

PROYECTO

MACASTAB

Interreg

Fondo Europeo de Desarrollo Regional



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 Muñoz Menéndez*

** Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)*



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

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. Campañas 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

- Necesidad de crear una metodología para **evaluar la estabilidad de taludes en rocas volcánicas**
- En la última década se ha avanzado mucho en el conocimiento sobre el **comportamiento geotécnico de las rocas volcánicas**. Jornadas de Madeira, Azores, Tenerife, Ischia...
- Clasificación de **Litotipos y Unidades Geotécnicas** de la **GETCAN-011**
- El **objetivo** final de este trabajo es crear una **Clasificación Geomecánica** para evaluar la estabilidad de **taludes en rocas volcánicas**.



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.

RMR (Bieniawski, 1973) 49 túneles excavados en rocas sedimentarias

Sistema Q (Barton et al., 1974) 212 túneles, sólo uno en rocas volcánicas (basaltos)

GSI (Hoek et al., 1995) Creado a partir de H&B para rocas con RMR<30



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 ₉₉ (%)
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

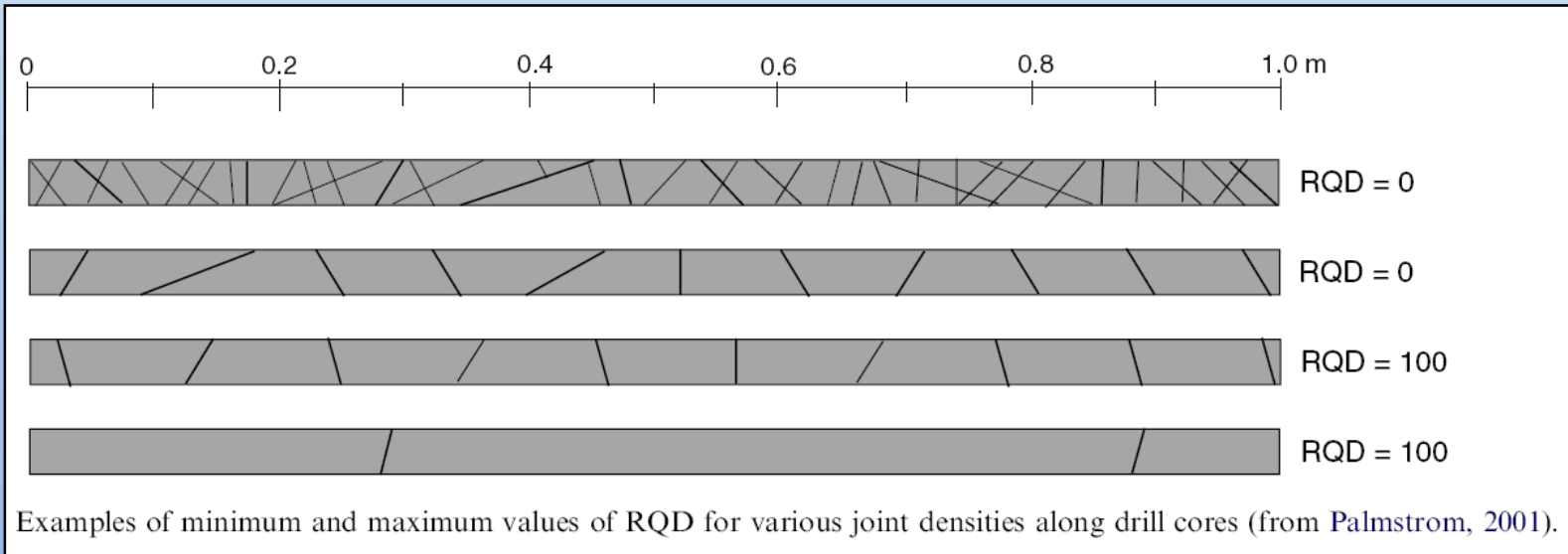
¿qué dificultades tiene su aplicación en rocas volcánicas?

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

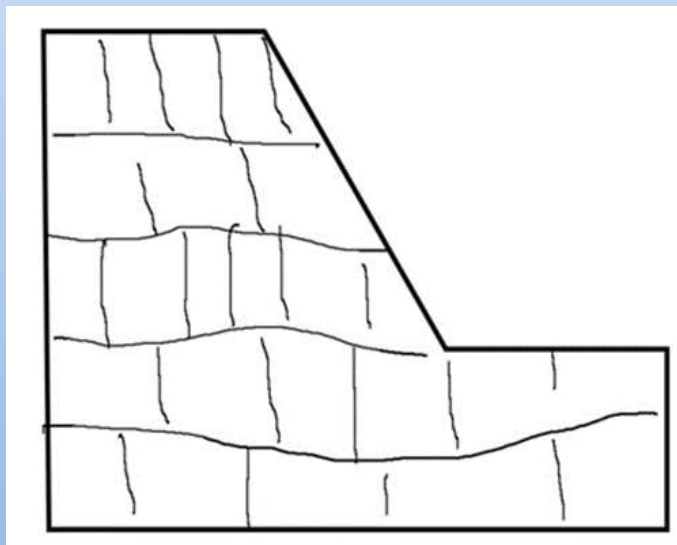


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

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.

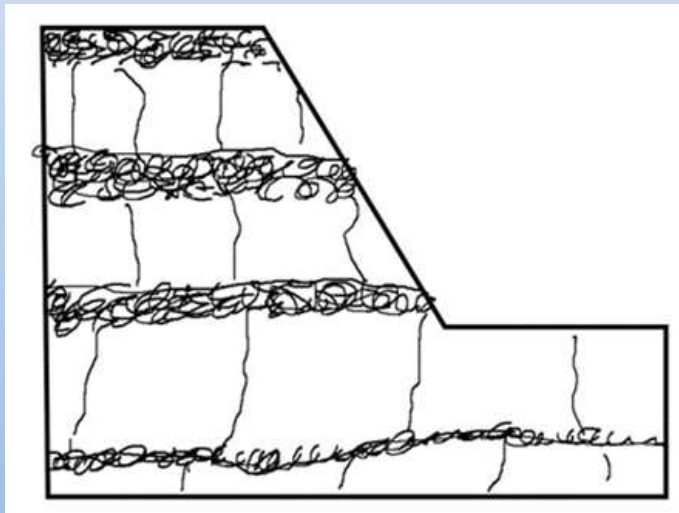


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

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.



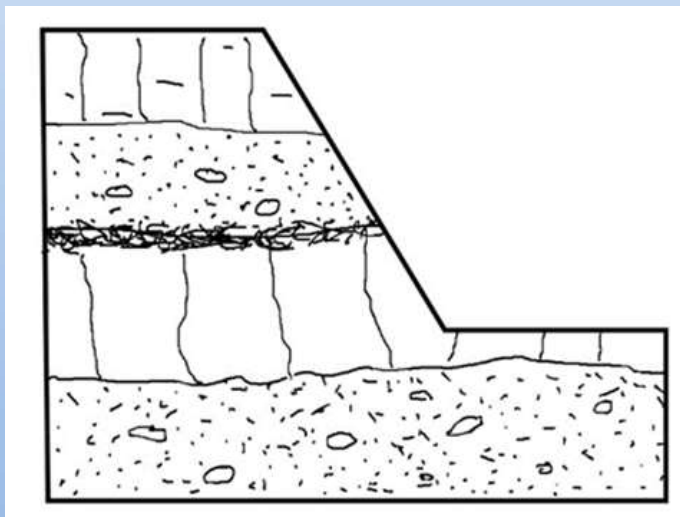
3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

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.

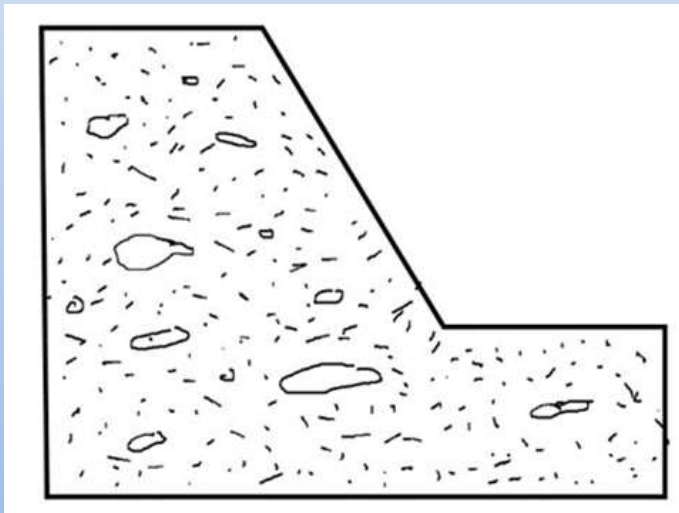


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

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

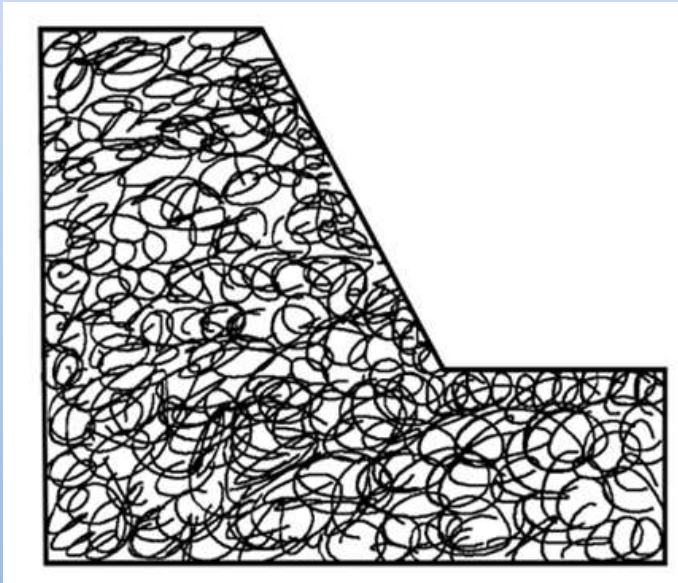


3. Tipos de taludes en rocas volcánicas

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

Resistencia de la roca	Matriz rocosa (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



4. Selección de parámetros en macizos volcánicos

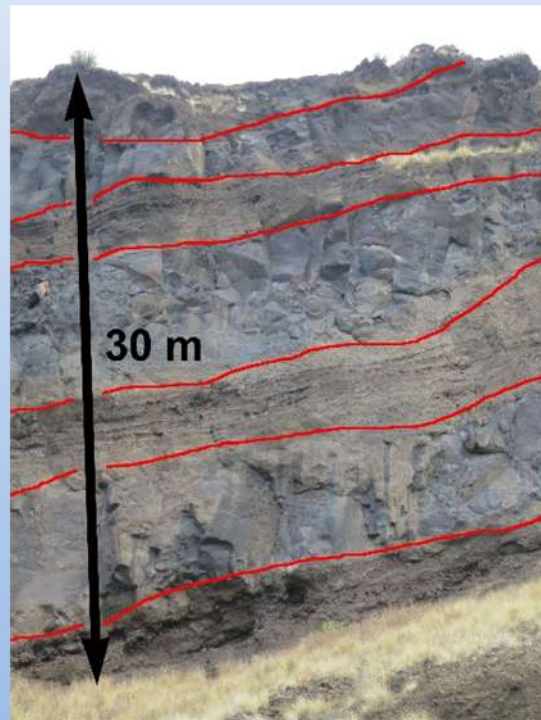
- **Índice de Heterogeneidad del macizo (IH)**

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.

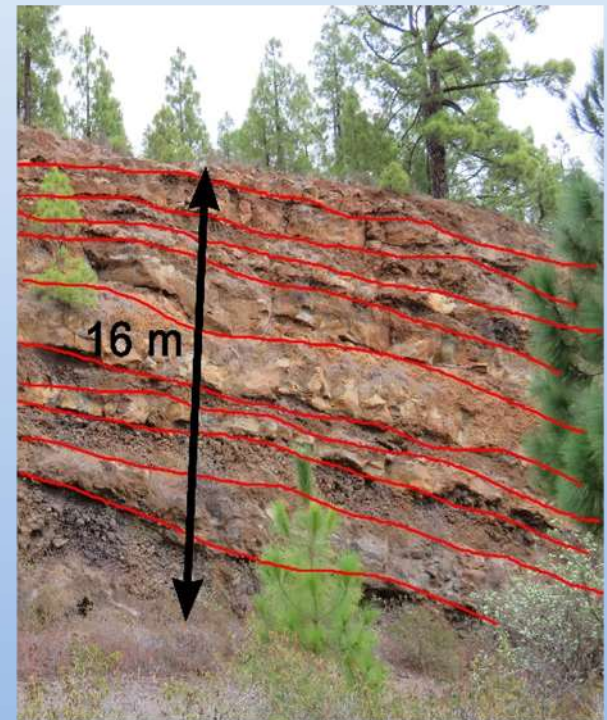
Se ha denominado **Índice de heterogeneidad (IH)** y se define como 100 veces el número de cambios de litología que hay en la vertical de un talud dividido por su altura



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



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



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

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.



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. Campañas 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

5. Ficha de toma de datos de taludes

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

ESQUEMA

5
4
3
2
1
GRADO DE ESTABILIDAD

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

Medidas de contención: _____

6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos



6. Campañas de toma de datos

T-23

Localización: La Tarta
 Carretera: TF-24
 p.k.: 32
 Coordenadas: 28.384471, -16.489994
 Altura 10 Pendiente: 50 90t Anchura: 60

Descripción: Almacén Capen proclisis hecas de diferente naturaleza desde su nacimiento. Piroclastos sueltos y soldados de diferente erosividad resulta en viscosas. Evento de caída 2.8 m³



5
4
3
2
1
GRADO DE ESTABILIDAD

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 IV (m) <1	0,2-10 1-5	0,01-0,2 5-10	0,0002-0,01 10-50	<0,0002 >50	
Características de las discontinuidades	Continuidad (m)	8-10	8-10	10-20	>20	
	Apertura (mm)	cerca de 0	<0,1	0,1-1	1-5	
	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 70?	
Alteración del macizo (ISRM 1981)	I	II	III	IV	V-VI	
Geometría del talud	Efectividad de la cuneta	buen captación	captación moderada	captación limitada	sin captación	sin cuneta
	Altura del talud (m)	<5	5-10	10-20	20-30	>30
	Pendiente del talud	67.5°	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	30°	30-20°	20-10°	10-5°	5°
	Buzamiento	<30°	20°-30°	30°-35°	35-45°	45°
Tamaño de bloque (m)	0,25	0,5	1	1,5	2	
Volumen total del evento (m ³)	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	

Medidas de contención: estante No

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	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	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	5	5	5	5	4	5	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	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	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	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	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	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	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		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	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

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.

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.

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

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

```
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))])

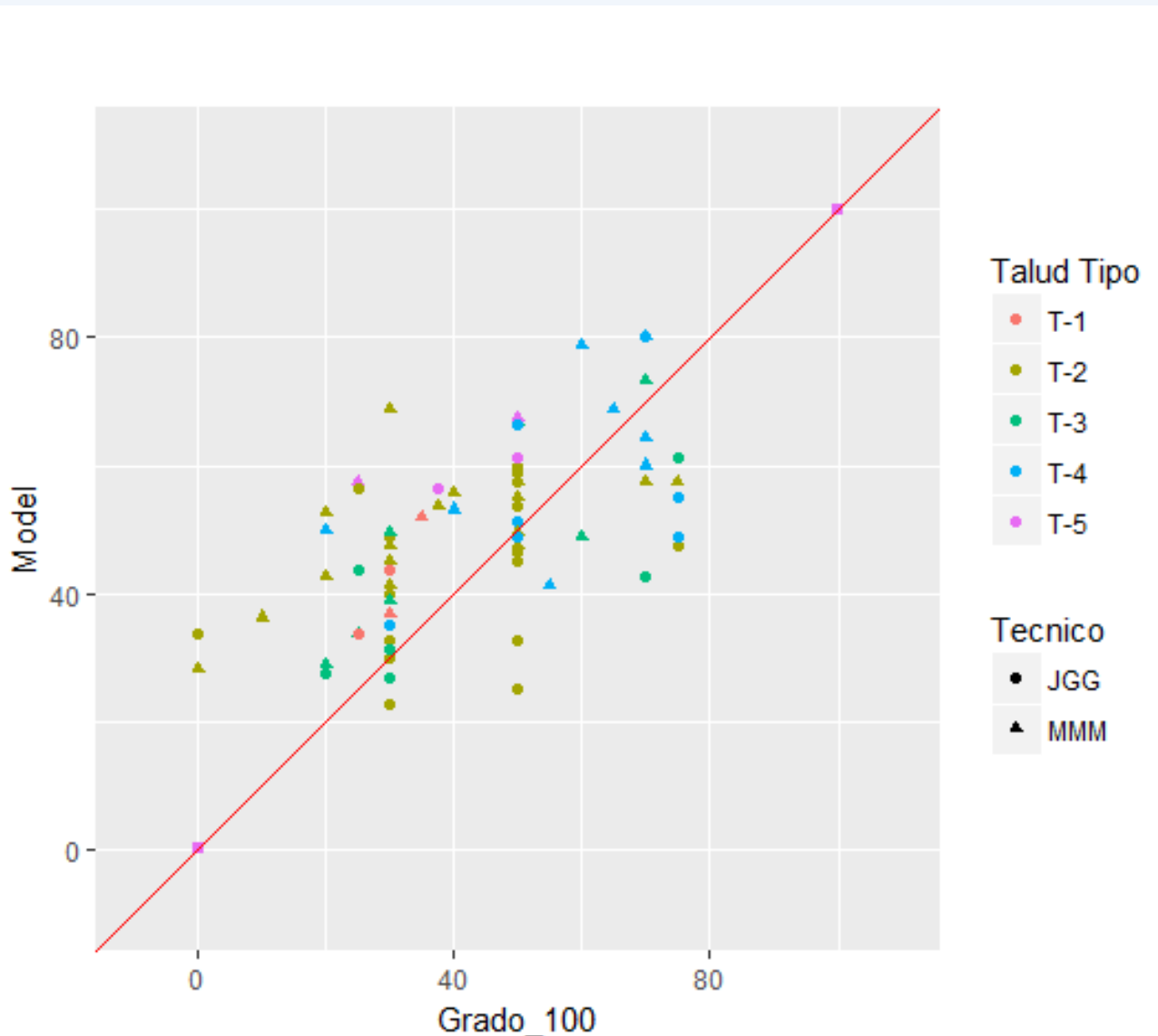
summary(Mod)

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)

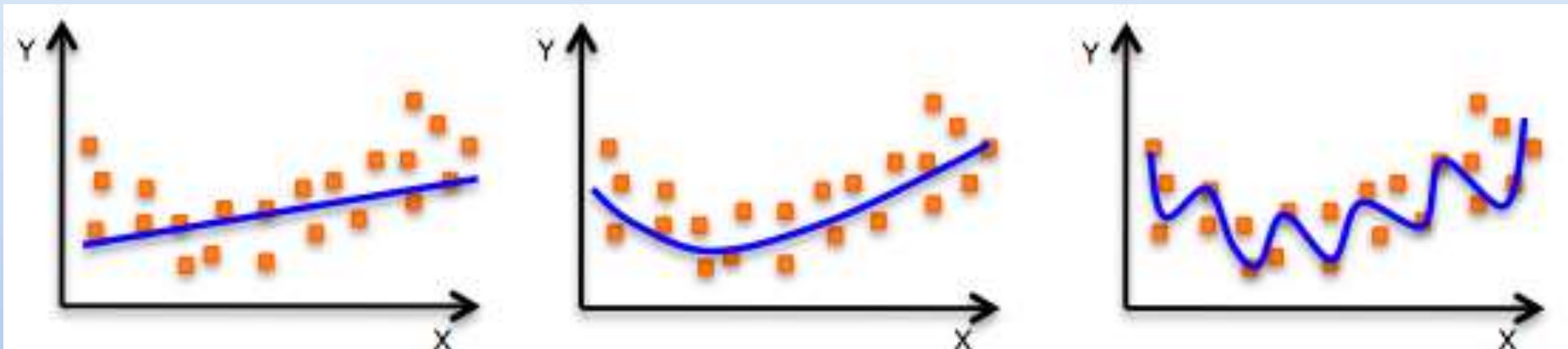
Residuals:      Min 1Q  Median  3Q  Max -23.807 -5.873  1.745  5.610 24.295
Coefficients:   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
Resist          10.9983   10.1658  1.082  0.28691
Tam_bloque       3.0089    7.2458  0.415  0.68056
Continuidad     14.7855    8.8685  1.667  0.10466
Alteracion       2.7243   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	20
Tamaño de bloque (fracturación)	5
Continuidad	10
Apertura	20
Índice de Heterogeneidad (IH)	5
Regularidad de la cara del talud	15
Tamaño de bloques inestables	25

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	20	15	10	5	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
Continuidad de las juntas (m)		<1	1-3	3-10	10-20	>20
	Puntos	10	8	5	2	0
Apertura de las juntas (mm)		cerrada	<0,1	,1-1	1-5	>5
	Puntos	20	15	10	5	0
Índice de heterogeneidad (IH)		0	1 - 35	35 - 70	70 - 100	> 100
	Puntos	5	4	2	1	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 50cm de profundidad Varias capas susceptibles a la erosión	Bastante irregular Más el 50% del talud ocupado por huecos/cavidades/viseras de 50cm a 1m Algunas capas con alta susceptibilidad a la erosión	Muy irregular más del 50% del talud ocupado por cavidades/viseras >1m de profundidad Muchas Capas con alta susceptibilidad a la erosión
	Puntos	15	12	8	4	0
Tamaño del bloque inestable (m)		0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 1	1 - 3	> 3
	Puntos	25	19	13	7	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 (40) 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

Se han seleccionado parámetros geotécnicos con influencia en la estabilidad de taludes en macizos volcánicos.

Se han definido índices específicos: Regularidad, índice de heterogeneidad (IH)

Primeras dos campañas de toma de datos en 40 taludes en rocas volcánicas de Tenerife. Una tercera campaña en Gran Canaria en marcha.

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

VARIABLES SELECCIONADAS: Tamaño del bloque inestable, Resistencia de la roca, Apertura de las discontinuidades, Regularidad de la cara del talud, Continuidad de las discontinuidades, Tamaño del bloque (Grado de fracturación) e Índice de Heterogeneidad.

El análisis de un mayor número de casos permitiría ajustar mejor la puntuación.

Es posible que los criterios deban ser diferentes según el tipo de composición del macizo.



**¡PELIGRO!
DESPRENDIMIENTOS**

¡ALTO! NO PASAR

PROYECTO

MACASTAB

Interreg

Fondo Europeo de Desarrollo Regional



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 Muñoz Menéndez*

** Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)*



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS