

IMPLICACIONES GEOTÉCNICAS DE LAS SUCESIVAS REACTIVACIONES DEL DESLIZAMIENTO DE PAJONALES- ROSIANA (DEPRESIÓN DE TIRAJANA, GRAN CANARIA)

**MARTÍN JESÚS RODRÍGUEZ-PECES^{1*}, JORGE YEPES², MEAZA TSIGE¹,
BELÉN CARRERA¹**

¹ Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040. Madrid.
martinjr@geo.ucm.es

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017. Las Palmas.

RESUMEN

En este trabajo se identifican los factores que han contribuido al desarrollo y reactivación del deslizamiento de Pajonales-Rosiana. Para ello, se ha reconstruido la paleotopografía previa al deslizamiento, se ha establecido un modelo geológico de la ladera en función de la observación directa y datos de los mapas geológicos, y se ha generado un modelo geotécnico con datos bibliográficos y datos propios obtenidos en ensayos de laboratorio. Las superficies de rotura del deslizamiento de Pajonales-Rosiana se han desarrollado a través de tobas piroclásticas e ignimbritas que, al ser meteorizadas, desarrollan niveles limo-arcillosos con ángulos de fricción bajos, alta plasticidad y comportamiento expansivo. Por otra parte, la presencia de agua constituyó un factor desencadenante del deslizamiento, ya que para que se produzca la inestabilidad es necesaria la saturación total de las ignimbritas del Grupo Mogán y la saturación parcial de las lavas y piroclastos del Grupo Roque Nublo.

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera de distintos tamaños son un fenómeno frecuente en las Islas Canarias (Carracedo et al., 2009). Estos son debidos a diferentes causas: materiales de distinta

competencia, morfologías volcánicas, precipitaciones y, con menos frecuencia, esfuerzos tectónicos y volcánicos. Todos estos factores hacen complejo el análisis de la generación, desarrollo y reactivación de inestabilidades de ladera. En este trabajo se estudia un paleo-deslizamiento de gran tamaño, el deslizamiento de Pajonales-Rosiana, localizado en la Depresión de Tirajana, en el sur de Gran Canaria (Islas Canarias, España). Esta inestabilidad de ladera es especialmente relevante dentro de los numerosos deslizamientos que se encuentran en la Depresión de Tirajana (Lomoschitz, 1999; Lomoschitz et al., 2002), ya que es una de las de mayor extensión (560 ha) y ha experimentado sucesivas reactivaciones a lo largo del tiempo, la última en el año 1956. El principal interés que presenta el estudio de las inestabilidades de ladera en la Depresión de Tirajana es el riesgo que suponen debido al gran volumen de las masas deslizadas y a la proximidad de las poblaciones, estando algunas de ellas incluso asentadas sobre estas masas. Entre los factores que pueden controlar estas inestabilidades se han citado varios: el desarrollo de niveles de materiales finos que pueden suponer potenciales superficies de despegue (Pérez-Romero et al., 2007), el intenso encajamiento de los escarpes durante los episodios de mayor pluviosidad ocurridos en el Cuaternario (Meco et al., 2006), la verticalidad de los escarpes debido al espesor de las coladas y la existencia de fracturas previas y de disyunción columnar que puedan suponer zonas de debilidad (Yepes and Lomoschitz, 2008; 2009a; 2009b), y la actividad sísmo-volcánica (Lomoschitz et al., 2008). No obstante, todo parece indicar que la generación, el desarrollo y la reactivación de estos movimientos de ladera no se debe a la acción de uno único factor, sino a la interacción compleja de varios factores geológicos, geotécnicos y geomorfológicos.

Este trabajo identifica los factores que han contribuido al desarrollo y reactivación continua del deslizamiento de Pajonales-Rosiana mediante un análisis retrospectivo de la estabilidad. Para ello, se ha reconstruido la paleotopografía de la ladera previa al deslizamiento, se ha establecido un modelo geológico de la ladera a partir de la cartografía existente matizada con observaciones de campo, y se ha generado un modelo geotécnico a partir de datos bibliográficos, complementados con datos propios obtenidos en ensayos de laboratorio.

2. METODOLOGÍA

En primer lugar, se realizó una campaña de campo para reconocer la masa deslizada y definir un perfil longitudinal del deslizamiento de Pajonales-Rosiana, a lo largo del cual, se recogieron nueve muestras representativas de los materiales reconocidos en los diferentes escarpes secundarios que compartimentan el depósito. Las muestras recogidas se identificaron de visu y al microscopio petrográfico para identificar los minerales principales, la fábrica y el grado de alteración de la matriz. Además, en algunas muestras se realizó un estudio de la composición mineralógica de las arcillas mediante difracción de rayos X. Este análisis se realizó con la fracción fina de la matriz (inferior a 2 micras), aplicando la técnica de agregados orientados. Las muestras fueron sometidas al tratamiento térmico (550 °C) y a solvatación con etilenglicol.

Las características geotécnicas de los materiales involucrados en el depósito de Pajonales-Rosiana se han establecido mediante ensayos de laboratorio y datos bibliográficos. Los ensayos realizados comprenden: análisis granulométrico, determinación de los límites de Atterberg, determinación de la densidad seca, estimación de la resistencia al corte directo y determinación de la presión de hinchamiento. La caracterización geotécnica de estos materiales ha sido completada con las propiedades geotécnicas publicadas por otros autores para los principales litotipos volcánicos identificados en las Islas Canarias (González de Vallejo et al., 2005 y 2008; Rodríguez-Losada et al., 2009; Serrano et al., 2007; Rodríguez-Peces et al., 2013).

Una vez establecido el modelo geológico-geotécnico del deslizamiento se ha realizado un análisis retrospectivo de la estabilidad de la ladera mediante el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price. Para ello se utilizó el programa Slide 6.0 (Rocscience Inc., 2010). Primero se reconstruyó la paleotopografía previa al deslizamiento y se generó un perfil topográfico de la ladera por interpolación de perfiles adyacentes en los que se observan los mismos materiales sin movilizar. A partir de este perfil se ha realizado un análisis de sensibilidad considerando 14 casos diferentes. Para ello, se han combinado los valores de las propiedades geotécnicas (medios y mínimos) con diferentes grados de saturación de los materiales (parcial o total).

3. EL DESLIZAMIENTO DE PAJONALES-ROSIANA

Las dimensiones de la masa deslizada son considerables: tiene una longitud máxima de 4 km, recubre una extensión de 5,6 km² y ocupa un volumen de 1,16 km³ (Lomoschitz et al., 2002). La diferencia de cota entre el escarpe superior y el pie es de unos 1000 m. Los materiales involucrados pertenecen a los depósitos volcánicos del Grupo Roque Nublo y del Grupo Post-Roque Nublo (Fig. 1). Son materiales emitidos en los últimos 5,5 Ma que están constituidos por sucesiones de lavas basálticas con intercalaciones de piroclastos de caída. De este modo, el macizo rocoso presenta un grado de competencia y de soldadura muy variables, que condicionan la existencia de una fuerte anisotropía en la vertical.

Se ha observado que el escarpe principal del deslizamiento coincide con la orientación que definen los diques y conos piroclásticos alineados de los Grupos Roque Nublo y Post-Roque Nublo que se localizan en la cabecera del escarpe. Esto permite suponer que el escarpe del deslizamiento se desarrolló a favor de una franja sometida a esfuerzos de tracción, que suelen ser zonas susceptibles de experimentar una rotura frágil. Por otra parte, a muro del depósito y coincidiendo con el fondo del barranco principal (Barranco de Tirajana), se observa una ignimbrita riolítico-traquítica peralcalina del Grupo Mogán (14-13,3 Ma). Esta formación constituye el material de relleno de la caldera del volcán Fataga y se encuentra afectada por un proceso de alteración hidrotermal muy penetrativo que le confiere un aspecto rojizo. Todas estas observaciones sugieren que la superficie basal del deslizamiento se habría desarrollado en estos materiales.

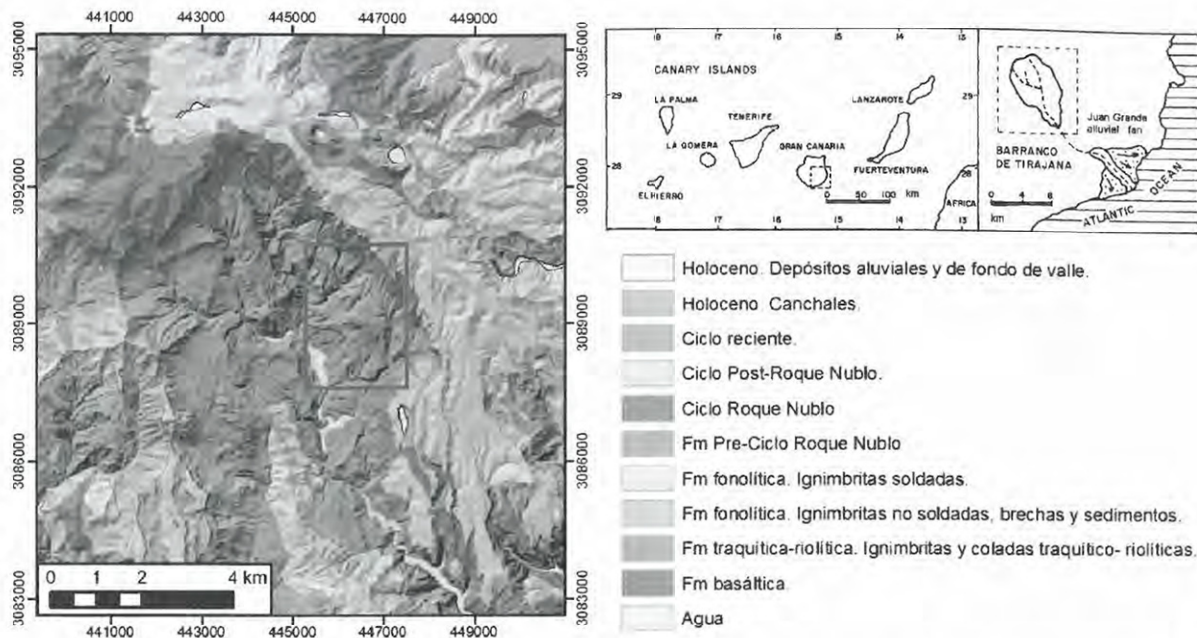


Figura 1. Mapa de formaciones geológicas del extremo nororiental de la Depresión de Tirajana (simplificado de Balcells et al., 1990 y Barrera et al., 1990). El sector donde se localiza el deslizamiento de Pajonales-Rosiana se indica con un rectángulo rojo.

La masa deslizada de Pajonales-Rosiana comprende varios bloques desmembrados (Fig. 2) que indican la existencia de sucesivas generaciones de movimientos separados en el tiempo. El primer cuerpo deslizado (Pajonales I) se encuentra en la zona de cabecera y está formado por materiales lávicos y piroclásticos del Grupo Roque Nublo. El siguiente cuerpo (Pajonales II) es el más extenso y ocupa el tramo medio de la ladera. El fondo del valle está recubierto por el bloque de Pajonales III y un depósito de derrubios (Pajonales IV o Rosiana) que ha experimentado varios flujos en las inmediaciones de Rosiana durante el periodo histórico. Estas reactivaciones se encuentran documentadas entre los años 1879 y 1956 (Lomoschitz y Corominas, 1997) y estarían relacionadas con periodos de lluvias intensas y prolongadas. En términos generales, se observa que la fábrica y la resistencia de los cuerpos deslizados presentan una correlación inversa con el aumento de la alteración que experimentan los bloques rocosos a medida que se ven afectados por las sucesivas reactivaciones.

4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Durante la campaña de campo se recogieron nueve muestras representativas de todo el depósito que corresponderían a los materiales considerados como susceptibles de condicionar la inestabilidad gravitacional (Fig. 2). En particular, las muestras se tomaron en distintos puntos dentro de los escarpes de los sucesivos deslizamientos. La mayoría de los materiales muestreados proceden de niveles de tobas y piroclastos de composición basáltica o traquítica.

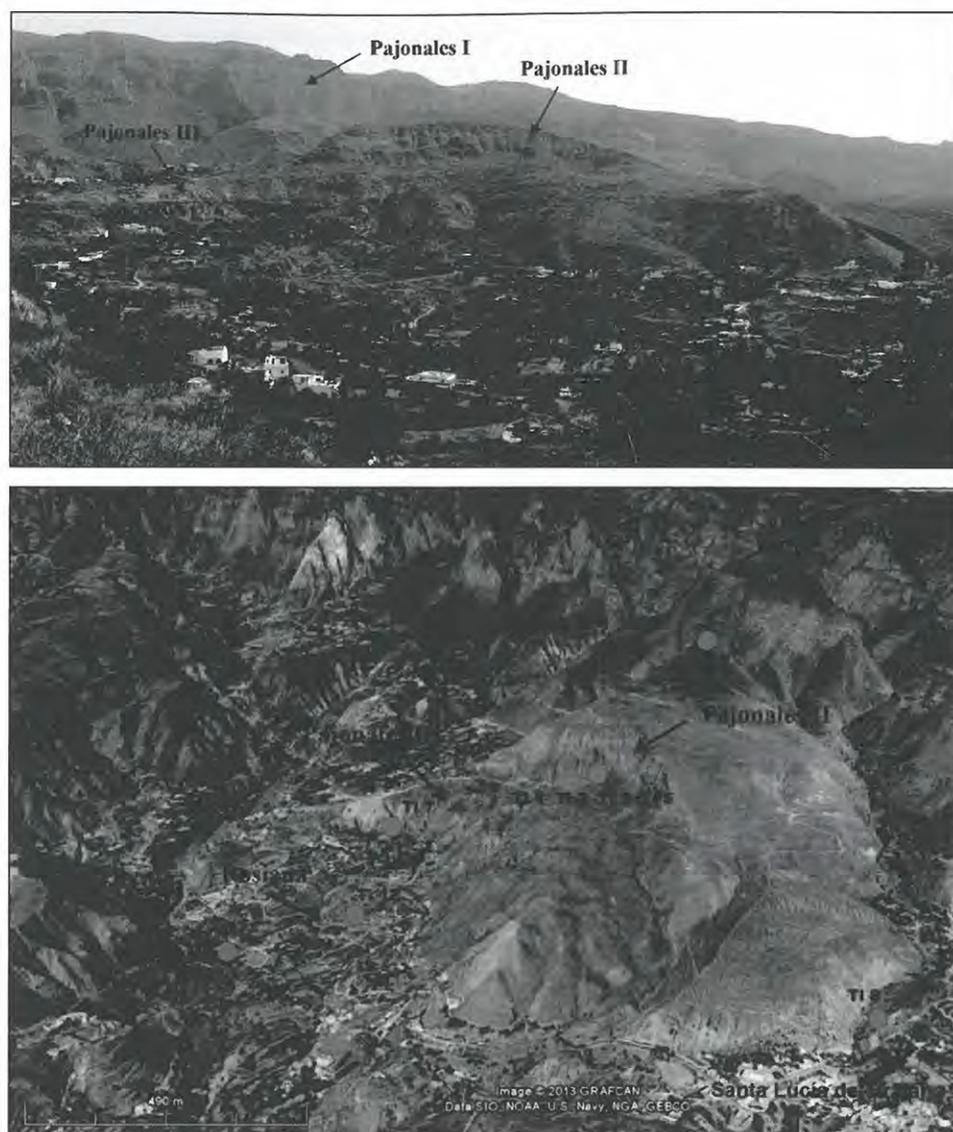


Figura 2. Panorámica (superior) y vista oblicua 3D (inferior) del deslizamiento de Pajonales-Rosiana indicando los escarpes principales de las distintas masas deslizadas (Pajonales I, II, III y Rosiana) y la localización de las nueve muestras recogidas.

Los fragmentos piroclásticos presentan abundante porosidad, mientras que las tobas presentan una matriz de grano fino. Las muestras de las zonas distales presentan una estructura más alterada y triturada que las correspondientes a las zonas proximales, pero en ningún caso han conservado su estructura original. Por otra parte, la descripción de las láminas delgadas muestra la existencia de una intensa microfracturación y de una alteración por oxidación en todas las muestras. Todas estas observaciones sugieren que los materiales han sido removilizados y expuestos a la intemperie.

Atendiendo a la granulometría, la mayoría de las muestras se pueden clasificar como arenas con un alto contenido en finos (34 %). Esta proporción es mucho mayor (90 %) en las muestras de los cuerpos distales (Ti 7, Ti 12). Atendiendo solo a la consistencia de la fracción fina, las muestras se pueden clasificar como limos-arcillosos con una plasticidad variable (Fig. 3). Los valores más altos corresponden a la muestra Ti 12 (límite líquido > 50 %). Tres muestras presentan valores de plasticidad medios (Ti 8, Ti 14 y Ti 7) y el resto, no presentan plasticidad significativa.

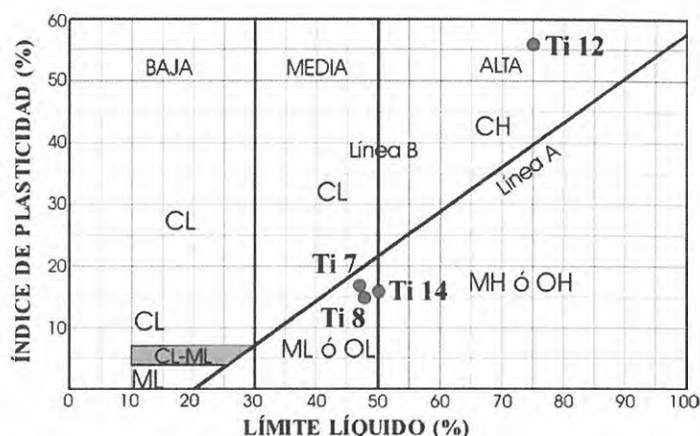


Figura 3. Carta de plasticidad de Casagrande. Sólo se ha representado las muestras que presentan plasticidad. Nótese que la muestra Ti 12 presenta una plasticidad muy alta en comparación con el resto de muestras.

Los valores de las densidades secas presentan una notable dispersión. Hay muestras con valores altos (2,0-2,3 g/cm³), propios de materiales densos, y muestras con valores muy bajos (1,2-1,3 g/cm³). Estos resultados reflejan el diferente grado de competencia que presentan los materiales que forman la masa deslizada: fragmentos de coladas de lava y de piroclastos).

El resto de los ensayos, solo se realizaron con la muestra Ti-12, a la que se consideró más crítica por su mayor contenido en arcillas y su alto índice de plasticidad (56 %). Así, se realizó un análisis de la matriz por difracción de rayos X, se determinaron los parámetros resistentes en el ensayo de corte directo y se estimó la presión de hinchamiento en el edómetro.

El resultado de la difracción de rayos X indica la presencia de minerales de la arcilla. Este hecho concuerda con el grado de alteración que presenta la muestra. Los patrones de la difracción (Fig. 4) muestran la reflexión típica de una asociación de minerales interestratificados (R1) de tipo illita/esmectita y la presencia de una pequeña cantidad de caolinita (Moore and Reynolds, 1989). La existencia de esta fase mineral en las rocas volcánicas ácidas ha sido atribuida a un estado inicial de la alteración hidrotermal (de la Fuente et al., 2000).

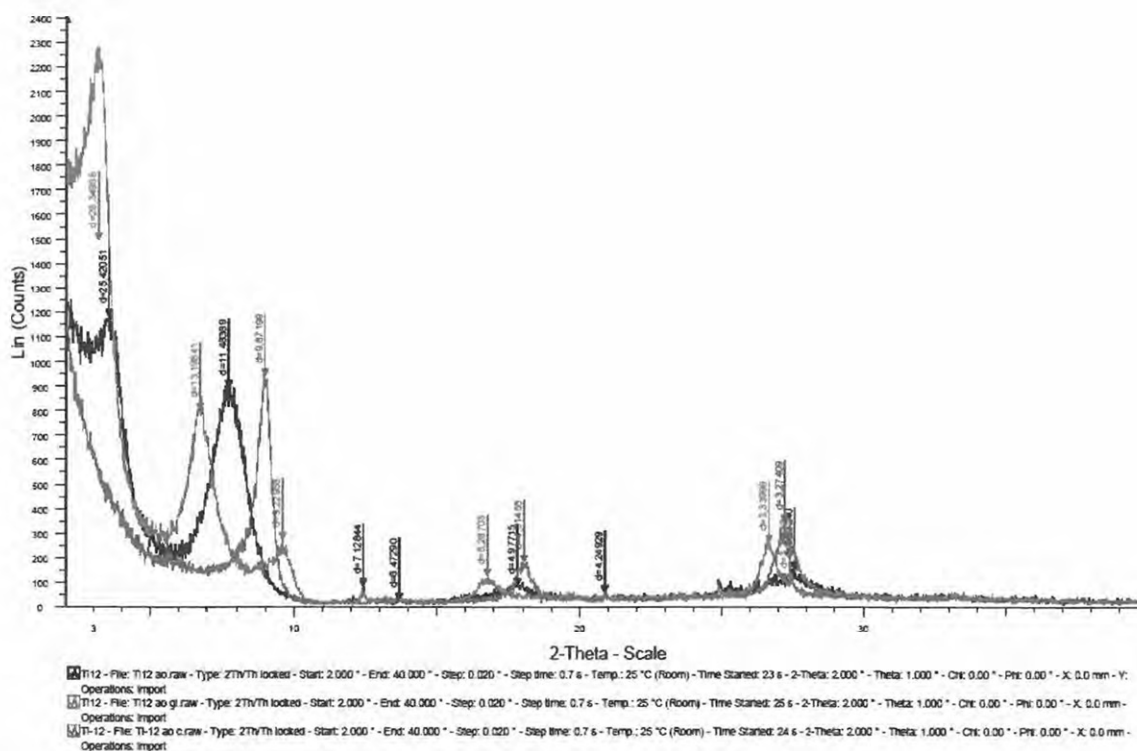


Figura 4. Difractogramas de los agregados orientados de la fracción arcillosa inferior a 2 micras secada al aire (gráfica negra), solvatada con etilenglicol (gráfica roja) y calentada a 550°C (gráfica azul) de la muestra Ti 12.

Los parámetros resistentes obtenidos en el ensayo de corte directo (Tabla 1) muestran unos valores de cohesión y de ángulo de rozamiento interno que no son tan bajos como cabría esperar de un material con abundante fracción fina y elevada plasticidad. Sin embargo, contribuyen a la generación de inestabilidades de ladera si la pendiente es elevada.

Parámetros de pico		Parámetros residuales	
c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	φ (°)
0,35	35	0	32

Tabla 1. Resultados del ensayo de resistencia al corte directo obtenidos para la muestra Ti 12.

Por último, los valores de la presión de hinchamiento obtenidos (1,15-1,5 kg/cm²) indican que el material tiende a hinchar en contacto con agua.

Todas estas observaciones realizadas en los materiales piroclásticos permiten suponer que la muestra Ti 12 corresponde al material más susceptible de sufrir deslizamientos de entre todos los muestreados y que podría desencadenar una inestabilidad de ladera si experimenta fenómenos de expansión e hinchamiento. Esta circunstancia estaría relacionada con su elevado contenido en arcillas y su alto índice de plasticidad (56 %).

Por lo que respecta a la caracterización geotécnica de los materiales rocosos implicados en el deslizamiento de Pajonales-Rosiana, se han asumido los valores medios y mínimos publicados en trabajos previos (Tabla 2).

Material	Valores medios			Valores mínimos		
	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)
Basaltos escoriáceos	0,15	35	20	0,15	33	13
Basaltos masivos y vesiculares	0,35	45	22	0,29	40	16
Tobas alteradas (piroclastos)	0,7	18	21	0	16	19
Ignimbritas	0,7	31	17,5	0,2	27	12
Aglomerados	0,4	30	-	0,4	25	-
Depósitos piroclásticos	0,1	35	23,5	0,1	32	22

Tabla 2. Parámetros geotécnicos empleados en el análisis de estabilidad retrospectivo del deslizamiento de Pajonales-Rosiana. c: cohesión, ϕ : ángulo de rozamiento interno, γ : peso específico. Valores tomados de González de Vallejo et al. (2005 y 2008), Rodríguez-Losada et al. (2009), Serrano et al. (2007) y Rodríguez-Peces et al. (2013).

5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se ha generado un modelo geológico-geotécnico de la ladera (Fig. 5a) a partir de la topografía previa al deslizamiento. Esta paleotopografía se ha restituido mediante correlación de la estratigrafía y de las superficies de erosión. En este modelo se han diferenciado cinco materiales. De arriba a abajo, serían los siguientes: 1) Lavas y piroclastos del Grupo Post-Roque Nublo (100-200 m de espesor); 2) Tobas basálticas (piroclastos) del Grupo Post-Roque Nublo (20-30 m de espesor); 3) Brecha Roque Nublo, conos piroclásticos y diques orientados en dirección NO-SE del Grupo Roque Nublo (80-100 m de espesor); 4) Lavas basálticas escoriáceas del Grupo Roque Nublo con intercalación de piroclastos y diques NO-SE (≥ 200 m de espesor); y 5) Ignimbritas y coladas riolítico-traquíticas del Grupo Mogán. Además, hay que tener en cuenta que el macizo rocoso es anisótropo en la vertical debido a la alternancia de niveles de diferente competencia (lavas y piroclastos) y que los niveles de coladas presentan disyunción columnar (grietas de tracción subverticales).

A continuación se ha realizado un análisis de estabilidad retrospectivo con todas las posibles superficies de rotura entre el pie y la cabecera de la ladera. Entre todas las opciones se ha elegido una superficie que se considera representativa para justificar la primera generación de deslizamientos, que dio lugar al bloque de Pajonales I. Esta elección se ha basado en criterios geomorfológicos y geotécnicos y tiene en cuenta los materiales involucrados (Fig. 5b). En concreto, el mecanismo de rotura del deslizamiento se ha inferido por análisis comparado de la geometría que presenta la zona deslizada y sus alrededores. El límite inferior del deslizamiento se ha establecido por un criterio geológico-geotécnico: la presencia de niveles con una resistencia muy baja coincidiendo con en el fondo del barranco de Tirajana. Estos niveles corresponden a piroclastos e ignimbritas alteradas a minerales de la arcilla que definen el contacto superior de las ignimbritas del Grupo Mogán.

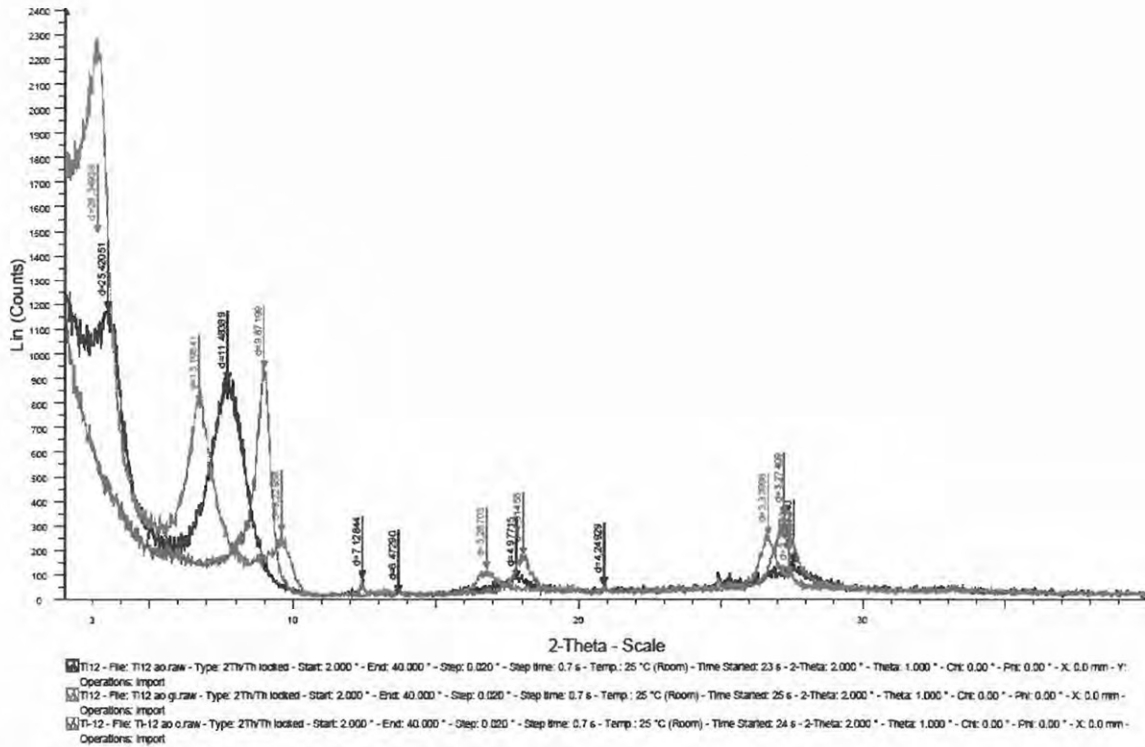


Figura 4. Difractogramas de los agregados orientados de la fracción arcillosa inferior a 2 micras secada al aire (gráfica negra), solvatada con etilenglicol (gráfica roja) y calentada a 550°C (gráfica azul) de la muestra Ti 12.

Los parámetros resistentes obtenidos en el ensayo de corte directo (Tabla 1) muestran unos valores de cohesión y de ángulo de rozamiento interno que no son tan bajos como cabría esperar de un material con abundante fracción fina y elevada plasticidad. Sin embargo, contribuyen a la generación de inestabilidades de ladera si la pendiente es elevada.

Parámetros de pico		Parámetros residuales	
c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	φ (°)
0,35	35	0	32

Tabla 1. Resultados del ensayo de resistencia al corte directo obtenidos para la muestra Ti 12.

Por último, los valores de la presión de hinchamiento obtenidos (1,15-1,5 kg/cm²) indican que el material tiende a hinchar en contacto con agua.

Todas estas observaciones realizadas en los materiales piroclásticos permiten suponer que la muestra Ti 12 corresponde al material más susceptible de sufrir deslizamientos de entre todos los muestreados y que podría desencadenar una inestabilidad de ladera si experimenta fenómenos de expansión e hinchamiento. Esta circunstancia estaría relacionada con su elevado contenido en arcillas y su alto índice de plasticidad (56 %).

Por lo que respecta a la caracterización geotécnica de los materiales rocosos implicados en el deslizamiento de Pajonales-Rosiana, se han asumido los valores medios y mínimos publicados en trabajos previos (Tabla 2).

Material	Valores medios			Valores mínimos		
	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)
Basaltos escoriáceos	0,15	35	20	0,15	33	13
Basaltos masivos y vesiculares	0,35	45	22	0,29	40	16
Tobas alteradas (piroclastos)	0,7	18	21	0	16	19
Ignimbritas	0,7	31	17,5	0,2	27	12
Aglomerados	0,4	30	-	0,4	25	-
Depósitos piroclásticos	0,1	35	23,5	0,1	32	22

Tabla 2. Parámetros geotécnicos empleados en el análisis de estabilidad retrospectivo del deslizamiento de Pajonales-Rosiana. c: cohesión, ϕ : ángulo de rozamiento interno, γ : peso específico. Valores tomados de González de Vallejo et al. (2005 y 2008), Rodríguez-Losada et al. (2009), Serrano et al. (2007) y Rodríguez-Peces et al. (2013).

5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se ha generado un modelo geológico-geotécnico de la ladera (Fig. 5a) a partir de la topografía previa al deslizamiento. Esta paleotopografía se ha restituido mediante correlación de la estratigrafía y de las superficies de erosión. En este modelo se han diferenciado cinco materiales. De arriba a abajo, serían los siguientes: 1) Lavas y piroclastos del Grupo Post-Roque Nublo (100-200 m de espesor); 2) Tobas basálticas (piroclastos) del Grupo Post-Roque Nublo (20-30 m de espesor); 3) Brecha Roque Nublo, conos piroclásticos y diques orientados en dirección NO-SE del Grupo Roque Nublo (80-100 m de espesor); 4) Lavas basálticas escoriáceas del Grupo Roque Nublo con intercalación de piroclastos y diques NO-SE (≥ 200 m de espesor); y 5) Ignimbritas y coladas riolítico-traquíticas del Grupo Mogán. Además, hay que tener en cuenta que el macizo rocoso es anisótropo en la vertical debido a la alternancia de niveles de diferente competencia (lavas y piroclastos) y que los niveles de coladas presentan disyunción columnar (grietas de tracción subverticales).

A continuación se ha realizado un análisis de estabilidad retrospectivo con todas las posibles superficies de rotura entre el pie y la cabecera de la ladera. Entre todas las opciones se ha elegido una superficie que se considera representativa para justificar la primera generación de deslizamientos, que dio lugar al bloque de Pajonales I. Esta elección se ha basado en criterios geomorfológicos y geotécnicos y tiene en cuenta los materiales involucrados (Fig. 5b). En concreto, el mecanismo de rotura del deslizamiento se ha inferido por análisis comparado de la geometría que presenta la zona deslizada y sus alrededores. El límite inferior del deslizamiento se ha establecido por un criterio geológico-geotécnico: la presencia de niveles con una resistencia muy baja coincidiendo con en el fondo del barranco de Tirajana. Estos niveles corresponden a piroclastos e ignimbritas alteradas a minerales de la arcilla que definen el contacto superior de las ignimbritas del Grupo Mogán.

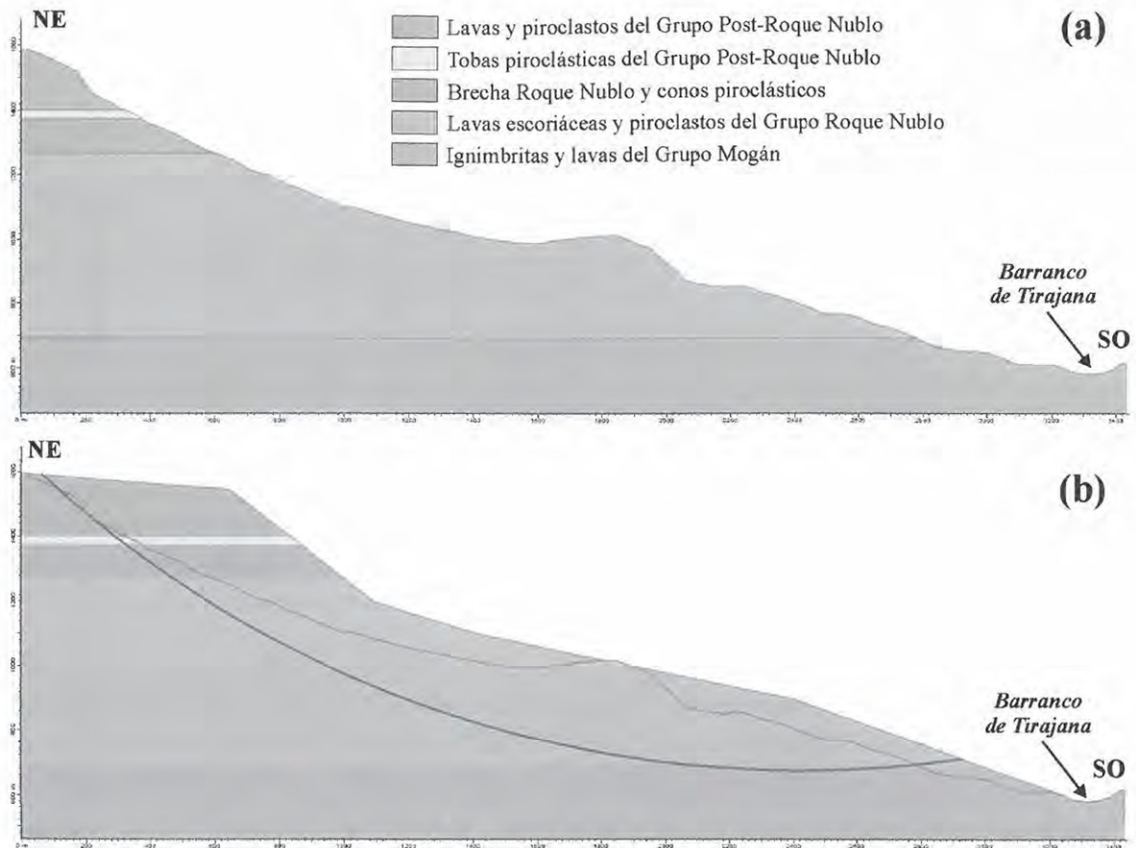


Figura 5. (a) Modelo geológico-geotécnico considerando la topografía actual en el que se muestra la relación existente entre las unidades litológicas presentes. (b) Modelo geológico-geotécnico considerando la topografía reconstruida previa al deslizamiento y la superficie de rotura elegida para el deslizamiento de Pajonales I (línea roja).

Teniendo en cuenta la superficie de rotura elegida, se ha realizado un estudio de sensibilidad en el que se han considerado 14 casos diferentes. Para ello, se han modificado las propiedades geotécnicas de los materiales dentro de los valores medios y mínimos establecidos (Tablas 1 y 2) y se han considerado diferentes grados de saturación en agua (parcial o total) de las capas:

- Caso 1: se han utilizado valores medios en las propiedades de los materiales y considerado el terreno seco.
- Caso 2: se han considerado los valores mínimos y el terreno seco.
- Caso 3: se han considerado los valores medios y se ha incluido, además, los valores pico de la muestra ensayada Ti 12 en los niveles de piroclastos.
- Caso 4: Valores medios y valores residuales de la muestra Ti 12 en los niveles de piroclastos.
- Caso 5: Valores medios y saturación del 100 % de la capa de ignimbrita situada a la base del deslizamiento.
- Caso 6: Valores mínimos y saturación del 100 % de la capa de ignimbrita.

- Caso 7: Valores medios, valores pico de la muestra Ti 12 en los piroclastos y saturación del 100 % de la ignimbrita.
- Caso 8: Valores medios, valores residuales de la muestra Ti 12 en los piroclastos y saturación del 100% de la ignimbrita.
- Caso 9: Valores medios e incorporación de parámetros de toba alterada en los piroclastos.
- Caso 10: Valores mínimos y parámetros de toba alterada en los piroclastos.
- Caso 11: Valores medios, incorporación de toba alterada y saturación del 100 % de la ignimbrita.
- Caso 12: Valores mínimos, incorporación de toba alterada y saturación del 100 % de la ignimbrita.
- Caso 13: Valores mínimos, incorporación de toba alterada, saturación del 100 % de la ignimbrita y saturación del 25 % de las lavas y piroclastos del Grupo Roque Nublo.
- Caso 14: Valores mínimos, incorporación de la toba alterada, saturación del 100 % de la ignimbrita y saturación del 33 % de las lavas y piroclastos del Grupo Roque Nublo.

A partir del análisis de estos 14 casos (Tabla 3) se ha podido determinar que los parámetros geotécnicos que pudieron influir en la desestabilización del deslizamiento de Pajonales I son tres: 1) la presencia de niveles de tobas piroclásticas con un alto grado de alteración y actuando bajo sus parámetros residuales, 2) la saturación total de la capa de ignimbritas del Grupo Mogán y 3) la saturación parcial de la capa de coladas de lava y piroclastos del Grupo Roque Nublo.

Caso	Factor de seguridad	Estabilidad
1	2,06	Estable
2	1,94	Estable
3	2,15	Estable
4	2,12	Estable
5	1,85	Estable
6	1,64	Estable
7	1,80	Estable
8	1,76	Estable
9	2,01	Estable
10	1,72	Estable
11	1,64	Estable
12	1,44	Estable
13	1,10	Próximo a inestable
14	0,99	Inestable

Tabla 3. Análisis de sensibilidad realizado en el estudio de estabilidad retrospectivo del deslizamiento de Pajonales-Rosiana: valores de los factores de seguridad y condiciones de estabilidad obtenidos para caso.

6. CONCLUSIONES

Las superficies de rotura de los deslizamientos de Pajonales-Rosiana se han desarrollado

principalmente a través de niveles limo-arcillosos que presentan ángulos de rozamiento interno bajos, alta plasticidad y comportamiento expansivo. Estos materiales son producto de la alteración, posiblemente hidrotermal, de tobas volcánicas, ignimbritas no soldadas y niveles de piroclastos. Este hecho se ha confirmado a partir del análisis de estabilidad del deslizamiento de Pajonales I, donde se ha observado que para que se produzca esta inestabilidad es necesario que los materiales piroclásticos se encuentren alterados de tal manera que sus propiedades geotécnicas sean las más desfavorables (valores mínimos o residuales).

Por otra parte, la presencia de agua constituyó un factor desencadenante del deslizamiento, ya que para que se produzca la inestabilidad es necesaria la saturación total o parcial de los materiales localizados en la parte inferior del deslizamiento (ignimbritas del Grupo Mogán y lavas con intercalaciones de piroclastos del Grupo Roque Nublo). A pesar de ello, no es posible descartar otros posibles factores desencadenantes del deslizamiento, tales como la actividad sísmica ligada a la actividad volcánica, ya que estos factores son más difíciles de evaluar dada la escasa información existente al respecto.

Desde el punto de vista geotécnico, la muestra más desfavorable para la estabilidad de la ladera es la Ti 12. Esto se debe a que presenta el mayor contenido en arcillas y un alto índice de plasticidad (56 %), lo que podría ser causa de inestabilidades de ladera si se producen fenómenos de expansión e hinchamiento. Sin embargo, los parámetros resistentes de esta muestra (cohesión y ángulo de rozamiento interno) no son tan bajos como cabría esperar de un material de este tipo, sobre todo si se comparan con los valores de las tobas piroclásticas alteradas. Esto contribuye a que el deslizamiento no se produzca cuando se consideran los valores de la muestra Ti 12 en el análisis de estabilidad. En consecuencia, esta muestra no se puede considerar como un material representativo de los niveles limo-arcillosos susceptibles al deslizamiento y, por tanto, se hace necesario la búsqueda de nuevas muestras y un mayor número de ensayos geotécnicos con objeto de identificar este material.

REFERENCIAS

- Balcells, R., Barrera, J.L. and Gómez J.A., 1990. *Memoria y mapa geológico de España a escala 1:25.000, Hoja 1114-IV (Santa Lucía)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Barrera, J.L. and Gómez. J.A., 1990. *Memoria y mapa geológico de España a escala 1:25.000, Hoja 1109-III (San Bartolomé de Tirajana)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Carracedo, J.C., Pérez-Torrado, F.J., Paris, P. and Rodríguez Badiola, E., 2009. Megadeslizamientos en las Islas Canarias. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(1):44-56.
- de la Fuente, S., Cuadros, J. and Linares, J., 2000. Early stages of volcanic tuff alteration in hydrothermal experiments: Formation of mixed-layer illita-smectite. *Clays and Clay Minerals*, 50(5): 578-590.

- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. Madrid, 744 pp.
- González de Vallejo, L.I., Hijazo, T., Ferrer, M., 2008. Engineering Geological Properties of the Volcanic Rocks and Soils of the Canary Islands. *Soils and Rocks*, 31(1): 3-13.
- Lomoschitz, A., 1999. *La Depresión del barranco de Tirajana, Gran Canaria*. Ediciones del Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria, 200 pp.
- Lomoschitz, A. and Corominas, J., 1997. Actividad histórica y características de los movimientos de ladera de Rosiana, Gran Canaria. *Boletín Geológico y Minero*, 108(6): 53-68.
- Lomoschitz, A., Meco, J. and Corominas, J., 2002. The Barranco de Tirajana basin, Gran Canaria (Spain). A major erosive landform caused by large landslides. *Geomorphology*, 42: 117-130.
- Lomoschitz, A., Hervás, J., Yepes, J. and Meco, J., 2008. Characterization of a Pleistocene debris-avalanche deposit in the Tenteniguada basin, Gran Canaria Island, Spain. *Landslides*, 5(2): 227-234.
- Meco, J., Betancort, J.F., Ballester, J., Fontugne, M., Guillou, H., Scaillet, S., Lomoschitz, A., Cilleros, A., Carracedo, J.C., Petit-Maire, N., Ramos, A.J.G., Perera, M.A., Soler-Onís, E., Medina, P., Montesinos, M. and Meco, J.M., 2008. *Historia geológica del clima en Canarias*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 296 pp.
- Moore, D.M. and Reynolds, R.C., 1989. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press. Nueva York, 332 pp.
- Pérez-Romero, J., Oteo, C., de la Fuente, P., 2007. Design and optimisation of the lining of a tunnel in the presence of expansive clay levels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22: 10-22.
- Rocscience Inc., 2010. *Slide 6.0 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis*. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canadá.
- Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A. and Eff-Darwich, A., 2009. Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182: 67-75.
- Rodríguez-Peces, M.J., Yepes Temiño, J., Martín-Nicolau, E., 2013. Geotechnical features of the volcanic rocks related to the Arteara rock avalanche in Gran Canaria (Canary Islands, Spain). In: Margottini, C.; Canuti, P.; Sassa, K. (Editores). *Landslide Science and Practice. Volume 3: Spatial Analysis and Modelling*. Roma, en prensa.
- Serrano, A., Olalla, C., Perucho, A., Hernández-Gutiérrez, L.E., 2007. Strength and deformability of low density pyroclasts. In: Nunes J.C. and Malheiro, M.M. (Editores). *Volcanic Rocks*. Taylor & Francis Group. London, pp. 35-43.
- Yepes, J. and Lomoschitz, A., 2008. Los depósitos de ladera del barranco de Fataga (Gran Canaria). *Geo-Temas*, 10: 767-770.
- Yepes, J. and Lomoschitz, A., 2009a. Análisis geomorfológico de los procesos de vertiente en el barranco de Fataga, Gran Canaria. In: Alonso, E., Corominas J. and Hürlimann, M. (Editores). *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Volumen I. CIMNE, Barcelona, pp. 351-362.
- Yepes, J. and Lomoschitz, A., 2009b. Caracterización geomorfológica del alud de rocas de Arteara. In: Alonso, E., Corominas J. and Hürlimann, M. (Editores). *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Volumen I. CIMNE, Barcelona, pp. 363-378.