

Recibido: 18 / 8 / 2008, aceptado en versión final: 8 / 9 / 2008

## Estudio de la susceptibilidad a fenómenos geológicos en obras lineales (Andalucía, España)

Study of the susceptibility to geological phenomena in linear works (Andalucía, Spain)

Tatiana Pacífico Bedón<sup>1</sup>, Miguel Llorente<sup>2</sup>, Luis Lain<sup>2</sup>

### RESUMEN

El presente trabajo ha consistido en el estudio de la susceptibilidad del terreno a movimientos de ladera mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su validación con técnicas de campo de un tramo de la Autovía del Mediterráneo ubicado en el municipio de Albuñol, provincia de Granada, Comunidad Autónoma de Andalucía, España. El análisis SIG se realizó con el software ArcGis 9.2 teniendo en cuenta factores, tales como: topografía, litología y geología de la zona. De los resultados obtenidos se observa que **el 81% del área de estudio presenta baja a muy baja susceptibilidad, el 14% un grado de susceptibilidad medio y tan sólo el 1% al 5% presenta un grado de susceptibilidad alto a muy alto**. Los trabajos de campo han permitido contrastar la información derivada del análisis SIG, con un muy buen nivel de correlación. El método presentado es útil y rápido, debido a la captura automática de la mayor parte de los factores. Su principal inconveniente es su dependencia a un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta resolución.

**Palabras clave:** Movimiento de ladera, susceptibilidad, inventario, mapas.

### ABSTRACT

The present work has consisted of the study of the susceptibility of the land to slope movements by means of the use of Systems of Geographical Information (SIG) and its validation with techniques of field of a section of the Road of the Mediterranean situated on Albuñol's municipality, Granada's province, Independent Community of Andalucía, Spain. The SIG's analysis was made with the software ArcGis 9.2 keeping in mind factors such as: topography, litology and geology of the zone. Of the results obtained is observed that **81% of the area of study presents low and very low susceptibility, the 14% a medium susceptibility degree and only the 1% to the 5% presents degree susceptibility high and very high**. The works of field have permitted to contrast the information derived of the analysis SIG, with a very good level of correlation. The method presented is useful and fast, it owed to the automatic capture of most of the factors. Its main inconvenient is its dependence to a Digital Model of Elevations (MDE) of highly resolution.

**Keywords:** Slope movements, Susceptibility, Inventory, Maps.

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo representa el proyecto final de investigación del Máster en Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, en la especialidad de Análisis y Gestión Ambiental para la puesta en valor de los

Recursos Minerales, desarrollado en Perú bajo el Programa ALFA (America Latina Formación Académica) de cooperación entre instituciones de educación superior de la Unión Europea en el marco de la Red DESIR (Red Desarrollo Sostenible Ingeniería

<sup>1</sup> Máster Internacional en Aprovechamiento Sostenibles de los Recursos Minerales-RED DESIR.  
E-mail: pacificooo@gmail.com

<sup>2</sup> IGME, Ríos Rosas 23, Madrid-España.

Recursos Naturales) y coordinado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

La zona de estudio comprende un sector de la Autovía del Mediterráneo ubicado en el territorio municipal de Albuñol, provincia de Granada, Comunidad Autónoma de Andalucía, España (Figura 1). La elección de esta zona se debe a la importancia de esta autovía como un eje de primer orden para la comunicación y el creciente comercio de la zona, cuya principal industria proviene de instalaciones agrarias y del turismo.

Los movimientos de ladera son fenómenos habituales en el medio geológico, asociados principalmente a la acción de la gravedad junto al debilitamiento progresivo de los materiales (meteorización) y a la actuación de otros procesos naturales (precipitaciones, movimientos sísmicos, etc.) o antrópicos (alteraciones morfométricas, modificación de los contenidos de agua, etc.). Los movimientos de ladera constituyen un riesgo geológico de origen natural o inducido, es decir, pueden causar daños a las personas, a los bienes materiales o causar la interrupción de servicios entre comunidades. (Ayala et al. 1987).

En el municipio de Albuñol, la principal y creciente industria agroalimentaria ha dado lugar a un uso muy intensivo del territorio y a un incremento muy significativo del desarrollo económico de la zona. La proliferación de invernaderos en la zona también genera otros efectos, tales como, en la fase de construcción: desestabilización de laderas y modificación de escorrentías, con graves impactos sobre el paisaje y los ecosistemas, generación de riesgo de deslizamiento e incremento de la erosión; en la fase de explotación: contaminación de acuíferos, alteración de la superficie freática, pudiendo inducir deslizamientos e inestabilidades del substrato, daños en

caminos e instalaciones por escorrentías. En la fase de abandono: movilización de laderas, corrección del trazado de la escorrentía, erosión de caminos, etc. Esta actividad económica, sumada al incesante turismo que recibe la zona propició numerosas e importantes inversiones en obras lineales. Todo ello motivó y propició el presente estudio.

## II. OBJETIVO

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de evaluar la susceptibilidad por movimientos de ladera que podrían afectar a un tramo de la Autovía del Mediterráneo, comprendida entre el Enlace de Polopos - Enlace de Albuñol, provincia de Granada, España.

## III. MARCO GENERAL

El área de estudio se encuentra ubicada a 36° 47' Latitud Norte, 3° 12' Longitud Oeste y a una altitud media de 100 msnm, en la vertiente suroeste de la Sierra Contraviesa, muy cerca de la costa mediterránea. La autovía de estudio comprendida en el tramo Enlace de Polopos - Enlace de Albuñol de la Autovía del Mediterráneo, abarca los núcleos de población de La Rábida, El Pozuelo y Castell de Ferro, ubicados dentro del municipio de Albuñol.

La orografía de la Alpujarra, está protegida en su parte central por el macizo de la Contraviesa, contrafuerte marítimo del plegamiento de la doble formación en que se divide la Cordillera Penibética en su parte central, y que junto a Sierra Nevada forman el gran sinclinal del valle del Guadalfeo. El aspecto más característico de la orografía de Albuñol son sus ramblas y barrancos, entre las que destacan tres: las ramblas de Albuñol, de Huarea y de Aldaya. Actualmente el territorio municipal de Albuñol se ha visto transformado por el desarrollo de invernaderos, lo que ha supuesto numerosos y enormes movimientos de tierras provocando la transformación irreversible de los cerros colindantes mediante fuertes modificaciones de su topografía (ROLDÁN F., 2002).

Albuñol tiene un clima típicamente mediterráneo subtropical. Las temperaturas medias mensuales en invierno se sitúan entre 12° y 15° y en verano se pueden registrar hasta 40°. El principal acuífero es Albuñol-La Rábida-El Pozuelo. En éste se incluyen los aluviales de las ramblas de Albuñol y de Huarea. La principal característica de las ramblas es que sus cauces suelen permanecer secos durante años, pero en periodos de avenidas traen gran cantidad de arrastre.

En el término municipal de Albuñol predominan las calizas, los esquistos y filitas, siendo raras y escasas



Figura N.º 1. Ubicación del área de estudio.

**Tabla N.º 1.** Características geológicas, litológicas del área de estudio.

	<b>Unidad Geológica</b>	<b>Capacidad portante</b>	<b>Tipo de material</b>
<b>Cuaternarios</b>	Rellenos explanación invernaderos	Capacidad portante mala (CBR <10)	Bloques, bolos y gravas con matriz arenoarcillosa o limosa
	Masas deslizadas	Capacidad portante mala (CBR <10)	Bloques, bolos y gravas con matriz arenoarcillosa o limosa
	Aluvial ramblas	Capacidad portante buena (CBR 20-50)	Aluvial: gravas y bolos heterométricos y poligénicos, con arenas y limos
	Coluvial / derrubios de ladera	Capacidad portante buena (CBR 20-50)	Bloques, bolos y gravas con matriz arenoarcillosa o limosa, a veces con niveles de arcillas y limos
	Depósitos deltaicos	Capacidad portante regular (CBR 10-20)	Cantos angulosos y rodados mezclados con arenas y limos
	Depósitos de playa	Capacidad portante regular (CBR 10-20)	Cantos rodados mezclados con arenas y limos
	Terraza marina	Capacidad portante muy buena (CBR 50-80)	Terraza: gravas con matriz arenoarcillosa y limosa, a veces con recubrimiento o intercalaciones limosas y/o arcillosas
	Travertinos	Capacidad portante muy buena (CBR equivalente 50-80)	Travertinos. Precipitación química de carbonatos
<b>Rocas sedimentarias o metamórficas</b>	Manto de Adra. Unidad Melicena	Roca muy mala (RMR <20)	Predominio de niveles o intercalaciones de litotipos moderadamente duros a blandos. Niveles mayoritariamente filíticos muy alterables superficialmente
	Manto de Adra. Unidad Sorvilán	Roca mala (RMR 21-40)	Predominio de niveles o intercalaciones de litotipos moderadamente duros a duros. Niveles esquistosos y cuarcíticos
	Manto de Murtas	Roca mala (RMR 21-40)	Predominio de niveles o intercalaciones de litotipos moderadamente duros a duros. Niveles esquistosos y cuarcíticos
	Manto de Alcázar superior	Roca buena (RMR 61-80)	Predominio de niveles o intercalaciones de litotipos duros a muy duros. Niveles mayoritariamente carbonatados en bancos a veces compactos y masivos
	Manto de Alcázar inferior	Roca muy mala (RMR <20)	Predominio de niveles o intercalaciones de litotipos moderadamente duros a blandos. Niveles filíticos con intercalaciones duras cuarcíticas y calcoesquistosas
	Manto de Lújar	Roca media (RMR 41-60)	Predominio de niveles o intercalaciones de litotipos duros a muy duros. Niveles mayoritariamente carbonatados en bancos a veces compactos y masivos

las rocas intrusivas y los granitos (CAMACHO OLMEDO, GRANADA, 1996). Las fuertes pendientes del relieve hacen muy difícil la formación de suelos profundos. Las Sierras Béticas están compuestas, predominantemente, de materiales permeables que facilitan la filtración en profundidad de las aguas.

El municipio de Albuñol, se encuentra formado principalmente por materiales que pertenecen al Complejo Alpujarride, compuestos en su mayor parte por materiales metapelíticos (micasquistos, filitas y cuarcitas; eventualmente por filitas y cuarcitas; eventualmente por niveles de calcoesquistos, ALDAYA 1981).

La estructura geológica se caracteriza por la superposición de gran número de mantos de corrimiento, identificados por el apilamiento de materiales de diverso grado de metamorfismo y edad. En Albuñol, la superposición de mantos de corrimiento, son: Manto de Lújar, de Alcázar, de Murtas, de Adra (Unidad de Sorvilán) y como elemento más alto la Unidad de Melicena, también del Manto de Adra.

Como características geológicas de la zona de estudio se observa que hay dos grandes grupos de afloramientos litológicos, una de la edad Mesozoico Inferior

y Paleozoico: políticos-samíticas (esquistos, filitas, cuarzo esquistos) y las carbonatadas (calizas, calizas marmóreas y dolomitas). Y por otro lado, tenemos a las rocas sedimentarias de la edad Cuaternaria, las cuales tiene como entidad más representativa las formaciones carbonatadas (travertinos, caliches) y las detríticas (depósitos de arcillas, arenas, gravas, areniscas, conglomerados).

#### IV. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el trabajo de investigación consistió de cuatro etapas: una etapa preliminar de recopilación, revisión y clasificación de la información existente; elección de la escala de trabajo y delimitación del área de estudio, en este caso se consideró la escala 1/5000 por el área física implicada y la información disponible. La segunda etapa consistió en la preparación de la base de datos espaciales a partir de una base de datos temática existente georreferenciada. En esta etapa se convirtió y uniformizó los formatos de trabajo y a la vez se organizó, clasificó y depuró la información espacial. La tercera etapa fue el análisis de la susceptibilidad mediante Sistemas de

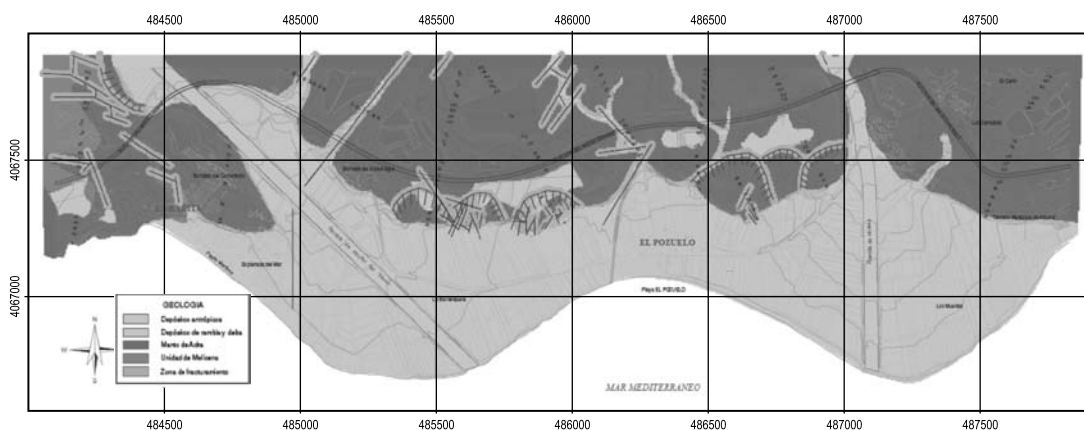


Figura N.º 2. Mapa geológico.

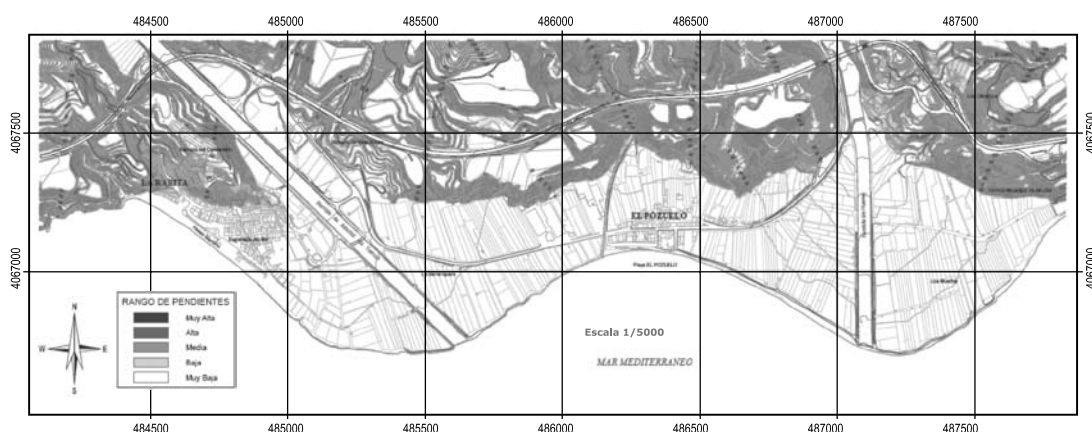


Figura N.º 3. Mapa de pendiente.

Información Geográfica (SIG) con la estimación de la contribución relativa de los factores que intervienen en los deslizamientos para, de esta, manera clasificar el territorio en áreas de distinto grado de susceptibilidad. Finalmente, la última etapa consistió en la validación del modelo para predecir las zonas susceptibles a deslizamientos futuros, este proceso se realizó en campo y consistió en levantar la información observada in situ, a través de una ficha de investigación de campo para la identificación de inestabilidades del terreno en laderas y taludes, elaborada por el IGME. Las variables consideradas en el análisis de la susceptibilidad a movimientos de ladera fueron la pendiente, geología y litología.

### Condicionantes geológicos, litológicos y geotécnicos

La estructura geológica, litológica y geotécnica de la zona de trabajo, han sido factores considerados en la agrupación de tipos de rocas como unidades geológicas (figura 2), para ello se tomó como base la información geológica de la carta Adra del Mapa Geológico de España, así como datos geológicos estructurales tomados de campo, el factor estructural se cuantificó de acuerdo a las características geotécnicas correspondientes a la resistencia de las rocas y a la capacidad portante de los suelos (tabla 1).

### Pendiente

Para la valoración del factor geomorfológico se ha considerado a las pendientes, porque constituye uno de los aspectos importantes en el análisis de la susceptibilidad a movimientos de ladera.

El mapa de pendientes (figura 3) se ha elaborado a partir del mapa topográfico con curvas de nivel

cada metro, para llegar a la clasificación actual de las pendientes (tabla 2), aplicamos la “clasificación natural” correspondiente al método de JENKS, para cinco clases.

### V. MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD

El procedimiento seguido para la generación de la matriz de susceptibilidad a movimientos de ladera, consistió en primer lugar en la combinación de las pendientes y las unidades litológicas, luego en la ponderación de esta combinación con valores que varían de 1 a 5 para identificar en orden creciente el nivel de susceptibilidad, es decir 1 corresponde a una susceptibilidad “muy baja” y 5 “muy alta” (Tabla 3).

### VI. VALIDACIÓN DEL MODELO

Esta última etapa, es de mucha importancia dado que nos permite validar la utilidad del modelo para predecir zonas susceptibles a deslizamientos futuros.

El procedimiento de validación se realizó en campo; consistió en ir a la zona de estudio y verificar in situ las condiciones reales de susceptibilidad (foto 1).

La validación del mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera se realizó en campo, y consistió en levantar la información observada in situ, a través de la ficha de investigación de campo para la identificación de inestabilidades del terreno en laderas y taludes, elaborada por el IGME.

### Ficha de investigación de campo

Esta ficha constituye una herramienta muy útil para el recojo de datos. La forma como está estructurada nos permite obtener información de campo

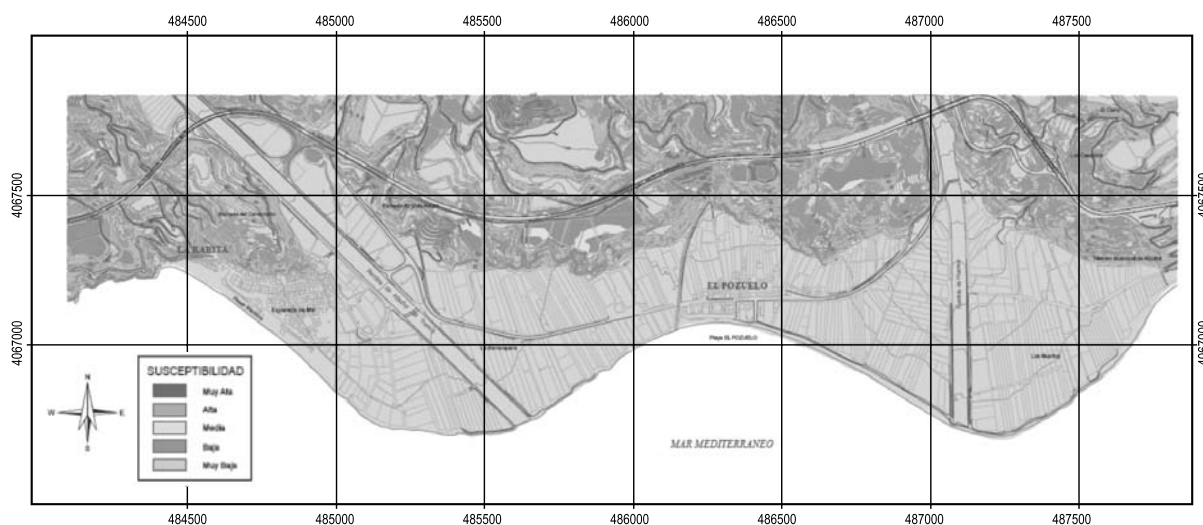


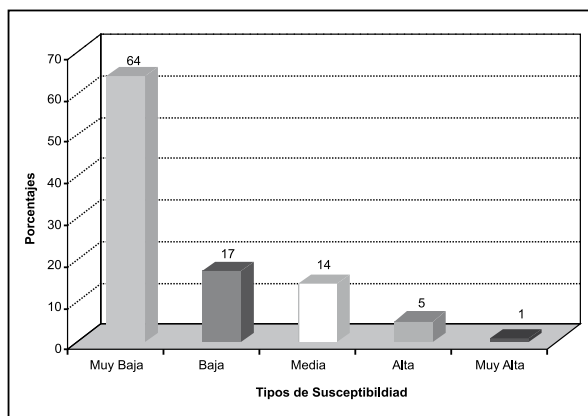
Figura N.º 4. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera.

**Tabla N.º 2.** Clasificación de las pendientes de acuerdo al grado de nivel de riesgo.

Clasificación	Valor	Descripción
Muy alta	5	Pendientes naturales mayores de 50°
Alta	4	Pendientes naturales comprendidas entre 35°-50°
Media	3	Pendientes naturales comprendidas entre de 20°-35°
Baja	2	Pendientes naturales comprendidas entre 10°-20°
Muy baja	1	Pendientes naturales menores de 10°

ordenada, para poderla sintetizar luego, y práctica al momento de levantar la información de campo para el usuario.

La ficha de investigación de campo está organizada en 6 partes bien definidas, las cuales se detallan a continuación: Descripción general, donde se indica los antecedentes; la localización en coordenadas UTM (x, y, z), una fotografía aérea indicando la fecha de vuelo, el mapa topográfico y el mapa de susceptibilidad del lugar, indicando la fecha del mapa, la fuente y escala de los planos, y las fotos de la situación actual del lugar. Identificación de los tipos de movimientos del terreno, aquí se marca de acuerdo a lo observado in situ los diferentes tipos de deslizamientos: reptaciones y movimientos superficiales, deslizamientos, desprendimientos, avalanchas y flujos, además se hace una breve descripción de la situación actual. Factores condicionantes, en este apartado se indica el tipo de relieve, morfología de la zona afectada, estructura geológica, unidad estratigráfica, litología del sustrato, características del suelo y formaciones superficiales, el perfil estratigráfico de los niveles afectados, las características del macizo rocoso, las condiciones hidrogeológicas y la cobertura vegetal



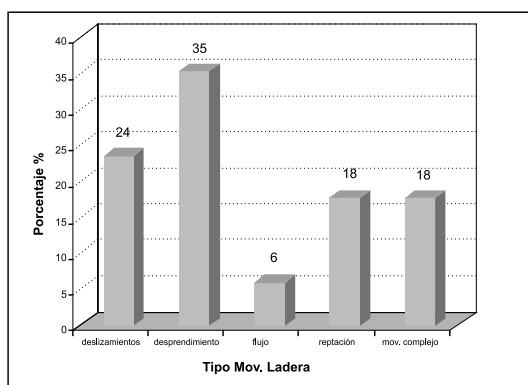
**Gráfico N.º 1.** Distribución en porcentajes de los diferentes grados de susceptibilidad.

actual. Factores desencadenantes, aquí se indica qué factores han sido los desencadenantes de la situación actual, si se debe a factores humanos (excavaciones, movimientos de tierras, alteraciones de cauces, construcciones, degradación de la cobertura vegetal u otros), si es producto de factores naturales (inundación, erosión, socavación al pie por causa de cauces, lluvias torrenciales, u otros); o una combinación de ambas. Evaluación de la peligrosidad potencial, se identifica las evidencias morfológicas, las superficies de rotura, grado de estabilidad, grado de desarrollo y grado de evolución. Y Medidas y obras de mitigación recomendadas. Se escogen las medidas de mitigación que sean más convenientes para este sector crítico.

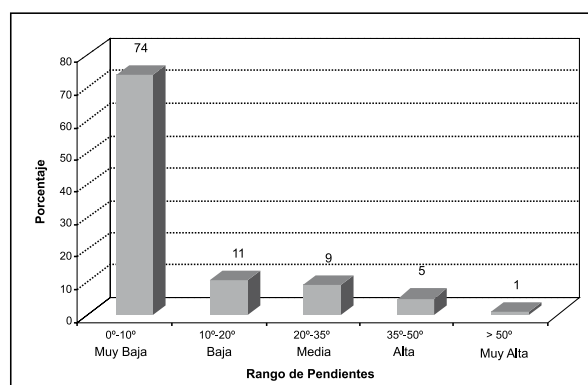
**VII. RESULTADOS**

Como resultado del análisis, el mapa de susceptibilidad a movimientos de laderas (figura 5) nos da los siguientes porcentajes en función del área de estudio y de acuerdo al grado de susceptibilidad, tal como se muestra en el gráfico N.º 1.

Como podemos observar de los resultados obtenidos en el mapa de susceptibilidad a movimientos



**Gráfico N.º 2.** Porcentaje de movimientos de ladera según su tipo.



**Gráfico N.º 3.** Porcentaje del rango de pendientes.

Tabla N.º 3. Matriz de susceptibilidad.

Unidades		Delta, Playa V. fluvial	Rambla	Manto de Adra.	M. Adra. + Fracturas	Unidad Melcena	Depósitos Antrópicos	U. Mellcena + Fracturas	Dep. Antrópicos + Fracturas
Tipología		No se prevee movimiento de laderas	Pequeños deslizamientos o deslomes en bordes escarpados por zapado basal	Flujos superficiales en intercalaciones blandas con posible desprendimientos de bloques por descalce	Flujos superficiales en intercalaciones blandas con posible desprendimientos de bloques por descalce	Coladas de derrumbes deslizamientos rotacionales	Deslizamientos rotacionales	Coladas de derrumbes deslizamientos rotacionales	Deslizamientos rotacionales
Volumen		Muy pequeño		Muy pequeño a grande		Medio a grande			
SUSCEPTIBILIDAD A LAS INESTABILIDADES DE LOS DISTINTOS LITOTIPOS EN FUNCIÓN DE LAS PENDIENTES NATURALES	Pendientes de 50° a 90°	1	3	4	5	5	5	5	5
	Pendientes de 35° a 50°	1	2	3	4	4	5	5	5
	Pendientes de 20° a 35°			2	3	4	4	4	5
	Pendientes de 10° a 20°		1	1	2	3	3	4	4
	Pendientes menores de 10°		1	1	2	2	2	3	3

de ladera (figura N.º 4), la mayor parte del área de estudio presenta baja a muy baja susceptibilidad a movimientos de laderas (81%), el 14% un grado de susceptibilidad medio y tan sólo el 1% al 5% restante presenta un grado de susceptibilidad alto a muy alto.

También observamos que la mayor parte del tramo de la carretera presenta susceptibilidad muy baja a baja; sin embargo, hay sectores en la plataforma de la carretera que presentan susceptibilidad alta, ello se debe principalmente a que estos sectores de la carretera han sido conformados sobre material de relleno. Otro punto crítico de susceptibilidad alta, es el tramo de carretera donde se asientan los estribos del puente ubicado sobre la rambla de Huarea, Carretera Nacional 340 de Almería a Málaga, estos están asentados sobre el Manto de Adra en afloramientos de ladera. Los tramos en donde la plataforma de la carretera se asienta sobre terraplén, por lo general, presentan susceptibilidad alta a muy alta.

Para la validación de los resultados obtenidos del mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera, se levantó en campo 13 fichas de investigación de los sectores más representativos de cada tipo de susceptibilidad.

Luego de sintetizar la información recogida en campo, se tiene que los movimientos de ladera son, en primer lugar, de tipo desprendimiento (35%), en segundo lugar se tiene los movimientos con fase terrestre tipo deslizamientos (24%); seguidamente los procesos tipo reptación y movimiento complejo representan el 18% cada uno y, finalmente, los procesos tipo flujo constituyen el 6% (Gráfico N.º 2).

Con respecto a la pendiente como factor condicionante en el análisis de susceptibilidad del área de estudio se tiene que la mayor parte del territorio estudiado, un 74% tiene pendiente entre 0° - 10° (deltas y playas); entre 10° - 20° un 11% y la pendientes muy altas, superiores a 50° sólo constituyen el 1% (Gráfico N.º 3).

**VIII. CONCLUSIONES**

El método empleado es relativamente sencillo y ha conseguido aportar datos bastante ajustados a la realidad, por lo que su aplicación fue óptima y, por tanto, estimo buenos resultados.

La predicción de cualquier tipo de análisis (susceptibilidad, peligrosidad o riesgo) y sus resultados (en forma cartográfica o no) se basa en una validación del procedimiento empleado y de los resultados obtenidos. Sin la validación, se desconoce el acierto de la predicción de cualquier análisis de susceptibilidad y, por tanto, su utilidad.

Del análisis, la susceptibilidad a movimientos de ladera del tramo de la Autovía del Mediterráneo estudiado, está directamente relacionada a las pendientes y la geología de la zona.

Con relación al método de clasificación de pendientes, este estudio ha partido de la hipótesis de que la distribución estadística de pendientes responde directamente a situaciones de inestabilidad natural del terreno, a excepción de los taludes de desmontes y terraplenes.

La validación del modelo ha dado lugar a comprobar que para este caso de estudio, con una limitada hete-



Foto 1. Trabajos de verificación de las condiciones reales en campo.

rogeneidad en tipos litológicos, tipos de alteraciones superficiales y tipos y mecanismos de inestabilidad, esta técnica de reclasificación de pendientes por el método de Jenks ha resultado en una muy buena aproximación.

Las zonas de alta susceptibilidad se encuentran dentro del área del Manto de Adra, específicamente en las zonas que presentan fracturas y escarpes; mientras que la mayor parte del territorio con susceptibilidad baja se encuentra enmarcada claramente en la zona de deltas, playa, valle fluvial y la caja de hormigón de las ramblas.

### IX. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo son preliminares y muy útiles en una etapa inicial de estudio, para incrementar su aplicabilidad serían necesarios considerar el uso de otros parámetros de estudio como: hidrogeología, sismicidad y precipitación.

En las zonas de susceptibilidad alta y muy alta será necesaria una investigación geotécnica profunda y, a su vez, considerar medidas y obras de mitigación para mejorar esta situación.

El ordenamiento territorial de la zona de estudio, municipio de Albuñol, deberá basarse en la manera de interrelacionar el medio ambiente con el uso del terreno.

### X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ayala, F.J. *et al.* (1987). *Manual de taludes*. Serie: Geotecnia. I.G.M.E. Madrid, España.
- [2] Aldaya, F.; García – Dueñas, V. y Navarro Vila, F. (1981). Los mantos alpujárrides del tercio central de las Cordilleras Béticas. Ensayo de correlación tectónica de los alpujárrides. *Acta Geológica Hispánica*, 14.
- [3] Camacho Olmedo, M.T., Jiménez Olivencia, y Menor Toribio, J. (1996). El abandono agrícola del valle de Poqueira: Sistemas de Información Geográfica y cartografía dinámica de los usos del suelo. Conferencia Internacional sobre Sierra Nevada. Granada.
- [4] Roldán Medina, F. (2002). Informe Contraviesa: Transformaciones del territorio por implantación de invernaderos en la Alpujarra. Investigación tutelada. Departamento de Expresión Gráfica, Arquitectónica y en la Ingeniería. Universidad de Granada.