuña) y F_3 (ec. (6) para roturas plana y cuña y ec. (7) para vuelco), que proporcionan diferencias absolutas máximas frente a las funciones discretas originales inferiores a 7 puntos, reduciendo así significativamente interpretaciones subjetivas en la asignación de la

Tabla 3. Descripción de las clases del SMR (Romana, 1985)

Clases →	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 planos o circular	Plana o grandes cuñas	Plana a lo largo de algunas juntas o algunas cuñas	Algunas roturas en bloque	Sin roturas
Probabilidad de rotura	0,9	0,6	0,4	0,2	0

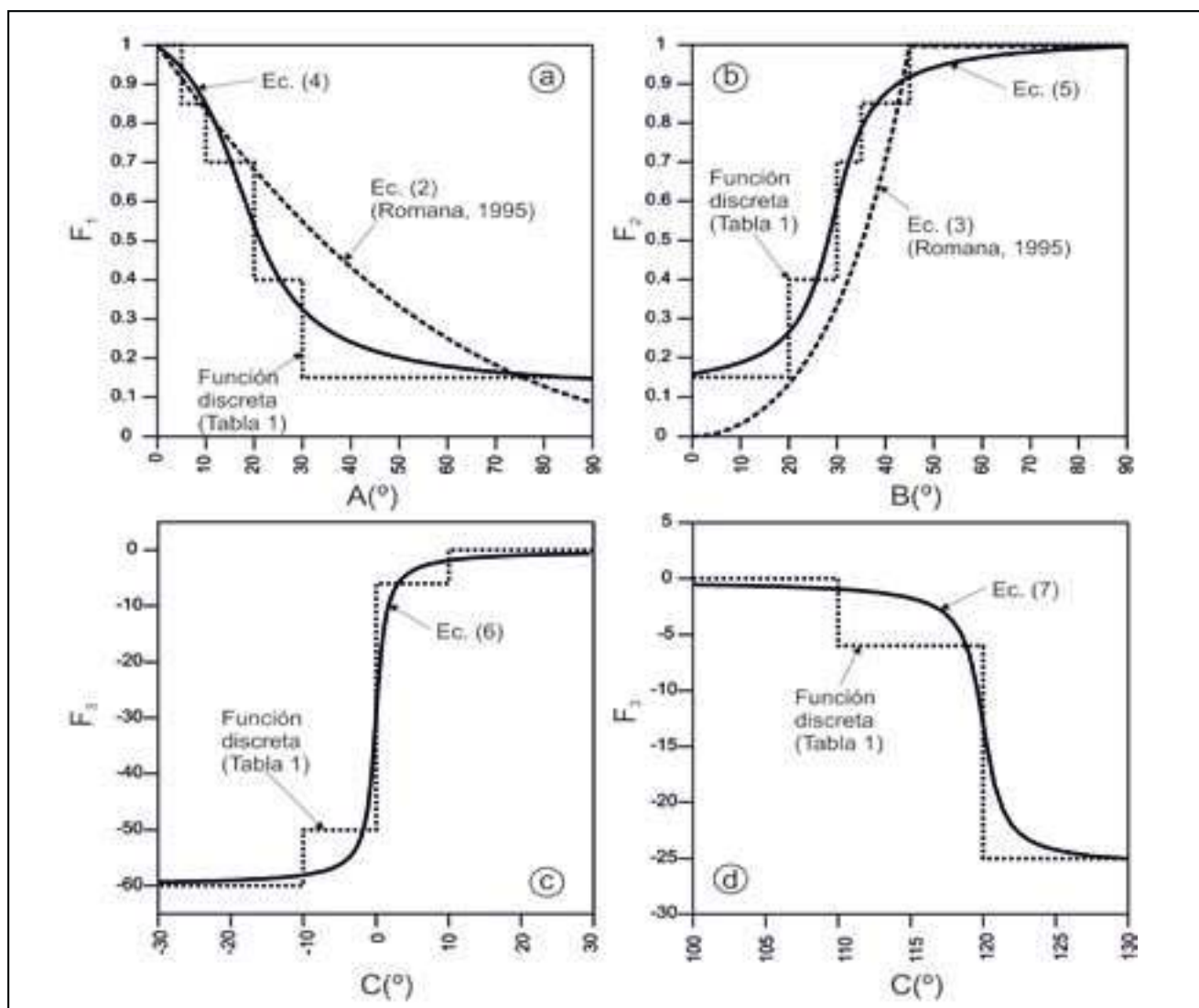


Figura 1. Funciones discretas (Romana, 1985) y continuas (Romana, 1993; Tomás *et al.*, 2007) para el cálculo de los parámetros a) F_1 ; b) F_2 ; c) F_3 para rotura plana; y d) F_3 para rotura por vuelco.

puntuación a valores próximos a los extremos de los intervalos de las funciones discretas:

$$F_1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{500} \operatorname{atan} \left(\frac{1}{10} (|A| - 17) \right) \quad [4]$$

$$F_2 = \frac{9}{16} + \frac{1}{195} \operatorname{atan} \left(\frac{17}{100} B - 5 \right) \quad [5]$$

$$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \operatorname{atan} C \quad [6]$$

$$F_3 = -13 - \frac{1}{7} \operatorname{atan} (C - 120) \quad [7]$$

Estas funciones son especialmente útiles para ser implementadas en rutinas informáticas para el cálculo del SMR (e.g. Riquelme *et al.*, 2014a) y en Sistemas de Información Geográfica (e.g. Filipello *et al.* 2010). Roghanchi *et al.* (2013) también propusieron diagramas continuos obtenidos a partir de análisis difuso (fuzzy) para la determinación de los factores F_1 , F_2 and F_3 . El inconveniente de estas funciones continuas es que carecen de expresión matemática que permita su cálculo automático.

3.2. Chinese Slope Mass Rating

El Slope Mass Rating fue adaptado para su aplicación en taludes de gran altura, con motivo de la construcción de grandes centrales hidroeléctricas por parte del Instituto Chino de Recursos Hidráulicos y Energía Hidroeléctrica, a través de las siguientes expresiones (CSMR; Chen, 1995):

$$\text{CSMR} = E \times \text{RMR}_b + \lambda \times (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad [8]$$

$$E = 0,43 + 0,57 \times \left(\frac{80}{H} \right) \quad [9]$$

Donde H es la altura del talud (en m) y λ considera las condiciones de la discontinuidad en el talud variando entre 0,6 y 1,0.

3.3. Highway Slope Mass Rating

Posteriormente, Runqiu y Yuchuan (2005) adaptaron el Chinese Slope Mass Rating (CSMR) para su uso en taludes de carretera, denominando a la nueva clasificación como Highway Slope Mass Rating (HSMR).

Esta nueva clasificación modificó las expresiones del Chinese Slope Mass Rating e introdujo un nuevo parámetro por la existencia de diferentes litologías en el talud (Coefficient of the lithology combination, η). La expresión propuesta por estos autores para el cálculo del HSMR fue la siguiente:

$$\text{HSMR} = E \times \text{RMR}_b + \eta \times \lambda \times (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad [10]$$

Estos mismos autores propusieron una clasificación de los taludes en función del valor del HSMR calculado, evaluando su estabilidad, forma de rotura y métodos de estabilización.

3.4. Procedimiento gráfico

Tomás *et al.* (2012a) han desarrollado un método gráfico basado en la representación estereográfica de los polos de las discontinuidades y el talud para la obtención de los parámetros de originales corrección del SMR (F_1 , F_2 y F_3). En este método, los parámetros son calculados representando los polos de las discontinuidades y del talud en falsilla estereográfica y superponiéndola a los diagramas propuestos (figura 2).

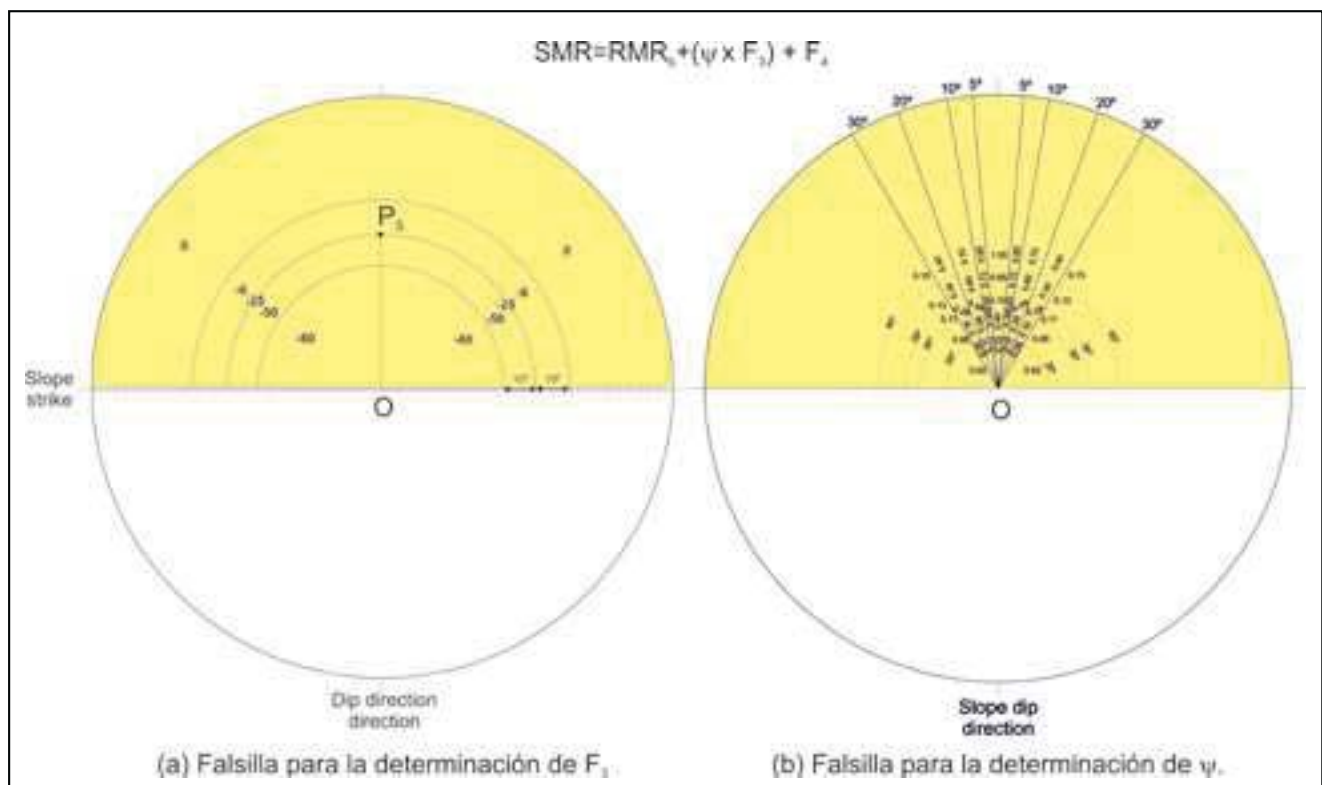


Figura 2. Diagramas estereográficos propuestos por Tomás *et al.* (2012a) para el cálculo de los parámetros de corrección del SMR (Romana, 1985) en rotura plana: a) F_1 ; y b) $\psi = F_1 \times F_2$. Obsérvese que el gráfico (a) ha de ser elaborado ad hoc para cada buzamiento de talud, representando su polo (P_1) para definir las diferentes zonas de puntuación según se muestra en la figura.

Para la obtención de los parámetros es necesario girar la falsilla que contiene la representación de los polos de las discontinuidades y del talud sobre el diagrama propuesto correspondiente hasta hacer coincidir las direcciones de buzamiento del talud y del diagrama. Una vez superpuestos, los parámetros de corrección $\psi = F_1 \times F_2$ (que varía entre 0 y 1 y expresa el porcentaje de F_3 movilizado) y F_3 son calculados directamente del diagrama propuesto a partir de la posición de los polos de las discontinuidades (para rotura plana o por vuelco). A partir de estos parámetros y del factor de corrección por el método de excavación del talud tenemos que:

$$SMR = RMR_b + (\psi \times F_3) + F_4 \quad [11]$$

Las principales aplicaciones de este método son (Tomás *et al.*, 2012a): a) determinación rápida de los parámetros de corrección del SMR en aquellos casos en los que el buzamiento del talud es constante (e.g. trincheras de obras lineales, excavaciones mineras, etc.). b) la posibilidad de trabajar con todas las medidas de orientación de las discontinuidades realizadas en el campo para determinar distribución de valores de los factores de corrección para seleccionar el más adecuado a criterio del técnico (e.g. valores más bajos –mínimo-, valores más abundantes –moda-, etc.).

3.5. Otras aplicaciones y herramientas

Además de las adaptaciones del SMR mostradas en los apartados precedentes, existen nuevos usos y herramientas que se describen en este apartado.

Un novedoso método consiste en la aplicación de la teoría difusa (fuzzy) para la aplicación del SMR. Daftaribeshli

et al. (2011) aplicaron la teoría difusa a la clasificación SMR para evaluar la estabilidad de taludes de minas a cielo abierto. Su propuesta, que proporcionó resultados satisfactorios en el caso que estudiaron, la denominaron Fuzzy Slope Mass Rating (FSMR).

Anbalagan *et al.* (1992a) llevaron a cabo una adaptación del SMR para el caso de rotura por cuña. Estos autores propusieron calcular las relaciones geométricas entre la discontinuidad y el talud necesarias para determinar el SMR a través de la línea de intersección de los dos planos de la cuña.

Perri (1994) introdujo el efecto de la anisotropía del macizo rocoso por medio de un factor (f) variable entre 0 y 1 que multiplica al segundo término de la expresión (1). f se calcula a partir de los parámetros de corte de la discontinuidad (c' y ϕ') y de la roca (c y ϕ).

Rahim *et al.* (2009) propusieron el Modified Slope Mass Rating (M-SMR) para su uso en formaciones heterogéneas compuestas por alternancias de diferentes litologías. Según los autores, esta nueva clasificación supone una modificación tanto en términos de cálculo de parámetros como de métodos de determinación.

Otra importante aplicación del SMR (original o modificado) consiste en su uso como parámetro de susceptibilidad (e.g. Anbalagan, 1992b).

Budetta (2004) incorporó el SMR en la evaluación de los ampliamente empleados sistemas de clasificación de peligrosidad de caídas de roca (Rock Hazards Rating System, RHRS) para el establecimiento del riesgo de caída de rocas en carreteras. Adicionalmente, el SMR ha sido ampliamente empleado para la elaboración de cartografías de susceptibilidad de taludes rocosos mediante Sistemas de Información Geográfica (SMR), desarrollando nuevos módulos y empleando distintas metodologías (e.g. Filipello *et al.*, 2010; Yilmaz *et al.*, 2012).

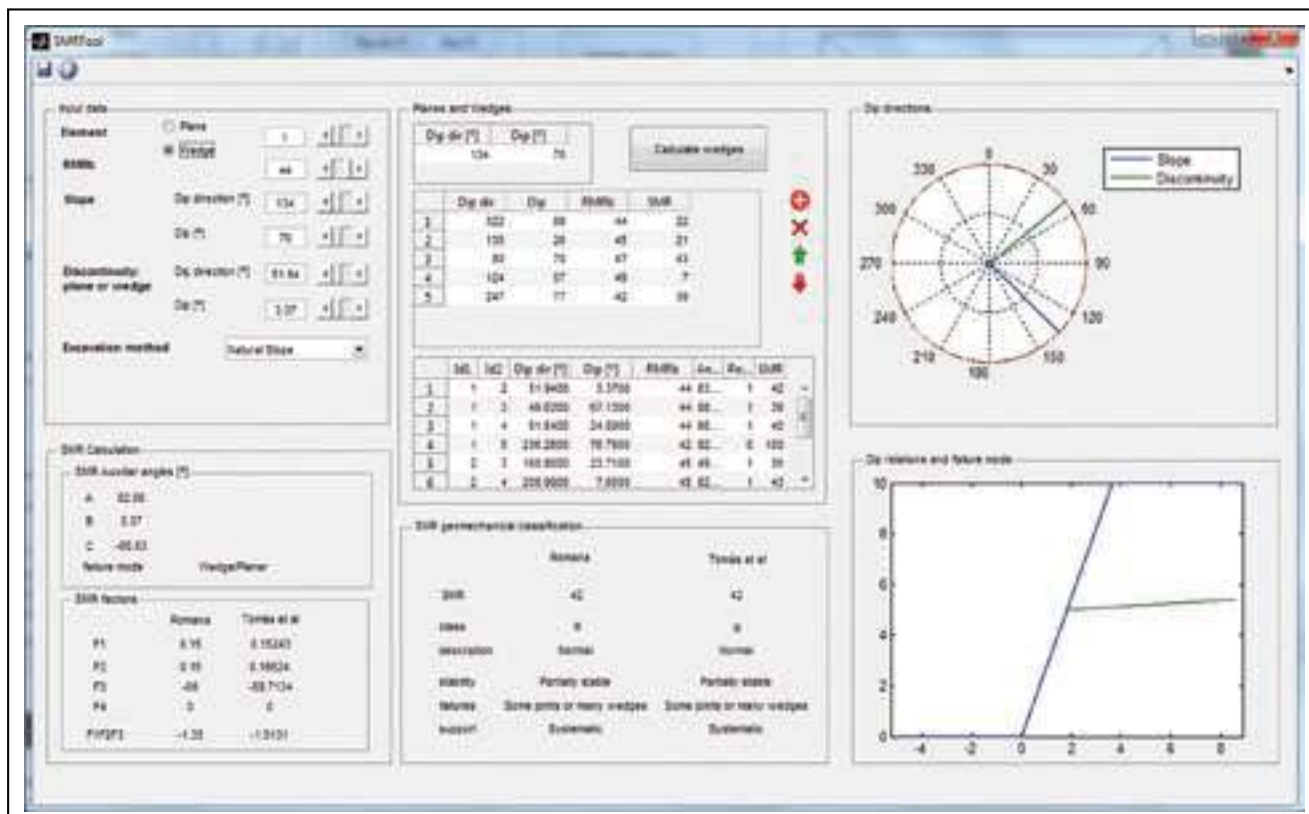


Figura 3. Captura de pantalla de la aplicación libre SMRTool para el cálculo del índice SMR.

También se han desarrollado aplicaciones informáticas para el cálculo rápido del SMR (figura 3). Riquelme *et al.* (2014a) han publicado en abierto una calculadora programada tanto en MS Excel como en Matlab para el cálculo de los coeficientes F_1 , F_2 y F_3 a partir de los vectores de buzamiento del talud y de la discontinuidad (dirección de buzamiento y buzamiento) o de la línea de intersección en el caso de roturas por cuña, llamada SMRTool. Esta rutina calcula automáticamente los ángulos auxiliares A, B y C (ver tabla 1) así como el tipo de rotura (plana, cuña o vuelco) compatible con la geometría del caso estudiado y proporciona los valores de SMR originales (Romana, 1985) y continuos (Tomás *et al.*, 2007) incluyendo también la descripción de la clase, la estabilidad, los modos de rotura y las medidas recomendadas por Romana (1993).

4. UTILIZACIÓN DEL SMR

El SMR ha sido ampliamente empleado durante los últimos treinta años de la siguiente manera:

- como una clasificación geomecánica para clasificar los taludes rocosos;
- considerando F_1 , F_2 , F_3 como parámetro para cuantificar el efecto de las discontinuidades en la estabilidad de los taludes;
- como un complemento de otros métodos;
- como un método preliminar y complementario de trabajo.

La amplia aplicación del SMR ha permitido identificar a su vez algunas cuestiones: 1) la clasificación SMR es ligeramente conservadora; 2) los valores extremos de F_3 propuestos por Bieniawski (i.e. -50 y -60 puntos) plantean algunas dificultades en la práctica; 3) los modos de fallo derivados del SMR parecen darse en la práctica; 4) el método de excavación influye de forma

considerable en la estabilidad de los taludes, lo que justifica su uso; 5) la clasificación de taludes con bermas presenta dificultades prácticas; y 6) la clasificación SMR no tiene en cuenta la altura del talud que tiene gran relevancia en su estabilidad.

Tomás *et al.* (2012b) llevó a cabo una exploración, análisis y visualización de las relaciones existentes entre los diferentes parámetros que controlan el SMR (i.e. RMR_b , el paralelismo entre la discontinuidad y el talud (A), el buzamiento de la discontinuidad (β_j) y el buzamiento del talud (β_s)) a través del método Worlds within Worlds identificando numerosos casos en los que el SMR es insensible a las condiciones geométricas del talud para un amplio número de posibles combinaciones discontinuidad-talud, para las cuales $F_1 \times F_2 \times F_3$ es aproximadamente igual a 0 y por tanto el SMR puede calcularse sin gran error corrigiendo el RMR_b únicamente con el factor de excavación, como $RMR_b + F_4$. Estos casos particulares son: a) taludes afectados por rotura plana con β_s menor que β_j , valores de A (paralelismo) mayor que 30° , o valores de β_j inferiores a 20° para los cuales el SMR puede ser calculado con errores máximos de nueve puntos considerando únicamente el RMR básico y el factor F_4 . b) taludes afectados por rotura por vuelco en los que el valor de A es superior a 30° o la relación $\beta_j + \beta_s$ es menor o igual a 120° , en los cuales el SMR puede ser calculado con errores máximos de seis puntos considerando únicamente el RMR básico y el factor F_4 .

5. EXPERIENCIAS DE USO

Desde la presentación del SMR en el año 1985, es muy común encontrar bibliografía de mecánica de rocas o de estabilidad de taludes rocosos de carácter técnico, científico y divulgativo en el que se dedica alguno de sus capítulos o secciones íntegramente al SMR (e.g. Hudson and Harrison, 1997; Singh y Göel, 1999). La figura 4 muestra los resultados de un análisis bibliométrico en el que se representa la

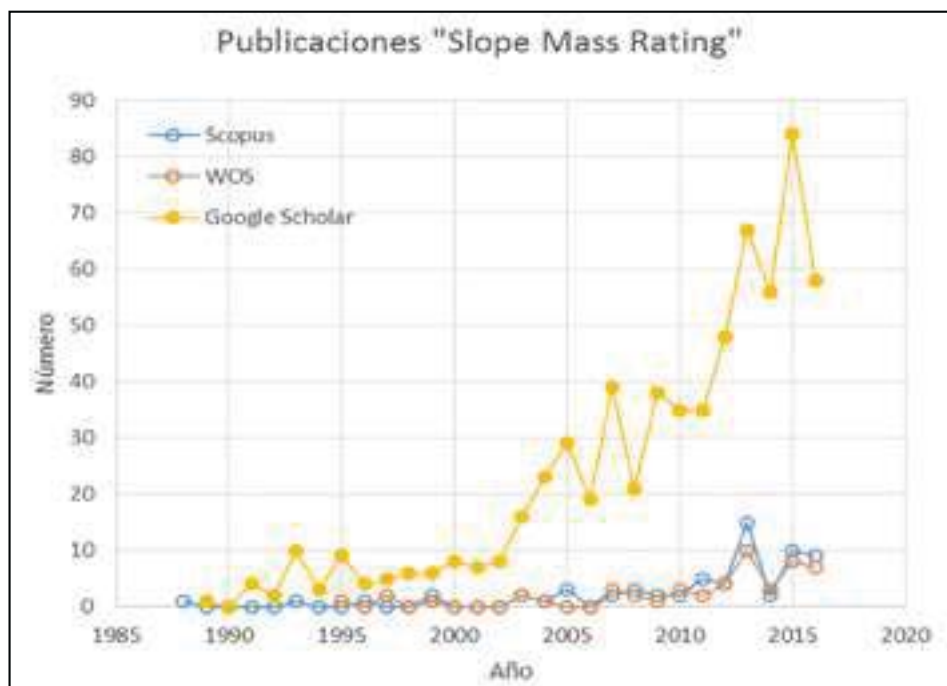


Figura 4. Número de publicaciones en las bases de datos WOS, Scopus y Google Scholar que contienen el término "Slope Mass Rating" entre 1987 y 2016. Análisis realizado en octubre de 2016.

evolución de las referencias bibliográficas anuales que contienen el término “Slope Mass Rating” en las bases de datos de la Web of Science (WOS), Scopus y Google Académico. Como puede apreciarse, el número de citas es ascendente, mostrando una tendencia aparentemente exponencial, principalmente en la base de datos de Google Académico. El número de citas en la WOS y en Scopus es menor, aunque la tendencia también es creciente. La WOS y Scopus son bases de datos que presentan un claro carácter científico. Sin embargo, Google Scholar aglutina también referencias de, por ejemplo, tesis doctorales, libros, informes científicos, etc. Por tanto, la lectura que podría hacerse en relación a la diferencia en el número total de citas observado entre las bases de datos es que el SMR tiene más carácter práctico y profesional que científico, lo que hace que aparezca en un mayor número de referencias de Google Scholar.

El SMR ha sido incorporado en los programas docentes o de formación de ingeniería civil, Geológica o Minera de un amplio número de instituciones (e.g. España, India, Taiwán, etc.).

Por otro lado, el SMR ha sido adoptado en sí mismo, modificado o como un índice de calidad en las normativas técnicas de diversos países (e.g. India, Serbia, Italia, etc.).

Actualmente, existen evidencias de su uso y aplicación en más de 50 países de los cinco continentes, siendo su uso muy especialmente intensivo en Asia (e.g. China e India).

La figura 5 muestra un mapa con los países en los que se han encontrado evidencias de uso del SMR o de alguna de sus adaptaciones/modificaciones, además de aquellos en los que el SMR ha sido también incorporado a la normativa técnica del país.

6. TENDENCIAS FUTURAS

Las nuevas técnicas fotogramétricas (e.g. Structure from Motion, SfM) y láser escáner (Light Detection and Ranging, LiDAR) permiten la adquisición de forma masiva de nubes de puntos 3D (con coordenadas X, Y y Z) de taludes que pueden ser utilizadas para la obtención automática o semiautomática de parámetros del macizo rocoso como

la orientación de las discontinuidades y del talud (dirección y buzamiento) y otros parámetros como el espaciado, RQD, persistencia, etc. (e.g. Lato *et al.* 2009; Gigli and Casagli, 2011; Riquelme *et al.*, 2014b; 2015).

Por lo tanto, la información derivada de estas técnicas puede ser integrada en el proceso de cálculo del SMR de los taludes rocosos de forma automática o semiautomática (e.g. Filipello *et al.*, 2010; Riquelme *et al.*, 2016) agilizando y sistematizando considerablemente el proceso de toma de datos y posterior aplicación de las clasificaciones geomecánicas.

7. COMENTARIOS FINALES

Desde la presentación del Slope Mass Rating en el año 1985 en el congreso de la ISRM celebrado en Zacatecas (México), éste ha sido profusamente y exitosamente usado.

La definición detallada de los factores de corrección es probablemente una de las ventajas principales que presenta el SMR frente a otras clasificaciones más complejas de aplicar o que consideran parámetros de difícil o costosa determinación.

Actualmente, existen evidencias de su uso en los cinco continentes y en un elevado número de países, en algunos de los cuales incluso se ha incorporado el SMR a la normativa técnica. También han proliferado numerosas modificaciones o adaptaciones del SMR para diferentes propósitos y aplicaciones.

La adaptación del SMR para su aplicación en taludes excavados en macizos rocosos heterogéneos o isótropos, la modificación de las funciones discretas originales del SMR a través de funciones continuas y el método gráfico son algunas de las adaptaciones llevadas a cabo.

El SMR ha sido también empleado para la elaboración de cartografía de calidad geomecánica de taludes en amplias zonas a través de Sistemas de Información Geográfica.

Algunas metodologías desarrolladas incluso hacen uso del SMR para cuantificar la susceptibilidad a la caída de rocas.

En el futuro, los datos estructurales derivados de sensores remotos como la fotogrametría y el LiDAR permitirán

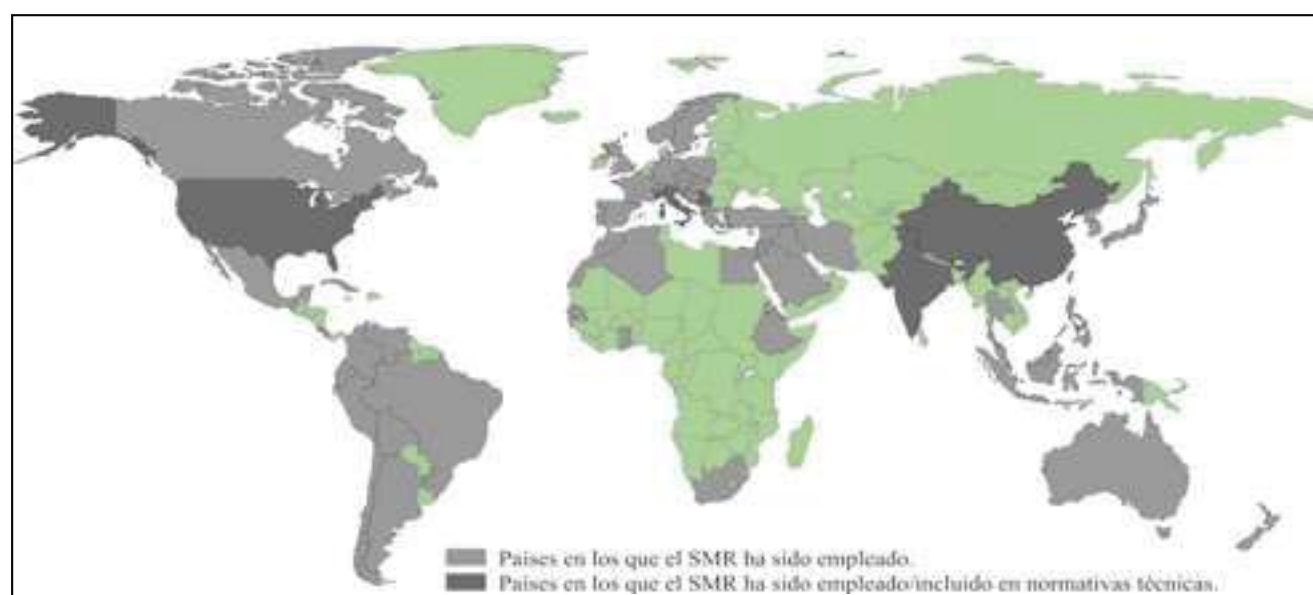


Figura 5. Países en los que se han encontrado evidencias de uso de la clasificación SMR.

calcular automática o semiautomáticamente los parámetros de corrección del SMR de un talud o incluso generar cartografías de distribución del SMR en un determinado talud o área.

Por lo tanto, puede concluirse que el amplio uso del SMR durante los últimos treinta años ha permitido la acumulación de una enorme experiencia que ha permitido a su vez confirmar la utilidad del Slope Mass Rating para el estudio de taludes rocosos y la aceptación y reconocimiento de este índice por la comunidad científica y técnica internacional.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Anbalagan, R. (1992b). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32, pp. 269-277.
- Anbalagan, R., Sharma, S. y Raghuvanshi, T.K. (1992a). Rock Mass Stability Evaluation Using Modified SMR Approach. *Proceedings of the 6th National Symposium on Rock Mechanics*, pp. 258-268.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Chichester: Wiley.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 71-81.
- Chen, Z. (1995). Recent developments in slope Stability Analysis. Keynote lecture. En Fujii, T. (ed.), *Proc. 8th Int. Cong. Rock Mech.*, vol. 3, pp. 1041-1048.
- Daftaribesheli, A., Ataei, M., y Sereshki, F. (2011). Assessment of rock slope stability using the Fuzzy Slope Mass Rating (FSMR) system. *Applied Soft Computing*, 11(8): pp. 4465-4473.
- Filipello, A., Giuliani A., y Mandrone, G. (2010). Rock slopes failure susceptibility analysis: from remote sensing measurements to geographic information system raster modules. *American Journal of Environmental Sciences*, 6, pp. 489-494.
- Gigli, G., y Casagli, N. (2011). Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2): pp. 187-198.
- Hack, R., Price, D., y Rengers, N.A. (2003). A new approach to rock slope stability - a probability classification (SSPC). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(2): pp. 167-184.
- Hudson, J.A., y Harrison, J.P. (1997). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Amsterdam: Pergamon Press.
- Lato, M., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., y Harrap, R. (2009). Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 46, pp. 194-199.
- Perri, G. (1994). Una extensión de la metodología de Bieniawski-Romana para estimar la estabilidad de taludes en rocas. *I Simposio Panamericano de Deslizamientos de tierra. Guayaquil - Ecuador, 01 al 05 Agosto de 1994*.
- Rahim, I.A., Tahir, S.H., y Musta, B. (2009). Modified Slope Mass Rating (M-SMR) system: A classification scheme of interbedded Crocker Formation in Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia. *Proceeding of the 8th Seminar on Science and Technology 2009 (S&T2009)*, 18-19 December 2009, Shangri-La's Rasa Ria Resort, Pantai Dalit, Tuaran.
- Riquelme, A., Tomás, R., y Abellán A. (2014a). SMRTool beta. A calculator for determining Slope Mass Rating (SMR). Universidad de Alicante. Página web: <http://personal.ua.es/en/ariquelme/smrtool.html> (07/05/2014). License: Creative Commons BY-NC-SA.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., y Jaboyedoff, M. (2014b). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, pp. 38-52.
- Riquelme, A., Abellán, A., y Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195, pp. 185-195.
- Riquelme, A., Tomás, R., y Abellán, A. (2016). Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, pp. 165-176.
- Robertson A.M. (1988). Estimating weak rock strength. En Sastry, K.V.S. (ed.), *Proceedings of the SME Annual meeting, Society of Mining Engineering, Phoenix*, pp. 1-5.
- Roghanchi, P., Kallu, R., y Thareja, R. (2013). A New Expression of Three Adjustment Factors of Slope Mass Rating Classification. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 6, pp. 404-410.
- Romana M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. En *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*. International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53.
- Romana, M. (1993). SMR classification. *Proc 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen, 16-20 September 1991 V2, P955-960*. Rotterdam: A A Balkema.
- Runqiu, H., y Yuchuan, S. (2005). Classification of Rock Mass Rating Stability in Mountain Highway Slope. *Geoline 2005, Lyon, France, 23-25 May*.
- Selby, M.J. (1980). A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with test from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 24, pp. 31-51.
- Singh, B., y Göel, R.K. (1999). *Rock Mass Classification. A Practical Approach in Civil Engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- Tomás, R., Delgado, J., y Serón, J.B. (2007). Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, pp. 1062-1069.
- Tomás, R., Cuenca, A., Cano, M., y García-Barba, J. (2012a). A graphical approach for slope mass rating (SMR). *Engineering Geology*, 124, pp. 67-76.
- Tomás, R., Valdés-Abellán, J., Tenza-Abril, A.J., y Cano, M. (2012b). New insight into the slope mass rating geomechanical classification through four-dimensional visualization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, pp. 64-69.
- Yilmaz, I., Marschalko, M., Yildirim, M., Dereli, E., y Bednarik, M. (2012). GIS-based kinematic slope instability and slope mass rating (SMR) maps: application to a railway route in Sivas (Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, pp. 351-357.