

PROYECTO

MACASTAB

Interreg



MAC 2014-2020
Cooperación Territorial

Jornadas de presentación del proyecto MACASTAB:
Estabilidad de laderas y taludes en regiones volcánicas

PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA APLICADA A TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS VOLCÁNICOS

Javier González-Gallego*

Mauro Muñiz Menéndez*

** Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)*

INDICE

1. Introducción
2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas
3. Tipos de taludes en rocas volcánicas
4. Selección de parámetros en macizos volcánicos
5. Ficha de toma de datos de taludes
6. 1ª Campaña de toma de datos
7. Análisis estadístico de los datos obtenidos
8. Propuesta de clasificación geomecánica para taludes en rocas volcánicas
9. Conclusiones y líneas futuras de trabajo

1. Introducción

Singularidad de los macizos volcánicos

GETCAN-011

Este trabajo son sólo los primeros pasos hacia una clasificación geomecánica para rocas volcánicas

Se ha avanzado mucho en la última década en el comportamiento geotécnico de los materiales volcánicos pero ha sido fundamentalmente en la roca matriz

2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas

¿qué son las clasificaciones geomecánicas?

- Cuantifican de forma sencilla parámetros característicos del macizo rocoso para obtener un **índice de calidad del macizo**.
- Mediante observación directa y sencillos ensayos de campo se obtiene una idea del comportamiento que puede tener el macizo en una situación determinada.

Clasificaciones más utilizadas

RMR (Bieniawski, 1973)

Sistema Q (Barton et al., 1974)

GSI (Hoek et al., 1995)



2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas

¿qué parámetros se evalúan?

RMR

1. Resistencia de la roca intacta
2. RQD
3. Espaciamiento de las discontinuidades
4. Características de las discontinuidades
5. Condiciones hidrogeológicas



Sistema Q

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

GSI

Sistema visual que relaciona **Grado de fracturación** del macizo con **características de las discontinuidades**

Parámetro	Clasificación		
	Q (%)	GSI (%)	RMR ₈₉ (%)
Resistencia a compresión simple	0	0	15
Tamaño de bloque	33	50	40
Características de las discontinuidades	30	50	30
Presencia de agua	17	0	15
Estado tensional del macizo	20	0	0

2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas

¿qué dificultades tiene su aplicación en rocas volcánicas?

Características distintivas de las rocas volcánicas

- Extensión lateral muy variable
- Heterogeneidad litológica y estructural
- Presencia de huecos y cavidades
- Discontinuidades con características muy diferentes
- Materiales de baja densidad



2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas

¿qué dificultades tiene su aplicación en rocas volcánicas?

Características distintivas de las rocas volcánicas

- Extensión lateral muy variable
- Heterogeneidad litológica y estructural
- Presencia de huecos y cavidades
- Discontinuidades con características muy diferentes
- Materiales de baja densidad



2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas

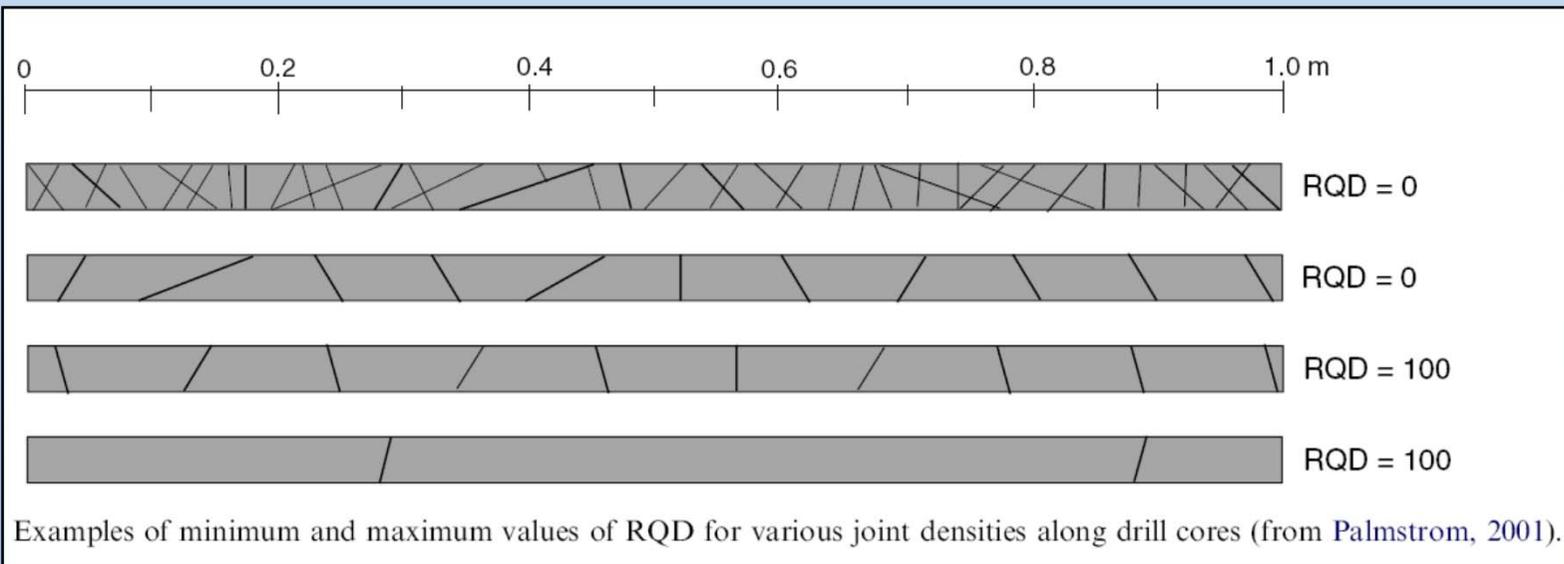
¿qué dificultades tiene su aplicación en rocas volcánicas?

Características distintivas de las rocas volcánicas

- Extensión lateral muy variable
- Heterogeneidad litológica y estructural
- Presencia de huecos y cavidades
- Discontinuidades con características muy diferentes
- Materiales de baja densidad



!Atención al RQDi



2. Clasificaciones geomecánicas y su aplicación en rocas volcánicas

Ejemplos de dificultad de aplicación

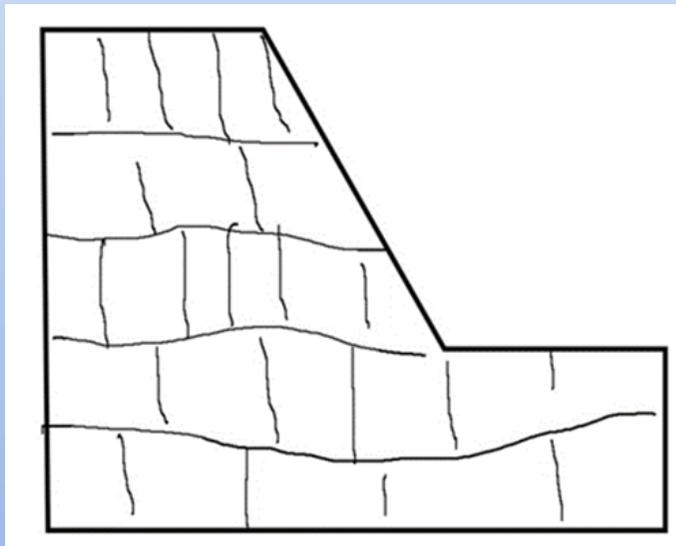


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

Talud Tipo I: Coladas

Talud excavado en materiales lávicos (unidades geotécnicas II, III y IV), homogéneos, sin presencia de escorias o materiales piroclásticos.

La estabilidad de estos taludes está principalmente condicionada por las discontinuidades presentes en las coladas y su disposición espacial. La presencia de huecos y zonas alteradas también condicionan su estabilidad.

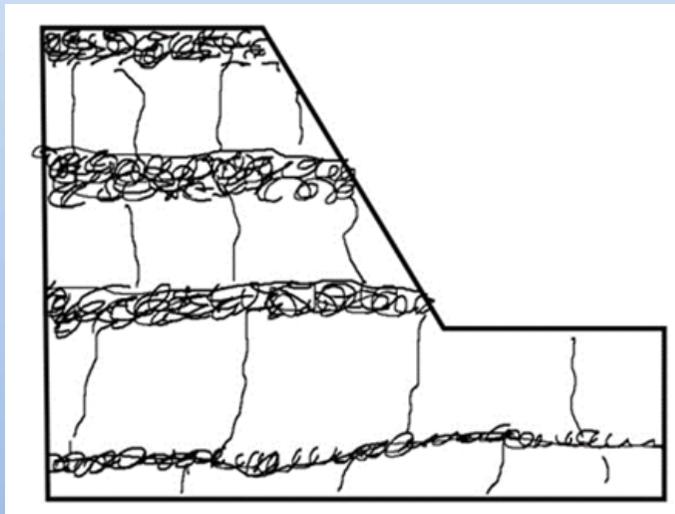


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

Talud Tipo II: Coladas + Escorias

Talud compuesto por coladas (unidades geotécnicas II, II y IV) entre las que se sitúan niveles de escoria separando las diferentes coladas. Es seguramente el tipo de talud más común en macizos rocosos volcánicos.

En estos taludes, la patología más común es la caída de bloques de coladas que quedan descalzados al formarse huecos en las zonas escoriáceas más sensibles a la erosión y alteración.



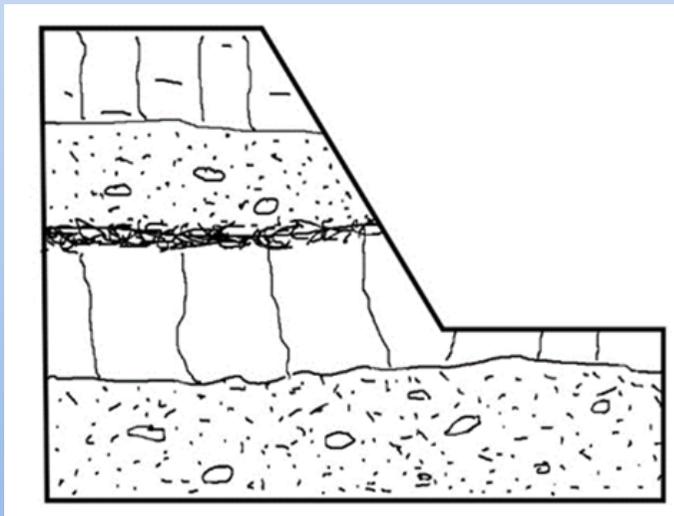
3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

Talud Tipo III: Coladas + Escorias + Piroclastos

Talud heterogéneo compuesto por sucesivas coladas entre las que se localizan capas de escoria y depósitos piroclásticos (unidades geotécnicas II, III, IV, Va y Vb).

Es común que con la alternancia de diferentes episodios eruptivos de diferentes características se acumulen materiales muy diferentes, formándose alternancias de coladas, escorias y piroclastos.

La presencia de materiales de diferente naturaleza produce una gran irregularidad en la cara del talud, favoreciendo inestabilidades locales. Son habituales los “chineos” de cantos de pequeño diámetro proveniente de los niveles piroclásticos. También pueden ser habituales los bloques en voladizo y descalzados.

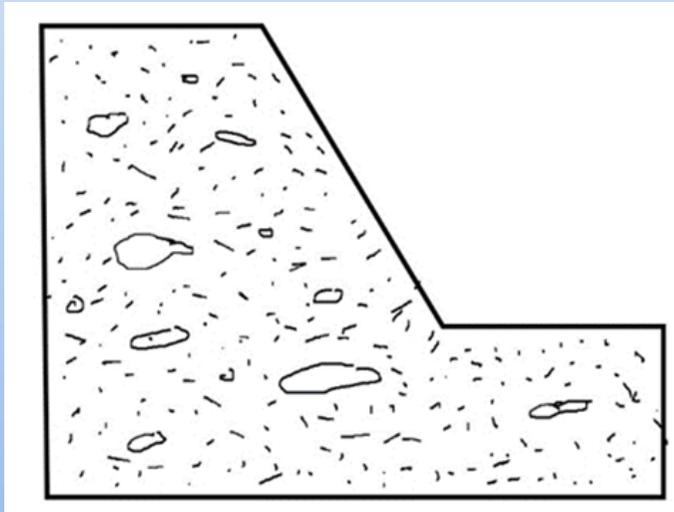


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

Talud Tipo IV: Piroclastos

Taludes compuestos por depósitos piroclásticos más o menos soldados (unidades geotécnicas Va y Vb). En este tipo de taludes son habituales las caídas de cantos de pequeño tamaño si bien, la presencia de bloques de mayor tamaño puede suponer un mayor peligro.

Las discontinuidades del macizo afectan poco a la estabilidad del talud

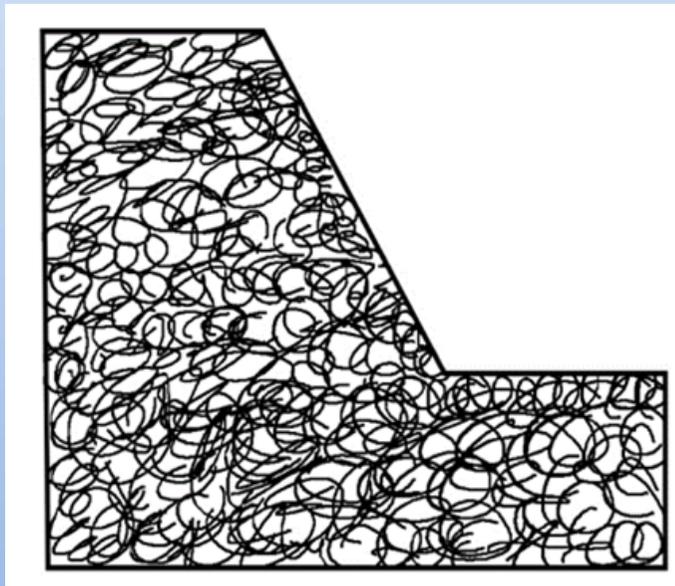


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

Talud Tipo V: Escorias

Taludes compuestos prácticamente en su totalidad por escorias (unidad geotécnica IVb).

En este tipo de taludes son habituales las caídas de porciones de escorias de pequeño tamaño. Pueden presentar huecos como consecuencia de erosión diferencial de zonas menos compactas dejando viseras de mayor tamaño susceptibles de desprenderse. No se suelen encontrar discontinuidades de relevancia



4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

- Resistencia de la roca matriz
- Grado de soldadura de los piroclastos
- Tamaño de bloque (Palmström, 1974)
- Características de las juntas (Bieniawski, 1989)
- Heterogeneidad del macizo (IH)
- Alteración del macizo
- Efectividad de la cuneta
- Altura del talud
- Ángulo del talud (Pierson, 1992)
- Regularidad de la superficie
- Orientación de las discontinuidades (Romana, 1985)
- Tamaño de los bloques inestables
- Espesor de las capas

4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

- Resistencia de la roca matriz
- Grado de soldadura de los piroclastos

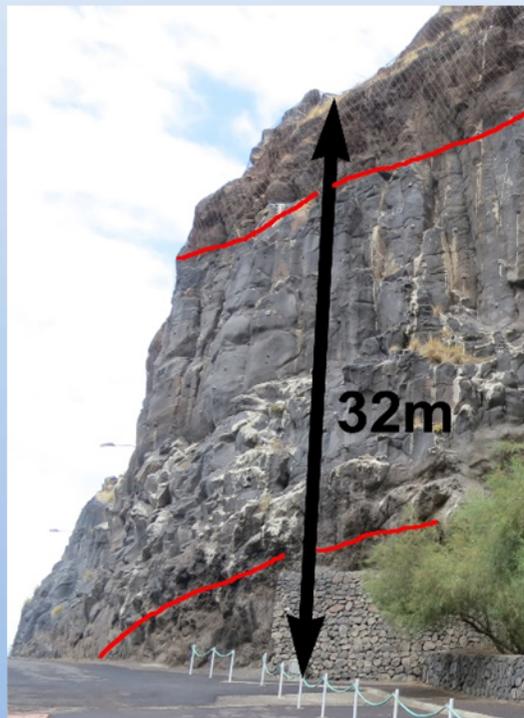
	Matriz roccsa (Mpa)	>250	250-100	100-50	50-25	<25
Resistencia de la roca	Grado de soldadura de los piroclastos	No pueden ser separados individualmente	Se separan con dificultad con la punta del martillo	Se separan al rasparlos con la punta del martillo	Se separan con dificultad con la mano	Se separan fácilmente con la mano



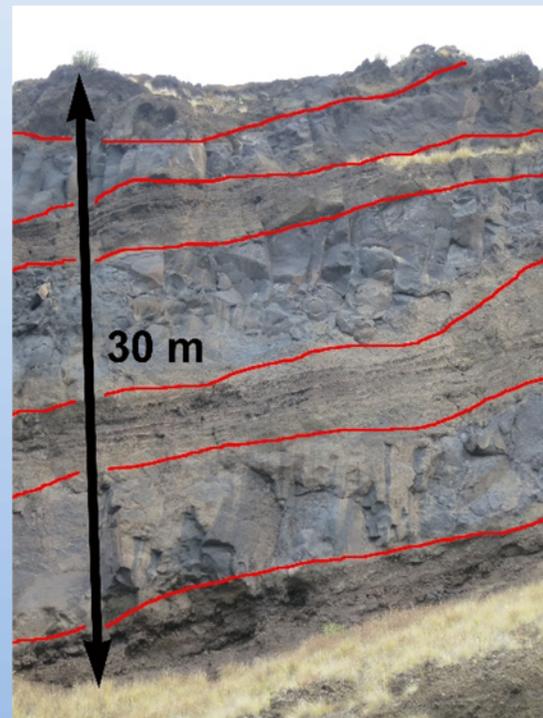
4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

- Índice de Heterogeneidad del macizo (IH)

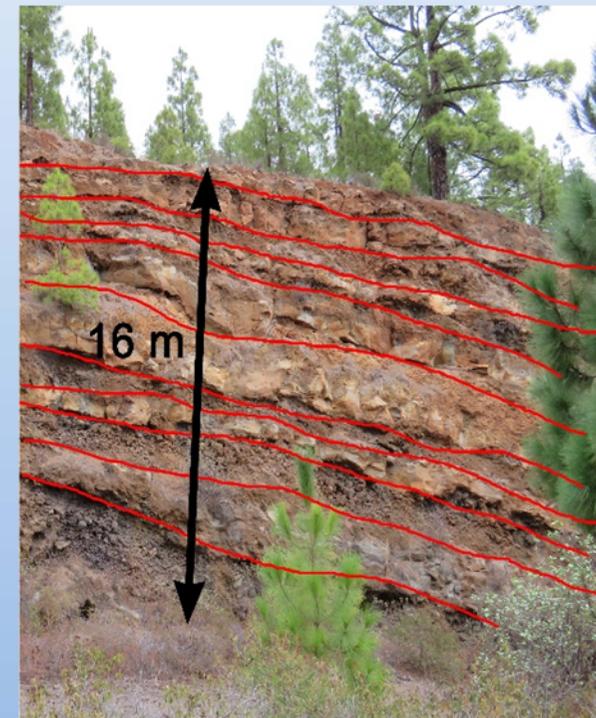
La heterogeneidad litológica y estructural condiciona la mayor parte de las inestabilidades de taludes en los macizos rocosos volcánicos por lo que se ha diseñado un índice sencillo para tratar de valorarla. Se ha denominado **Índice de heterogeneidad (IH)** y se define como 100 veces el número de cambios de litología que hay en la vertical de un talud dividido por su altura



$$IH = 2 \cdot 100 / 32 = 6$$



$$IH = 6 \cdot 100 / 30 = 20$$



$$IH = 10 \cdot 100 / 16 = 62$$

4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

- **Regularidad de la superficie**

En rocas volcánicas es muy común la presencia de huecos, cavidades y zonas desplomadas. La irregularidad de la superficie es un claro indicador de la presencia de posibles inestabilidades en un talud y de las dimensiones de las mismas.

Se ha clasificado la regularidad de la superficie en cinco tipos en función de la erosionabilidad de las capas, la presencia de huecos (viseras o cavidades) y la dimensión de los mismos.



Superficie regular (Clase a)



Superficie irregular (Clase c)



Superficie bastante irregular (Clase d)

4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

- Regularidad de la superficie

Regularidad de la superficie del talud	Descripción
a	Superficie muy regular: lisa, sin capas erosionables, sin huecos ni viseras
b	Superficie regular: Algunas cavidades o viseras menores de 25 cm. Algunas capas algo erosionables.
c	Superficie Irregular: Bastantes huecos o viseras de 25 a 50cm, varias capas erosionables
d	Bastante irregular: Más del 50% del talud está afectado por huecos o viseras entre 0,5 y 1m. Algunas capas muy erosionables.
e	Muy irregular: Más del 50% del talud está afectado por huecos o viseras mayores de 1m. Muchas capas altamente erosionables.

4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

- **Tamaño de los bloques inestables**

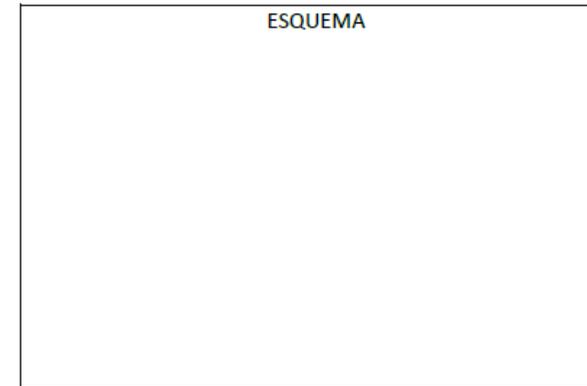
En los taludes en los que la presencia de escorias y piroclastos es mayoritaria, la patología más problemática es la caída de los bloques sueltos, que quedan descalzados por erosión diferencial. Por este motivo resulta importante cuantificar el tamaño del bloque que puede caer.



5. Ficha de toma de datos de taludes

Localización: _____
 Carretera: _____
 p.k.: _____
 Coordenadas: _____
 Altura _____ Pendiente: _____ Anchura: _____
 Descripción: _____

ESQUEMA

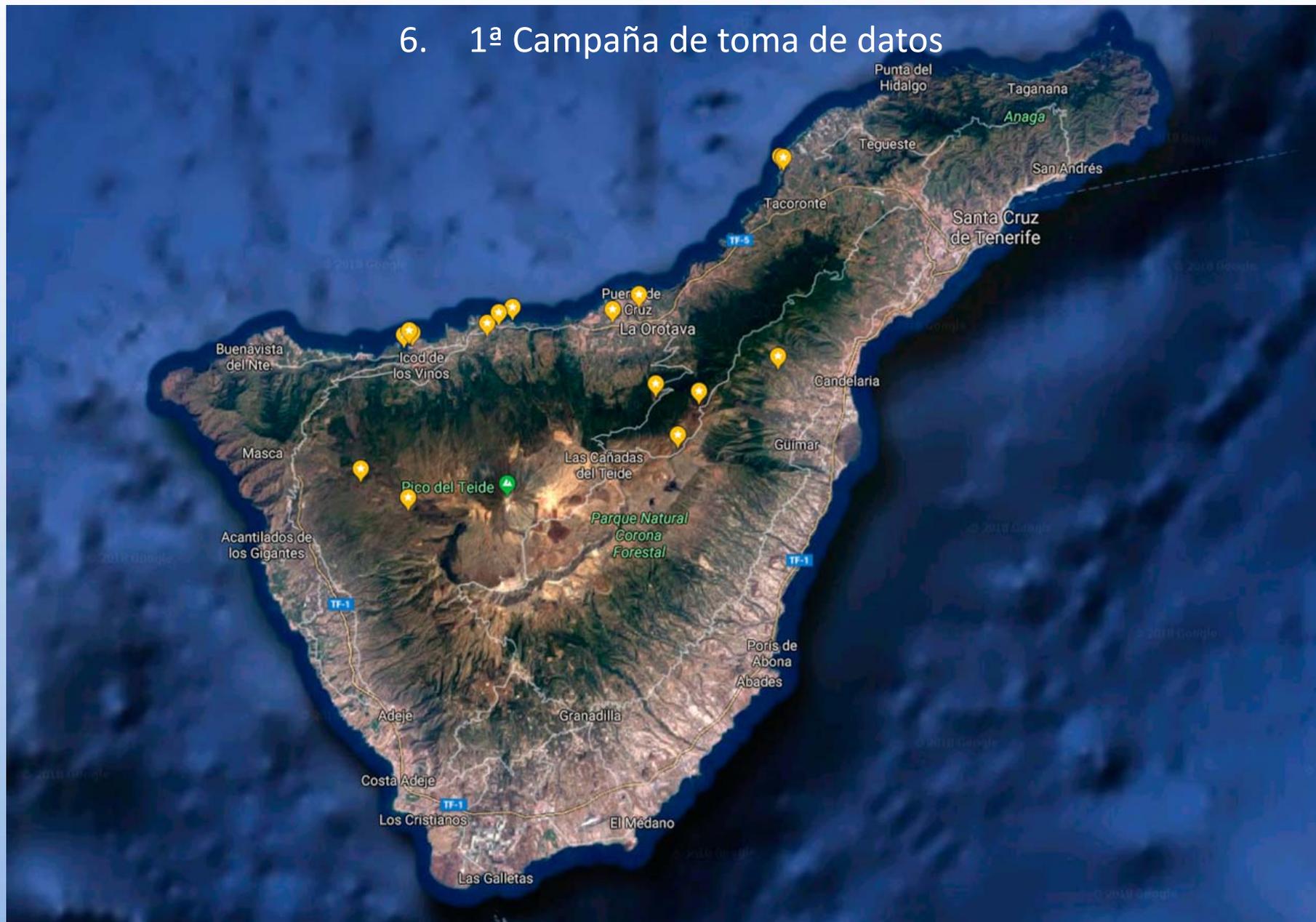


Resistencia de la matriz rocosa (MPa)		>250	250-100	100-50	50-25	<25
Grado de soldadura de los piroclastos		No pueden ser separados individualmente	Se separan difícilmente con la punta del martillo	Se separan al rasparlos con la punta del martillo	Se separan con dificultad con la mano	Se separan fácilmente con la mano
Tamaño de Bloque	VB (m ³)	>10	0,2-10	0,01-0,2	0,0002-0,01	<0,0002
	JV (m)	<1	1-5	5-10	10-50	>50
Características de las discontinuidades	Continuidad (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20
	Apertura (mm)	cerrada	<0,1	0,1-1	1-5	>5
	Relleno	Sin Relleno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm
	Alteración	No alterada	Ligeramente	Moderadamente	Muy Alterada	Descompuesta
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Plana
Heterogeneidad del macizo (IH)		<5	5-10	10-15	15-30	>30
Alteración del macizo (ISRM 1981)		I	II	III	IV	V-VI
Geometría del talud	Efectividad de la cuneta	buena captación	captación moderada	captación limitada	sin captación	sin cuneta
	Altura del talud (m)	<5	5-10	10-20	20-30	>30
	Pendiente del talud	>75º	75º-60º	60º-45º	45º-30º	<30º
	Regularidad de la superficie	Superficie lisa	pocas irregularidades	algo irregular	Bastante irregular	Muy irregular
Orientación de las discontinuidades	Paralelismo con el talud	>30º	30-20º	20-10º	10-5º	<5º
	Buzamiento	<20º	20º-30º	30º-35º	35-45º	>45º
Tamaño de bloque (m)		0,25	0,5	1	1,5	>1,5
Volumen total del evento (m³)		2	4	7	10	>10
Tamaño de las bombas (cm)		< 10	10-25	25-50	50-75	>100
Espesor de los paquetes (m)		>10	10-6	6-3	3-1	<1
Clima		seco <100mm/año	100-300 mm/año	300-600 mm/año	lluvioso >600mm/año	lluvioso con episodios de alta intensidad
Historial del talud		Sin desprendimientos	pocas caídas	Caídas ocasionales	muchas caídas	caídas constantes

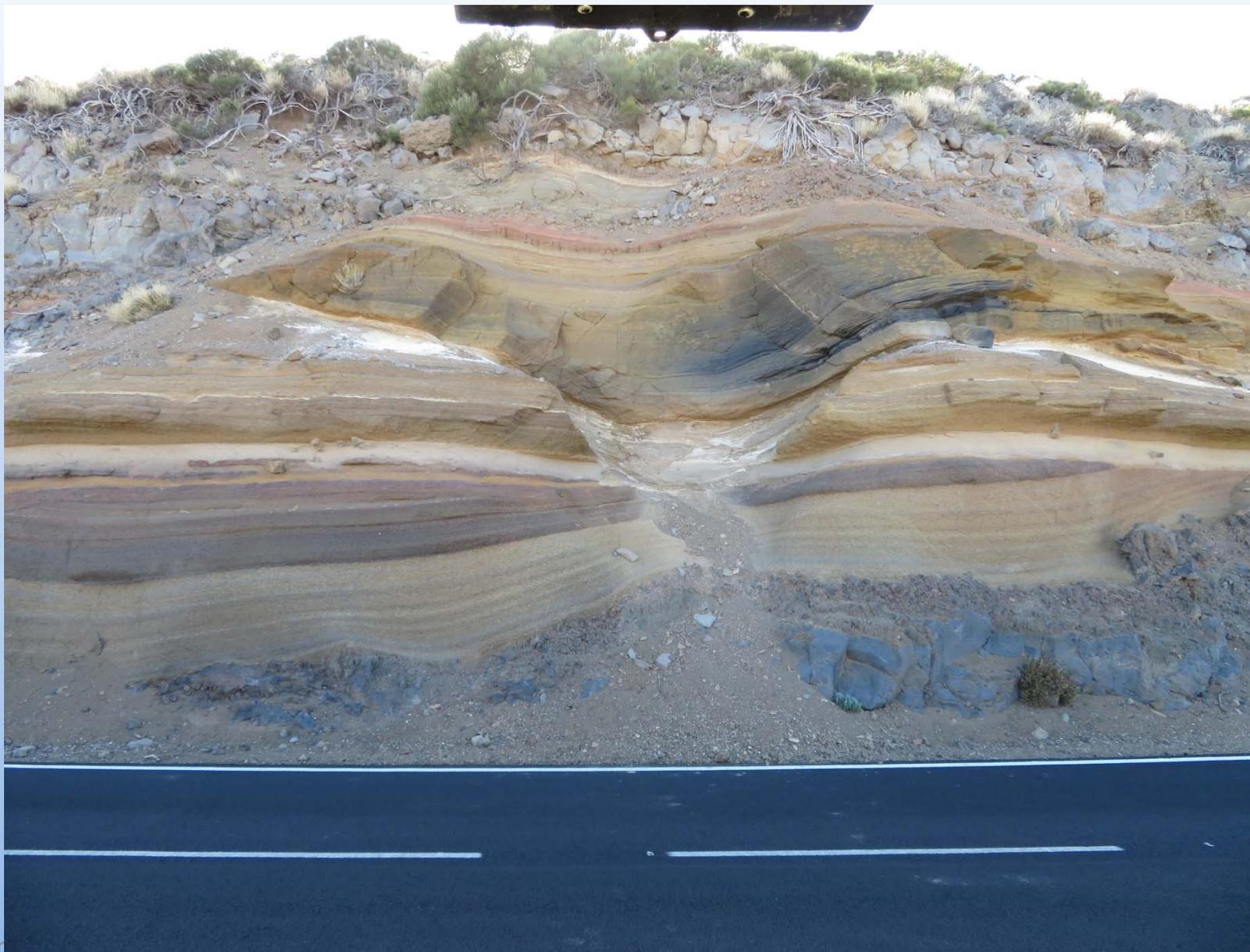
5
4
3
2
1
GRADO DE ESTABILIDAD

Medidas de contención: _____

6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos



6. 1ª Campaña de toma de datos

T-25

Localización: La Tarta
 Carretera: TF-24
 p.k.: 32
 Coordenadas: 28.384471, -16.489994
 Altura: 10 Pendiente: 80 90t Anchura: 60
 Descripción: Algunas Capas piroclásticas de diferente naturaleza desde piroclásticas. Piroclastos sueltos y soldados. Diferente erosionabilidad resulta en v. secas. Escarbo de caída 2 m³



Resistencia de la matriz rocosa (MPa)		>250	250-100	100-50	50-25	<25
Grado de soldadura de los piroclastos		No pueden ser separados individualmente	Se separan difícilmente con la punta del martillo	Se separan al rasparlos con la punta del martillo	Se separan con dificultad con la mano	Se separan fácilmente con la mano
Tamaño de Bloque	VB (m ³)	>10	0,2-10	0,01-0,2	0,0002-0,01	<0,0002
	JV (m)	<1	1-5	5-10	10-50	>50
Características de las discontinuidades	Continuidad (m)	<u>10</u>	1-3	<u>10</u>	10-20	>20
	Apertura (mm)	cerrada	<0,1	0,1-1	1-5	>5
	Relleno	Sin Relleno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm
	Alteración	No alterada	Ligeramente	Moderadamente	Muy Alterada	Descompuesta
Rugosidad		Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Plana
Heterogeneidad del macizo (IH)		<5	5-10	10-15	15-30	<u>>30 70?</u>
Alteración del macizo (ISRM 1981)		I	<u>II</u>	<u>III</u>	IV	V-VI
Geometría del talud	Efectividad de la cuneta	buena captación	captación moderada	captación limitada	sin captación	sin cuneta
	Altura del talud (m)	<5	<u>5-10</u>	<u>10-20</u>	20-30	>30
	Pendiente del talud	<u><75°</u>	75°-60°	60°-45°	45°-30°	<30°
	Regularidad de la superficie	Superficie lisa	pocas irregularidades	algo irregular	Bastante irregular	Muy irregular
Orientación de las discontinuidades	Paralelismo con el talud	<u>30°</u>	30-20°	20-10°	10-5°	<u><5°</u>
	Buzamiento	<u><30°</u>	20°-30°	30°-35°	35-45°	<u>>45°</u>
Tamaño de bloque (m)		0,25	0,5	1	1,5	<u>>1,5</u>
Volumen total del evento (m ³)		2	<u>4</u>	7	10	>10
Tamaño de las bombas (cm)		< 10	<u>10-25</u>	25-50	50-75	>100
Espesor de los paquetes (m)		>10	10-6	6-3	<u>3-1</u>	<u><1</u>
Clima		seco <100mm/año	100-300 mm/año	300-600 mm/año	lluvioso >600mm/año	lluvioso con episodios de alta intensidad
Historial del talud		Sin desprendimientos	pocas caídas	Caídas ocasionales	muchas caídas	caídas constantes

GRADO DE ESTABILIDAD

5

4

3

2

1

Medidas de contención: Alta No

7. Análisis estadístico de los datos obtenidos

Las variables referentes al estado de las discontinuidades (continuidad, apertura, relleno, alteración y rugosidad) fueron agrupadas en una sola variable denominada “Estado de las juntas” del mismo modo que se recoge en la clasificación del RMR.

Estado de las juntas	Muy rugosas No continuas Cerradas Bordes sanos y duros	Algo rugosas Separación < 1mm Bordes algo meteorizados	Algo rugosas Separación < 1mm Bordes muy meteorizados	Espejos de falla o relleno < 5 mm ó separación 1-5 mm Continuas	Relleno blando > 5 mm ó separación > 5 mm Continuas
Valor	5	4	3	2	1

La Resistencia de la roca matriz y el Grado de soldadura de los piroclastos se agruparon en una nueva variable denominada “**Resistencia de la roca**”. El valor de esta variable será el menor de los correspondientes (1 a 5) a las dos variables agrupadas.

El **Tamaño de bloques inestables** se establecido como la puntuación mínima de las asignadas a “Tamaño del bloque inestable” y a “Tamaño de las bombas”.

Tras un primer análisis se han descartado algunas variables por resultar: bien, difíciles de estimar (volumen del evento) o por no encajar en el enfoque dado a la clasificación (cuneta). Se descarta también el historial del talud por considerarse una consecuencia de la estabilidad de un talud más que un factor de la propia estabilidad.

7. Análisis estadístico de los datos obtenidos

Los parámetros medidos en el campo con valores de 1 (para el valor pésimo) a 5 (para el valor máximo). Posteriormente se recalcularon entre 0 y 1.

El valor del grado de estabilidad se recalculó con valores de 0 a 100.

Modelo de regresión lineal múltiple.

$$\text{Grado de estabilidad} = \beta_1 \cdot \text{Altura} + \beta_2 \cdot \text{Pendiente} + \beta_3 \cdot \text{Resistencia} + \dots + 0 + \varepsilon$$

Técnica de reducción del modelo (*backward stepwise*).

Las variables no incluidas en el modelo no aportan información al mismo, ya sea por muy poca variabilidad de las mismas (homogeneidad dentro de la muestra) o por colinealidad con otra variable.



Talud	Tecnico	Coordenada X	Coordenada Y	Altura	Pendiente	Anchura	Talud Tipo	Resistencia matriz	Soldadura	Tamaño bloque	Continuidad	Apertura	Relleno	Alteración Juntas	Rugosidad	IH	Alterción macizo	Cuneta	Altura	Pendiente	Regularidad	Paralelismo Juntas	Buzamiento Juntas	Tamaño bloq. Inest.	Tam. Bloque en mat.	Volumen del evento	Espesor de paquetes	Historial	Grado de estabilidad	
T-1	JGG	28,359596	-16,427687	15	85	50	T-2	2		4	2	5	5	4	5	1	4	5	3	5	3	2	5	4		5	2	2	50	
T-1	MMM	28,359596	-16,427687	15	85	50	T-2		2	4	2	5	5	5	5	1	4	5	3	5	3	1	5	4		1	1	2	50	
T-2	JGG	28,359596	-16,427687	6	90	30	T-2	2		4	3	5	5	4	5	1	4	2	4	5	1	1	5	3		5	2	2	50	
T-2	MMM	28,359596	-16,427687	6	90	40	T-2		2	4	2	5	5	5	5	1	4	3	4	5	2	1	5	3		2	1	2	50	
T-3	JGG	28,219040	-16,258870	12	85	20	T-3		3	4	2	5	5	4	5	1	4	3	3	5	4	1	5	4		5	2	2	50	
T-3	MMM	28,359596	-16,427687	12	90	35	T-3		3	3,5	5	5	5	5	5	1	4	3	3	5	4	1	5	4	5	2	2	3	70	
T-4	JGG	28,262699	-16,721826	8	80	50	T-2	3,5		4	3	2	5	3	5	2	4	4	4	5	1	2	3	3		4	3	2	30	
T-4	MMM	28,262699	-16,721826	8	85	50	T-2	4	4	3,5	5	3	5	5	5	2	4	3,5	4	5	2	1	1	3		4	2	2	40	
T-5	JGG	28 15 814 N	16 43 349 O	8	80	30	T-2	1		3	4	1	5	3	5	1	3	4	4	4	1	5	2	3	4	4	2	1	30	
T-5	MMM	28 15 814 N	16 43 349 O	8	90	25	T-2	3	3	3,5	3	5	5	5	5	1	2	4	3	4	5	2	1	3	2,5	3	1,5	2	20	
T-6	JGG	28 15 814 N	16 43 349 O	11	65	30	T-2	1		4	4	2	5	4	5	2	4	5	3	3	2	2	1	2		3	3	2	20	
T-6	MMM	28 15 814 N	16 43 349 O	10	80	30	T-2	3	3	4	5	3	5	5	5	2	4	4	4	5	3	1	1	1		1	2	2	20	
T-7	JGG	28,282291	-16,759929	12	90	30	T-4	2		2	1	5	5	5	5	5	4	5	3	5	3	1	5	4	3	5	5	2	50	
T-7	MMM	28,282291	-16,759929	21	90	50	T-4		4,5	3	5	5	5	5	5	5	4	5	3	5	4	5	5	4	3	5	5	3	60	
T-8	JGG	28,395447	-16,641457	5	90	25	T-1	4		4	4	2	5	4	3	2	4	4	4	5	1	1	1	3		5	3	4	50	
T-8	MMM	28,395447	-16,641457	6	90	25	T-1	4		4	4	1	5	5	4	2	4	5	4	5	3	1	1	3		5	3	4	50	
T-9	JGG	28,384465	-16,661344	4	80	20	T-2	4		4	5	2	5	4	4	1	4	5	5	5	3	1	1	4		1	2	2	50	
T-9	MMM	28,384465	-16,661344	4	80	20	T-2	3,5		4	4	2	5	4	5	1	4	3	5	5	3	1	1	4	5	3	2	2	50	
T-9	AMH	28,384465	-16,661344	4	80	20	T-2	4		4	4	2	5	4	3	1	4	3	5	5	2	1	5	4		4	2	4	50	
T-10	MMM	28,384465	-16,661344	7	90	35	T-3	3,5	4	3,5	5	3	5	4	5	2	4	5	4	5	4	1	1	4		4	3	3	50	
T-11	MMM	28,377840	-16,721676	30	90	200	T-2	3,5		4	2	2	5	5	5	5	4	2	1	5	3	1	1	1		1	5	1	10	
T-11	JGG	28,377840	-16,721676	30	90	300	T-2	4		4	3	1	5	4	3	5	4	4	1	5	2	1	1	1		1	5	3	30	
T-11	AMH	28,377840	-16,721676	30	90	200	T-2	4		5	2	2	5	5	3	5	4	4	1	5	2	1	1	1		1	5	3	10	
T-12	JGG	28,376360	-16,728338	60	80	200	T-2	4		4	3	2	5	4	3	2	4	5	1	5	1	1	1	1		2	5	3	30	
T-12	MMM	28,376360	-16,728338	60	90	200	T-2	4		4	4	3	5	5	4	2	4	1	1	5	2	1	1	1		2	3	3	30	
T-12	AMH	28,376360	-16,728338	60	90	200	T-2	4		4	4	2	5	5	3	2	4	5	1	5	1	1	1	1		1	4	2	30	
T-13	JGG	28,379173	-16,724278	15	90	50	T-5	4	5	5	5	5	5	4	4	5	4	1	3	4	1	5	5	3	2	4	5	4	50	
T-13	MMM	28,379173	-16,724278	15	90	50	T-5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	1	4	5	1	5	5	4	3	1	5	3	50
T-14	JGG	28,392110	-16,652258	35	75	200	T-3	3		5	3	1	5	3	3	4	4	4	1	5	2	1	1	1		1	5	3	20	
T-14	MMM	28,392110	-16,652258	35	75	200	T-3	3	5	4	3	1	5	4	5	3	3,5	1	1,5	5	3	1	1	1		2	5	2	20	
T-14	AMH	28,392110	-16,652258	35	75	200	T-3	3	5	4	3	1	5	5	4	4	3	2	1	5	3	1	1	1		1	5	2	20	
T-15	JGG	28,392749	-16,560064	5	90	15	T-1		4	3	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	3	5	5	3	2	3	5	2	50	
T-15	MMM	28,392749	-16,560064	5	90	15	T-1		2	3	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	4	2	5	5	2	70	
T-15	AMH	28,392749	-16,560064	5	90	15	T-1		2	3	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	5	2	1	5	4	1	50	
T-16	JGG	28,403227	-16,538762	10	80	100	T-1		3	2	5	5	5	5	5	2	3	5	4	5	1	5	5	1		5	3	4	70	
T-16	MMM	28,403227	-16,538762	10	80	100	T-1		3	2	5	5	5	5	5	2	3	5	4	5	1	5	5	2,5	2	4	3	2	60	
T-16	AMH	28,403227	-16,538762	10	80	100	T-1		3	2	5	5	5	5	5	2	3	5	3	5	1	5	5	1		5	3	3	50	
T-17	JGG	28,501822	-16,424532	45	90	150	T-3	4		4	4	2	5	4	4	4	4	1	1	5	3	1	1	2		4	5	3	30	
T-17	MMM	28,501822	-16,424532	45	90	150	T-3	4	5	4	4	5	5	5	5	3	4,5	1	2	5	3	1	1	3		4	4,5	3	30	
T-18	JGG	28,501822	-16,424532	240	65	150	T-3	4		4	3	1	5	4	4	3,5	4	4	1	3	1	1	1	1		2	4	2	30	
T-18	MMM	28,501822	-16,424532	240	65	150	T-3	3,5		4	3	4	5	5	5	3	4	4	1	4	1	1	1	1		1	4	2,5	30	
T-19	JGG	28,501164	-16,422387	20	90	80	T-2	4		4	4	2	5	4	3	3	3,5	1	3	5	3	2	1	3		5	3	3	50	
T-19	MMM	28,501164	-16,422387	20	90	80	T-2	3,5	3	4	3	2	5	5	5	3,5	3	1	3	5	2	1	1	4		3	4	3	50	
T-20	JGG	28,340758	-16,525257	6	90	15	T-1	5		4	4	1	5	4	4	5	4	5	4	5	3	1	1	1		4	3	2	30	
T-20	MMM	28,340758	-16,525257	6	90	20	T-1	4		4	4	1	5	5	5	5	4	1	4	5	2,5	1	1	1		3	3	2	30	
T-21	JGG	28,304984	-16,507708	10	65	100	T-3		3	1	5	2	5	5	4	1	3	2	4	4	1	1	1	2	2	5	3	1	30	
T-21	MMM	28,304984	-16,507708	10	65	100	T-3	3	2,5	3,5	5	3	5	4	5	1	3	3	3,5	4	1	1	1	1	5	4	4	2	1,5	30
T-22	JGG	28,334471	-16,489994	6	80	30	T-1		2	1	5	5	5	4	5	5	4	3	4	5	5	5	5	5		5	4	5	70	
T-22	MMM	28,334471	-16,489994	6	75	30	T-1		2	1	5	5	5	5	5	5	4	5	4	4	5	5	5	5		4	5	4	70	
T-23	JGG	28,334471	-16,489994	10	90	60	T-1		2	1	5	5	5	4	5	1	4	5	4	5	1	1	3	1	3	4	4	2	30	
T-23	MMM	28,334471	-16,489994	10	90	50	T-1		1,5	1	3	5	5	4	5	1	3,5	5	3,5	5	2	5	5	5	4	4	1,5	2	20	
T-24	JGG	28,334932	-16,491067	8	90	30	T-1		1	1	5	5	5	4	5	3	3	3	4	5	2	5	5	5	3	5	3	2	50	
T-24	MMM	28,334932	-16,491067	8	80	30	T-1		1,5	1	5	5	5	5	5	3	3,5	3	4	5	2,5	5	5		3	4	3	2	40	

7. Análisis estadístico de los datos obtenidos

Los parámetros medidos en el campo con valores de 1 (para el valor pésimo) a 5 (para el valor máximo). Posteriormente se recalcularon entre 0 y 1.

El valor del grado de estabilidad se recalculó con valores de 0 a 100.

Modelo de regresión lineal múltiple.

$$\text{Grado de estabilidad} = \beta_1 \cdot \text{Altura} + \beta_2 \cdot \text{Pendiente} + \beta_3 \cdot \text{Resistencia} + \dots + 0 + \varepsilon$$

Técnica de reducción del modelo (*backward stepwise*).

Las variables no incluidas en el modelo no aportan información al mismo, ya sea por muy poca variabilidad de las mismas (homogeneidad dentro de la muestra) o por colinealidad con otra variable.



7. Análisis estadístico de los datos obtenidos

```
Tenerife <- readxl::read_excel("tenerife.xlsx", sheet = 2)
Tenerife$Resist <- apply(Tenerife[16:17],1 ,min, na.rm = T)
Tenerife$Bloque <- apply(Tenerife[32:33],1 ,min, na.rm = T)
Tenerife$Pendiente__1 <- 1 - Tenerife$Pendiente__1
Tenerife$Pendiente_max <- 1 - Tenerife$Pendiente_max
Tenerife$Juntas <- apply(Tenerife[19:24], 1, mean, na.rm = T)

glimpse(Tenerife)

Tenerife_T1 <- filter(Tenerife, `Talud Tipo` == "T-1")
Tenerife_T2 <- filter(Tenerife, `Talud Tipo` == "T-2")
Tenerife_T3 <- filter(Tenerife, `Talud Tipo` == "T-3")
Tenerife_T4 <- filter(Tenerife, `Talud Tipo` == "T-4")
Tenerife_T5 <- filter(Tenerife, `Talud Tipo` == "T-5")

Tenerife <- filter(Tenerife, Tecnico != "XX")

#MMM::Correlation_group(Tenerife)

Mod <- lm (Grado_100 ~ Resist + Tam_bloque + Continuidad + Apertura +
  Relleno + Alteracion + Rugosidad + IH + IH2 + Alter_macizo + Cuneta +
  Altura__1 + Pendiente_max + Regularidad + Dis_Paral + Dis_Buzamiento +
  Bloque + Evento_vol + Paquete_esp + Historial + Juntas + `Talud Tipo`,
  na.action=na.omit, data = Tenerife)

anova(Mod)
summary(Mod)

ggplot(Tenerife, aes(x= Grado_100, y = Mod$fitted.values, colour = Tecnico)) +
  geom_point() +
  geom_abline(slope = 1, intercept = 0, col = "red") +
  coord_equal() +
  xlim(c(-10,110)) +
  ylim(c(-10,110))
```

7. Análisis estadístico de los datos obtenidos

```

Mod <- lm (Grado_100 ~ Resist + Tam_bloque + Continuidad + Apertura + Relleno + Alteracion + Rugosidad +
          IH + IH2 + Alter_macizo + Cuneta + Altura__1 + Pendiente_max + Regularidad + Dis_Paral +
          Dis_Buzamiento + Bloque + Evento_vol + Paquete_esp + Historial + Juntas + `Talud Tipo`,
          na.action=na.omit, data = Tenerife)

anova(Mod)

## Analysis of Variance Table
##
## Response: Grado_100
##
##              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
## Resist          1  9866.5  9866.5  190.6205 4.999e-15 ***
## Tam_bloque       1    6.2    6.2   0.1207 0.7305115
## Continuidad      1  6749.9  6749.9  130.4087 8.002e-13 ***
## Apertura         1  8158.6  8158.6  157.6241 6.602e-14 ***
## Relleno          1   233.5   233.5   4.5109 0.0415044 *
## Alteracion       1    0.0    0.0   0.0001 0.9906831
## Rugosidad        1   647.4   647.4  12.5069 0.0012615 **
## IH               1   299.5   299.5   5.7859 0.0221103 *
## IH2              1    4.5    4.5   0.0873 0.7695627
## Alter_macizo     1   281.8   281.8   5.4447 0.0260728 *
## Cuneta           1  1261.4  1261.4  24.3695 2.389e-05 ***
## Altura__1        1  1608.5  1608.5  31.0766 3.731e-06 ***
## Pendiente_max    1  1072.7  1072.7  20.7240 7.262e-05 ***
## Regularidad      1  1270.1  1270.1  24.5387 2.274e-05 ***
## Dis_Paral        1   139.2   139.2   2.6887 0.1108602
## Dis_Buzamiento   1  1055.8  1055.8  20.3990 8.051e-05 ***
## Bloque           1  1058.5  1058.5  20.4503 7.920e-05 ***
## Evento_vol       1   443.2   443.2   8.5618 0.0062679 **
## Paquete_esp      1   303.1   303.1   5.8560 0.0213807 *
## Historial        1   943.6   943.6  18.2301 0.0001632 ***
## `Talud Tipo`     4   132.6   33.2   0.6405 0.6374671
## Residuals       32  1656.3   51.8
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

7. Análisis estadístico de los datos obtenidos

```

Mod <- lm (Grado_100 ~ Resist + Tam_bloque + Continuidad + Alteracion + Rugosidad + IH3 + Altura__1 +
          Pendiente_max + Regularidad + Dis_Paral + Dis_Buzamiento + Bloque + Paquete_esp + 0
          ,na.action=na.omit, data = Tenerife[1:47,])

summary(Mod)

sum(Mod$coefficients[1:(length(Mod$coefficients))])

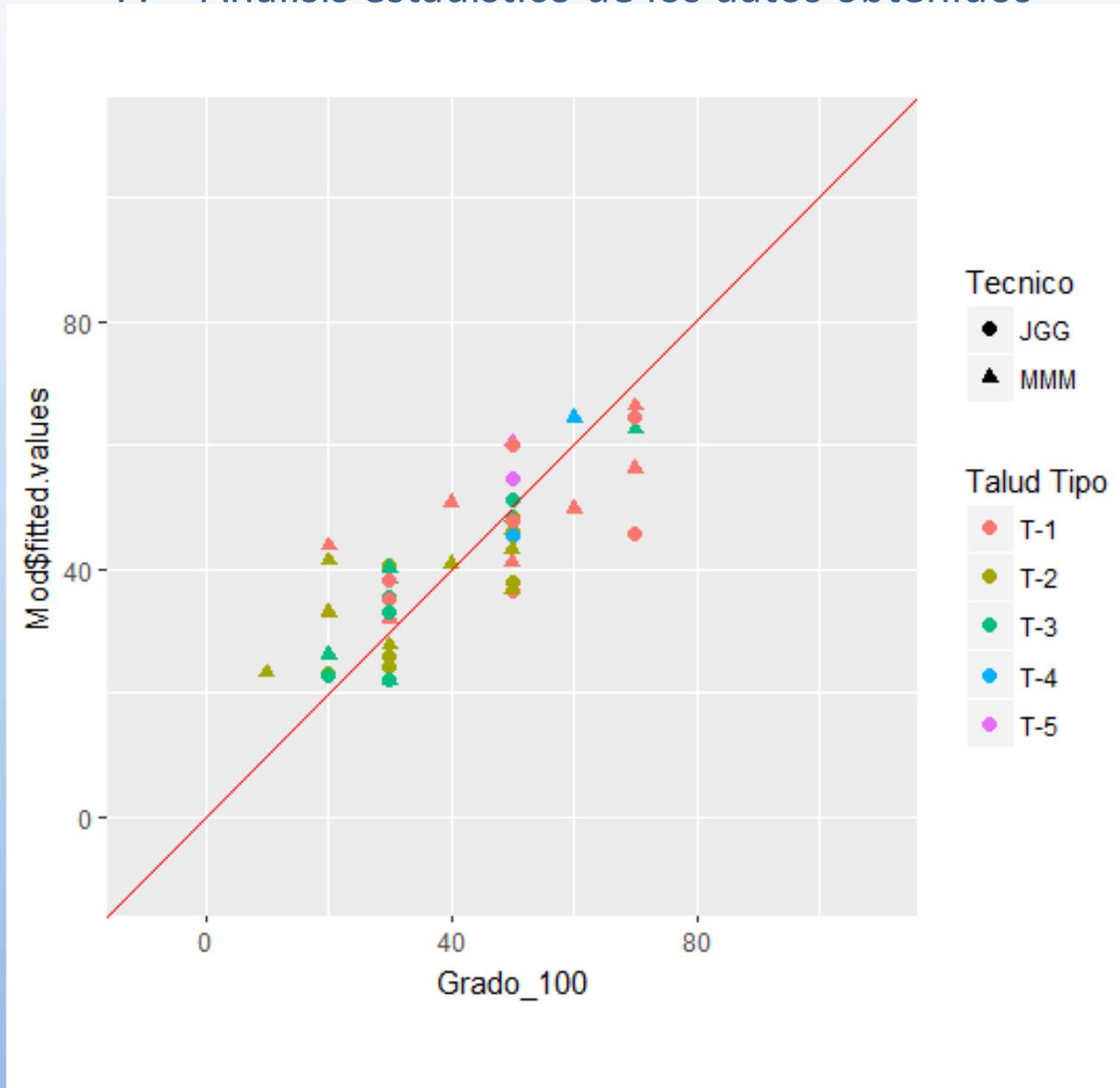
summary(Mod)

Call: lm(formula = Grado_100 ~ Resist + Tam_bloque + Continuidad + Alteracion + Rugosidad + IH3 + Altura__1 +
Pendiente_max + Regularidad + Dis_Paral + Dis_Buzamiento + Bloque + Paquete_esp + 0, data = Tenerife[1:47, ],
na.action = na.omit)

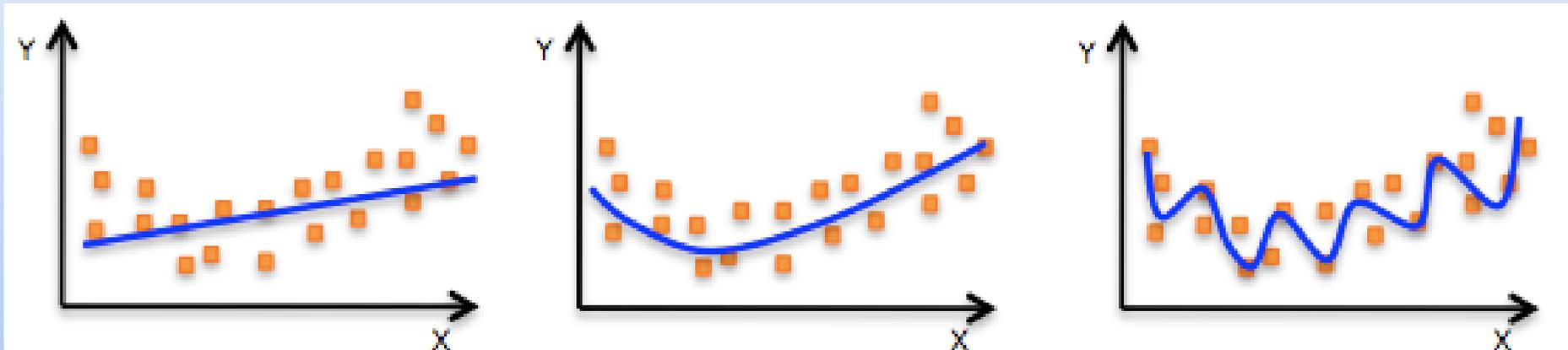
Residuals:      Min 1Q  Median  3Q  Max -23.807 -5.873  1.745  5.610 24.295
Coefficients:   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

Resist          10.9983  10.1658  1.082  0.28691
Tam_bloque       3.0089   7.2458  0.415  0.68056
Continuidad     14.7855   8.8685  1.667  0.10466
Alteracion       2.7243  10.4404  0.261  0.79571
Rugosidad        0.2586   8.2482  0.031  0.97518
IH3             -1.6507   9.3200 -0.177  0.86047
Altura__1        5.0739   8.2702  0.614  0.54362
Pendiente_max   -1.2850   9.6021 -0.134  0.89433
Regularidad      7.4730   7.4780  0.999  0.32469
Dis_Paral       -5.3197   7.5081 -0.709  0.48345
Dis_Buzamiento  21.4931   6.2591  3.434  0.00158 **
Bloque          14.9656   7.3845  2.027  0.05060 .
Paquete_esp      5.7065   8.3165  0.686  0.49726
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 10.97 on 34 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9558,
Adjusted R-squared:  0.9388
F-statistic: 56.5 on 13 and 34 DF, p-value: < 2.2e-16
    
```

7. Análisis estadístico de los datos obtenidos



7. Análisis estadístico de los datos obtenidos



(<http://i.stack.imgur.com/0NbOY.png>)

8. Propuesta de clasificación

Parámetro	Puntuación máxima
Resistencia	15
Tamaño de bloque (fracturación)	5
Estado de las discontinuidades	5
Espesor de las capas	7
Altura	12
Pendiente	5
Índice de Heterogeneidad (IH)	8
Regularidad de la cara del talud	6
Buzamiento de las discontinuidades	15
Tamaño de bloques inestables	20

8. Propuesta de clasificación

Resistencia	Resistencia de la roca matriz (MPa)	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	< 25
	Grado de soldadura de los piroclastos	No pueden ser separados individualmente	Se separan con dificultad con la punta del martillo	Se separan al rasparlos con la punta del martillo	Se separan con dificultad con la mano	Se separan fácilmente con la mano
Puntos		15	12	8	4	0
Tamaño de bloque (m³)		> 10	0,2 - 10	0,01 - 0,2	0,0002 - 0,01	< 0,0002
Puntos		5	3	2	1	0
Estado de las juntas		Muy rugosas No continuas Cerradas Bordes sanos y duros	Algo rugosas Separación < 1mm Bordes algo meteorizados	Algo rugosas Separación < 1mm Bordes muy meteorizados	Espejos de falla o relleno < 5 mm ó separación 1-5 mm Continuas	Relleno blando > 5 mm ó separación > 5 mm Continuas
Puntos		5	3	2	1	0
Índice de heterogeneidad (IH)		0	1 - 35	35 - 70	70 - 100	> 100
Puntos		8	6	4	2	0
Altura del talud (m)		< 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	> 30
Puntos		12	9	6	3	0
Ángulo del talud (º)		< 45	60 - 45	75 - 60	90 - 75	> 90
Puntos		5	4	3	2	0
Regularidad de la cara del talud		Superficie lisa, sin capas erosionables ni huecos/viseras	Pocas irregularidades algunos huecos/viseras <25 cm de profundidad alguna capa algo erosionable	Algo irregular Bastantes Huecos/viseras de 25 a 50 cm de profundidad Varias capas susceptibles a la erosión	Bastante irregular Más el 50% del talud ocupado por huecos/cavidades/viseras de 50 cm a 1 m Algunas capas con alta susceptibilidad a la erosión	Muy irregular más del 50% del talud ocupado por cavidades/viseras >1 m de profundidad Muchas Capas con alta susceptibilidad a la erosión
Puntos		6	4	3	2	0
Tamaño del bloque inestable (m)		0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 1	1 - 3	> 3
Puntos		20	15	10	5	0
Espesor de las capas (m)		> 10	10 - 6	6 - 3	1 - 3	< 1
Puntos		7	5	4	2	0
Buzamiento de las juntas		< 20	20 - 30	30 - 35	35 - 45	> 45
Puntos		15	12	8	4	0
Total		100 - 80	80 - 60	60 - 40	40 - 20	20 - 0
Grado de estabilidad		I	II	III	IV	V

8. Propuesta de clasificación

A lo largo del estudio se observa la influencia del tipo de talud estudiado, si bien, el número de taludes analizados hasta el momento (24) no permite un análisis individualizado por grupos.

T-1: coladas, T-2: coladas + escorias, T-3: coladas + escorias + piroclastos, T-4: piroclastos, T-5: escorias

9. Conclusiones

Primera campaña de toma de datos en 24 taludes en rocas volcánicas de Tenerife.

Análisis estadístico: Modelo de regresión lineal múltiple ajustado mediante reducción progresiva (*backward stepwise*).

VARIABLES SELECCIONADAS: Tamaño del bloque inestable, Resistencia de la roca, Buzamiento de las discontinuidades, Altura del talud, Índice de heterogeneidad, Espesor de las capas, Regularidad de la cara del talud, Ángulo del talud, Tamaño del bloque y Estado de las discontinuidades.

El análisis de un mayor número de casos permitiría ajustar mejor la puntuación. No se descarta que alguna de las variables, por ahora desestimadas, pueda volver a incorporarse si con el estudio de más casos se aprecia que tiene una influencia mayor que la que ha resultado de este primer análisis.

MUCHAS GRACIAS

**Jornadas de presentación del proyecto MACASTAB::
*Estabilidad de laderas y taludes en regiones volcánicas***

PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA APLICADA A TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS VOLCÁNICOS

Javier González-Gallego*

Mauro Muñiz Menéndez*

** Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)*