



MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA PROFUNDOS PARA ASTURIAS (NORTE DE ESPAÑA)

Deep mass movements susceptibility model in Asturias (North of Spain)

J. Martínez¹, R. Menéndez Duarte¹ y J. Lastra¹

(1) INDUROT, Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. 33600 Mieres, Asturias
E-mail: rosana@indurot.uniovi.es; Fax: 985-458110

Resumen: Se ha realizado un modelo de susceptibilidad de movimientos en masa profundos para un sector de 10.000 km² en la vertiente norte de la Cordillera Cantábrica. En la realización del modelo la información básica ha sido la cartografía, a escala 1:25.000, de estos movimientos (4500 polígonos), la cartografía geológica y una subdivisión del territorio en subcuencas de drenaje de reducidas dimensiones. Combinando dos factores condicionantes: 1) litología del sustrato y 2) pertenencia a las subcuencas de drenaje, el territorio se ha clasificado en Unidades de Condición Única y se ha realizado un análisis de probabilidad condicional. El modelo obtenido, con valores de probabilidad continuos, ha sido clasificado en un mapa con 5 intervalos de susceptibilidad relativa. La presencia de áreas con distinta susceptibilidad sigue en gran medida un criterio litológico, aunque muestra algunas modificaciones impuestas por el relieve, por la situación geomorfológica o por otros factores locales.

Algunas características de los movimientos en masa analizados - antigüedad, inactividad actual o baja frecuencia temporal - hacen que el significado del modelo de susceptibilidad y su posible aplicación en un análisis de riesgo deban de ser considerados cuidadosamente.

Palabras clave: movimientos en masa profundos, SIG, modelos de susceptibilidad, probabilidad condicional.

Abstract: A deep mass movement susceptibility model has been carried out for a 10,000 km² sector on the northern side of the Cantabrian Mountains (northwest Spain). The input data include a 1:25.000 scale cartography of these slope instabilities (4,500 polygons), a bedrock lithological cartography at the same scale and a small watersheds subdivision. The territory has been classified into Unique Condition Units taking into account two conditioning factors: 1) bedrock lithology and 2) watershed subdivision. Following an analysis of conditional probability, the model, with continuous values of probability, has been reclassified in a map with 5 intervals of relative susceptibility. The distribution of areas with different susceptibility depends mostly on lithology, although it also shows the influence of other local factors, like relief and geomorphic situation.

Some of the characteristics of the mass movements analyzed, such as the age of many of the forms and their ongoing activity, suggest that the meaning and possible applications of the susceptibility model should be considered carefully.

Keywords: deep mass movements, GIS, susceptibility models, conditional probability.

1. Introducción

En cualquier región montañosa la evolución de las vertientes viene determinada por la actuación de procesos muy variados: reptación del suelo, caídas

y avalanchas de rocas, deslizamientos y flujos superficiales, movimientos en masa profundos que afectan al sustrato rocoso, procesos torrenciales, etc. Obviamente la magnitud, frecuencia y alcance de todos estos procesos es muy variada, con dife-



J. Marquínez, R. Menéndez Duarte y J. Lastra (2005). Modelo de susceptibilidad de movimientos en masa profundos para Asturias (norte de España). *Rev. C. & G.*, 19 (3-4), 23-35.

rencias que necesariamente condicionan los modelos de susceptibilidad y el análisis del riesgo asociado a ellos.

De los diferentes tipos de movimientos en masa reconocibles en la Cordillera Cantábrica, en el presente trabajo se ha realizado un modelo de susceptibilidad de movimientos en masa profundos. Todos los movimientos considerados corresponden a movimientos que afectan al sustrato rocoso, con superficies planimétricas de hasta 1,5 km² y volumen máximo estimado de hasta 106 m³. Atendiendo a la dinámica del proceso, los movimientos aquí estudiados corresponde principalmente a diferentes tipos de flujos, deslizamientos y movimientos complejos Varnes (1978); en estos últimos se combinan principalmente mecanismos de flujo y deslizamiento.

Los modelos de susceptibilidad por inestabilidades de ladera se han desarrollado principalmente para movimientos en masa someros, y en ellos se integra la cartografía de varios factores condicionantes. Desde el inicio de los años 90 se desarrollan metodologías para elaborar estos mapas de susceptibilidad con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y diferentes técnicas estadísticas (Carrara et al., 1991, 1995; Chung et al. 1995; Montgomery et al., 1998; Dymond et al., 1999; Dai et al., 2002; Baeza y Corominas, 2001; Remondo et al 2003; Santanac et al, 2003).

Independientemente de la metodología de análisis empleada, en casi todos estos trabajos uno de los principios básicos es que los agentes desencadenantes de los procesos de inestabilidad que ya se produjeron se mantienen en las condiciones actuales o futuras próximas. Además, en muchos casos, se analiza una población de movimientos en masa asociados a un determinado evento, como por ejemplo un periodo excepcional de lluvias (Irigaray et al, 1997, 1999; Menéndez Duarte et al, 2003) y se asume que si se produce un evento similar el modelo de susceptibilidad elaborado tendrá una alta validez. En algunos casos este segundo evento ya se ha producido y la nueva población de movimientos en masa asociados a él ha servido para validar el modelo de susceptibilidad ya existente (Irigaray et al, 1997, 1999).

En el caso de los movimientos en masa profundos aquí considerados estas premisas pueden no ser ciertas. En primer lugar la mayoría de los movi-

mientos son inactivos y esto, unido a su alta pervivencia en el paisaje, hará que muchas de las formas ahora reconocibles se hallan desarrollado con condiciones climáticas, geológicas y/o geomorfológicas diferentes de las actuales.

En la Cordillera Cantábrica se han descrito movimientos en masa profundos que se desarrollan sobre litologías y condiciones geológicas muy variadas (Cendrero y Dramis, 1996; González Díez, et al, 1996; Menéndez Duarte y Marquínez, 1996; Jiménez Sánchez, 1997 y 2002; Jiménez Sánchez, et al, 1999). Generalmente los movimientos en masa profundos reconocibles en la Cordillera Cantábrica son inactivos, aunque pueden presentar inestabilidades menores asociadas. En el trabajo de González Díez, et al (1996) a partir de varias dataciones y observaciones geomorfológicas se propone una cronología de movimientos en masa; en esta cronología los movimientos en masa profundos, con áreas medias de entre 687.5 y 374.7 m², se consideran como los más antiguos, con edad pleistocena. En la región asturiana, en las zonas que estuvieron glaciadas, se reconoce una alta frecuencia de movimientos en masa profundos y se ha relacionado con la evolución de las vertientes inmediatamente posterior a la retirada de los sistemas glaciares (Menéndez Duarte y Marquínez, 1996; Jiménez Sánchez, 1997 y 2002).

A pesar de la posible antigüedad de la mayoría de los movimientos en masa profundos existentes en Asturias, en el presente trabajo se ha realizado un ensayo sencillo de modelo de susceptibilidad para toda la región. La base fundamental del modelo es una cartografía uniforme de los depósitos de movimientos en masa profundos a escala 1:25.000 para toda la región, que incluye más de 4.500 unidades. Esta cartografía se ha combinado con la litología del sustrato y con un modelo de 'unidades de relieve' para obtener una zonificación de susceptibilidad relativa de todo el territorio.

En el modelo propuesto se consideran dos ideas básicas:

- la litología del sustrato es uno de los principales factores condicionantes de estos movimientos
- en unidades de relieve de reducida extensión la historia y características geológicas y geomorfológicas serán uniformes. Así, frente al desarrollo de movimientos en masa profundos, muchos factores

condicionantes y desencadenantes también lo serán.

2. Área de estudio

El área estudiada tiene sus límites coincidentes con los límites administrativos del Principado de Asturias, con una extensión de poco más de 10.000 km². Todo el territorio pertenece a la vertiente norte de la Cordillera Cantábrica, con unas cotas máximas superiores a 2.500 metros y una distancia desde el eje de la cordillera a la costa que en la región asturiana, en muchos casos, no llega a los 50 km en línea recta (Fig. 1).

El sustrato geológico está constituido casi exclusivamente por rocas sedimentarias, predominantemente de edad paleozoica, si bien en la zona centro-septentrional existe un amplio afloramiento de rocas mesozoicas (Fig. 2).

La evolución actual del relieve viene condicionada por el fuerte encajamiento del sistema fluvial

y por la presencia de laderas que salvan grandes desniveles, que se aproximan a los 1000 metros en los valles principales, y con fuerte pendiente. En las zonas elevadas se conservan formas de modelado heredadas de los sistemas glaciares pleistocenos, mientras que en la costa predominan los procesos erosivos propios de una costa acantilada.

2.1. Los movimientos en masa

En las laderas de prácticamente todas las zonas de Asturias se reconocen movimientos en masa profundos que afectan al sustrato geológico. Las dimensiones de los depósitos de estos movimientos son variables, pero siempre superiores a 1 ha de superficie planimétrica. Algunos de los depósitos mayores reconocidos tienen una superficie planimétrica de entre 1 y 1,5 km² y suponen la desestabilización de volúmenes que alcanzan, en muchos casos, el millón de metros cúbicos.

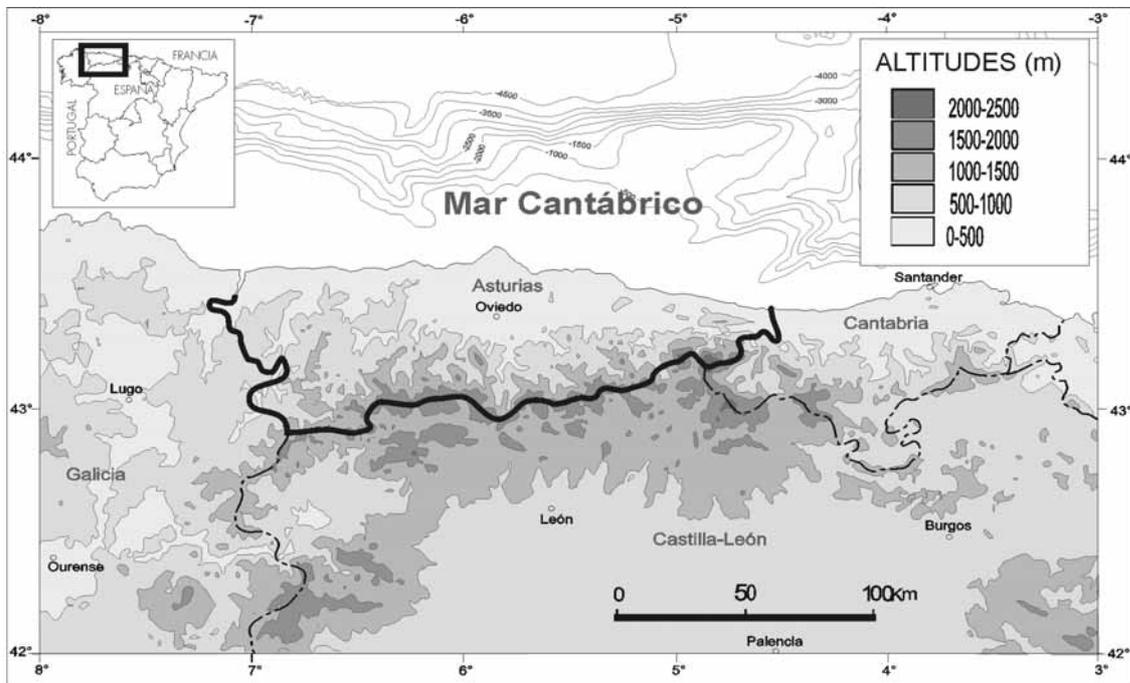


Figura 1. Situación del área estudiada. Sus límites coinciden con los límites administrativos del Principado de Asturias (delimitado por la línea gruesa continua), perteneciente en su totalidad a la vertiente norte de la Cordillera Cantábrica.

Figure 1. Location of the study area. It coincides with the administrative limits of the Principality of Asturias (thick solid line), on the northern side of the Cantabrian Range.

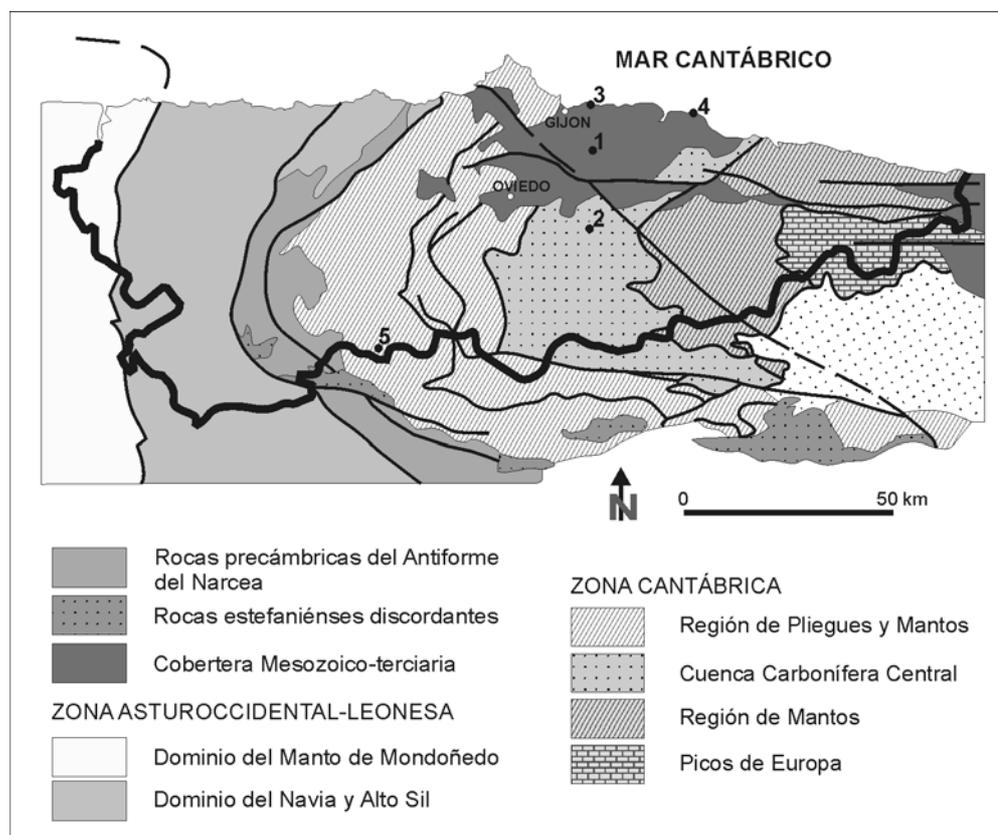


Figura 2. Unidades geológicas de las zonas Cantábrica y Asturoccidental-Leonesa presentes en Asturias (Tomado de Bastida y Aller, 1995). Los puntos 1 a 5 corresponden a la localización de los movimientos en masa profundos activos que se citan en el texto (apartado 2.1).

Figure 2. Geologic units of the Cantabrian and Asturoccidental-Leonesa zones in Asturias (after Bastida and Aller, 1995). Points 1 to 5 show the location of the active deep mass movements cited in the text (section 2.1).

Estos movimientos en masa profundos siempre afectan a rocas del sustrato y, por sus dimensiones, inciden en la totalidad o práctica totalidad de la ladera afectada, modificando fuertemente su geometría. En algunos casos los grandes movimientos en masa presentan superficies de fractura bien definidas y profundas, mientras que en los más antiguos esta zona puede estar muy 'desdibujada', por procesos de erosión posteriores. Ladera abajo de la superficie de fractura se suele conservar un depósito que corresponde a la masa movida y cuya pervivencia en el paisaje es mayor que la de la zona de rotura, al menos para estos movimientos profundos (Fig. 3).

Actualmente en Asturias el número de movimientos en masa profundos y que muestran activi-

dad es muy reducido. Entre éstos destacan los presentes en el valle del Meredal en Gijón (Jiménez Sánchez, et al, 1999) (Punto 1 en figura 2) en laderas de rocas mesozoicas, y algunos otros no recogidos en la literatura: en la localidad de Foyedo en la Cuenca Carbonífera Central, que se desarrolla sobre areniscas y pizarras de edad carbonífera (Punto 2 en figura 2), los presentes a lo largo de los acantilados de rocas del Mesozoico entre Gijón y Lastres (Puntos 3 y 4 en figura 2) o en el Puerto de Somiedo, sobre una alternancia de pizarras, areniscas y calizas (Punto 5 en figura 2). Sin embargo, aunque los movimientos en masa profundos y activos no son muy abundantes, sí se conservan evidencias de numerosos movimientos inactivos, especialmente las formas de depósito, cartografiadas a escala 1:25 000.

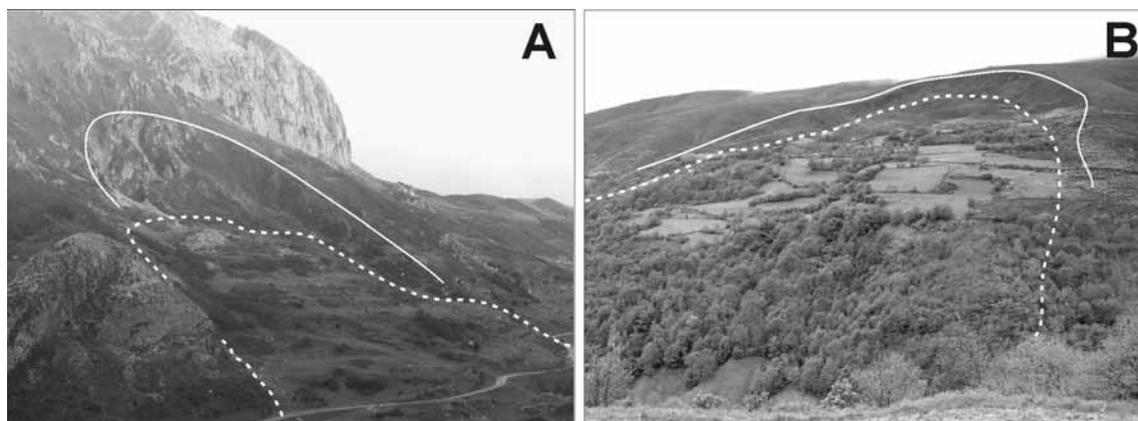


Figura 3. A) Movimiento en masa en el Puerto de San Isidro, situado en la región sur-centro de Asturias y B) Movimiento en masa en el Valle del Río Ibias, en la zona sur-occidental de Asturias. Sobre ambas fotografías se han marcado los límites del área de depósito (línea discontinua) y los límites superiores del área de cicatriz (línea continua).

Figure 3. A) Mass movement in San Isidro Mountain Pass, in the south-central region of Asturias and B) Mass movement in Ibias River Valley, south-western region. The limits of the deposit area (dashed line) and the upper limits of the scar area (solid line) have been marked on the photographs.

3. Metodología

El modelo de susceptibilidad se ha realizado a partir de un análisis condicional con apoyo de un sistema Sistema de Información Geográfica (SIG), software ArcInfo. En el análisis se establecen las relaciones de probabilidad entre factores condicionantes y la distribución de movimientos en masa en la región. Desde el SIG se ha accedido a una base de datos cartográfica que incluye varias capas de cartografía temática y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para toda la región. A partir de las capas iniciales se han generado varias capas derivadas y, por combinación de éstas, se ha creado el modelo de susceptibilidad para movimientos en masa profundos.

3.1. Base de datos

La fuente de datos del estudio ha sido la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (CTAPA). En esta base cartográfica a escala 1:25.000 se recogen varias capas de información temática básica: topografía, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), planimetría, vegetación, áreas de roquedo, geología del sustrato y formaciones superficiales. Todas las capas se han construido sobre una base topográfica común y con

criterios uniformes para todo el territorio. En el análisis de susceptibilidad las capas utilizadas han sido el MDE, la geología del sustrato y las formaciones superficiales.

El MDE está en formato matricial, con una resolución de celda regular de 50 x 50 m. Este modelo matricial fue construido a partir de la base topográfica vectorial 1:25.000. En el proceso de construcción del MDE matricial se construyó un modelo intermedio en formato TIN (Triangular Irregular Network, Peucker et al 1978) que fue el utilizado en la interpolación final del MDE.

En la capa correspondiente a la geología del sustrato, la información básica es la de las hojas 1:50.000 correspondientes del Plan MAGNA (IGME), si bien, en algunas zonas se realizaron modificaciones basadas en otros trabajos de cartografía geológica más recientes o en observaciones de campo realizadas durante la elaboración de la CTAPA. Para toda Asturias en esta capa se diferencian más de 100 formaciones geológicas.

Por último, en la capa de formaciones superficiales aparecen todas las formaciones superficiales con representación cartográfica a escala 1:25.000. En esta capa los diferentes depósitos están clasificados con criterios genéticos y litológicos, apareciendo todas las formaciones superficiales son espesor mayor de 50 cm.

3.2. Cartografía e inventario de movimientos en masa

En la capa de formaciones superficiales de la CTAPA uno de los elementos diferenciados son los depósitos de movimientos en masa profundos. En esta clase se incluyen depósitos derivados de deslizamientos, flujos o movimientos en masa mixtos, con morfologías variadas y diferentes grados de conservación de las áreas de cicatriz y de los depósitos (Fig. 4), pero que en todos los casos han afectado al sustrato rocoso. El número de polígonos incluidos en la capa de formaciones superficiales y cartografiados como depósitos de movimientos en masa profundos es próximo a 4.500; estos polígonos son la población utilizada en el análisis de probabilidad para definir la distribución de los movimientos en masa en la región.

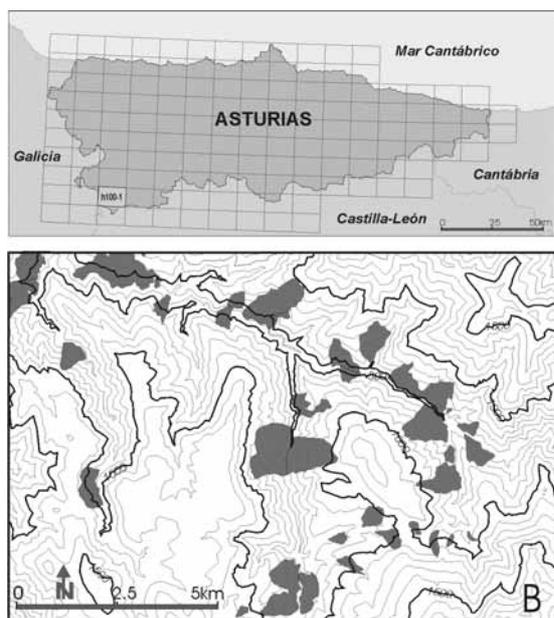


Figura 4. Ejemplo de la cartografía de movimientos en masa recogida en la CTAPA. A) División de Asturias en hojas 25.000 B) Cartografía de masas deslizadas para una de las hojas 25.000 (h 100-1, resaltada en la anterior); en la cartografía cada uno de los polígonos en gris corresponde a una masa deslizada.

Figure 4. Example of the mass movements cartography of the CTAPA. A) Division of Asturias in 25.000-scale sheets B) Cartography of deep mass movements on one of the 25.000-scale sheets (h100-1, remarked in previous figure). Landslides are represented by grey polygons on the cartography.

3.3. Factores condicionantes

Los factores con los que se relaciona la distribución de los movimientos en masa sólo han sido dos: 1) el sustrato geológico y 2) la pertenencia a subcuencas o unidades de relieve de reducidas dimensiones.

El tipo de sustrato geológico es uno de los factores condicionantes principales en el desarrollo de movimientos en masa; la importancia del tipo de sustrato como 'factor pasivo o inherente' de control en el desarrollo de movimientos en masa se mantiene desde algunos de los primeros trabajos de geomorfología aplicada a evolución de laderas (Terzaghi, 1950). Esta información corresponde a la capa 'geología del sustrato' de la CTAPA.

El segundo factor considerado son un total de 1229 subcuencas de drenaje generadas de forma automática a partir del Modelo Digital de Elevaciones (Fig. 5). Para su creación se ha utilizado el comando basin del módulo Grid (ESRI, 1997) de ArcInfo Workstation 7.1.2. Este comando establece las subcuencas de drenaje identificando las líneas de cresta en el MDE, a partir de ahí el comando utiliza un Modelo de Dirección de Flujo (Jenson y Domingue, 1988) para encontrar todas las celdas que conforman la misma subcuenca de drenaje. El número de subcuencas obtenidas es de 1229, con área media de 8.6 km². La mayoría de las subcuencas tienen una extensión menor de 25 km² y las pocas con extensión mayor se localizan preferentemente en la franja costera, donde la red de drenaje está menos definida y el relieve es más uniforme.

El significado de estas unidades no es otro que el de tener una división del territorio en unidades de reducida extensión, que incluyan tramos de ladera completos y que podamos suponer más o menos uniformes en geomorfología, relieve o contexto geológico.

Las capas de geología del sustrato y de subcuencas de drenaje, además de ser utilizadas en la construcción del modelo de susceptibilidad que se describe a continuación, se combinaron con la distribución de movimientos en masa con el fin de conocer las relaciones existentes entre cada uno de estos factores y la presencia de movimientos.

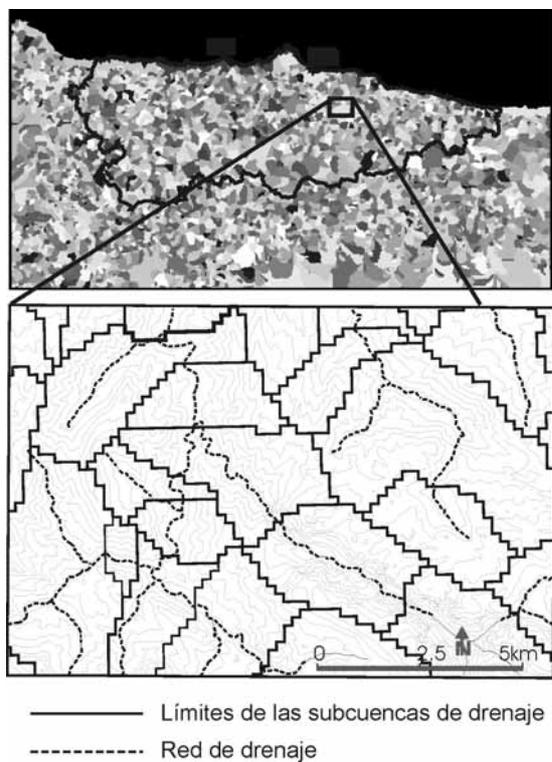


Figura 5. Subcuencas de drenaje utilizadas como unidades de relieve en el estudio. En el fragmento ampliado (correspondiente a una hoja 1:25.000) se representan los límites de las subcuencas (línea continua gruesa), las curvas de nivel con equidistancia de 100 metros y los principales ríos de la zona (líneas discontinuas).

Figure 5. Drainage watersheds used as units of relief in the study area. The extended fragment (corresponding to a 1:25.000 sheet) includes the watershed limits (thick solid line), the 100-metres contour lines and the main rivers of the area (dashed lines).

3.5. Modelo de susceptibilidad

La construcción del modelo de susceptibilidad se llevó a cabo aplicando un análisis condicional basado en el teorema de Bayes (Morgan, 1998). En este análisis se considera que 1) la frecuencia de determinados eventos, presencia de movimientos en masa profundos en nuestro caso, puede ser utilizada para calcular la probabilidad de desarrollo de nuevos eventos y 2) las Unidades de Condición Única (UCU), definidas a partir de dos o más factores condicionantes, son unidades homogéneas a las que asignar un valor de probabilidad frente al evento estudiado.

Para cada UCU, resultante de la combinación de dos o más factores condicionantes, la probabilidad condicionada de ocurrencia de movimientos en masa ($P(MM-UCU)$) se define como:

$$P(MM-UCU) = a_{MM-UCU} / a_{UCU}$$

Donde a_{MM-UCU} es el área de cada UCU correspondiente a movimientos en masa y a_{UCU} es el área total de cada Unidad de Condición Única.

Para definir las UCU se utilizaron los factores geología del sustrato y pertenencia a subcuenca de drenaje, previamente descritos. En el modelo matricial que combina geología y subcuencas, cada UCU es definida como el conjunto de celdas que son iguales para ambos factores, con lo que se subdivide todo el territorio en un número de unidades mucho menor que el número total de celdas del área de estudio. A continuación, la capa con las UCU se combinó con la cartografía de movimientos en masa, tras convertir esta última a formato matricial. Con este cruce se establece el área de cada UCU afectada por movimientos en masa, que se divide por el área total de la unidad. El resultado de esta operación es el valor de probabilidad que se asigna al modelo de susceptibilidad.

4. Resultados

4.1. Litología

Para cada formación geológica se calculó el porcentaje de su extensión planimétrica que está afectado por movimientos en masa profundos; este porcentaje varía desde el 0% hasta valores próximos al 20% de área afectada. Del conjunto de formaciones geológicas existentes en Asturias, las formaciones de pizarras y lutitas o las que presentan alternancias de estas litologías con otras como areniscas, son las más afectadas por movimientos en masa.

Los valores más bajos son especialmente frecuentes en las formaciones de cuarcitas y calizas, si bien en estas últimas la variabilidad es mayor. Los valores intermedios, entre el 2 y el 5%, se registran en litologías muy variadas, como las pizarras metamórficas del occidente de Asturias, las areniscas, pizarras y lutitas del paleozoico inferior y medio e incluso en algunas formaciones calcáreas, especial-

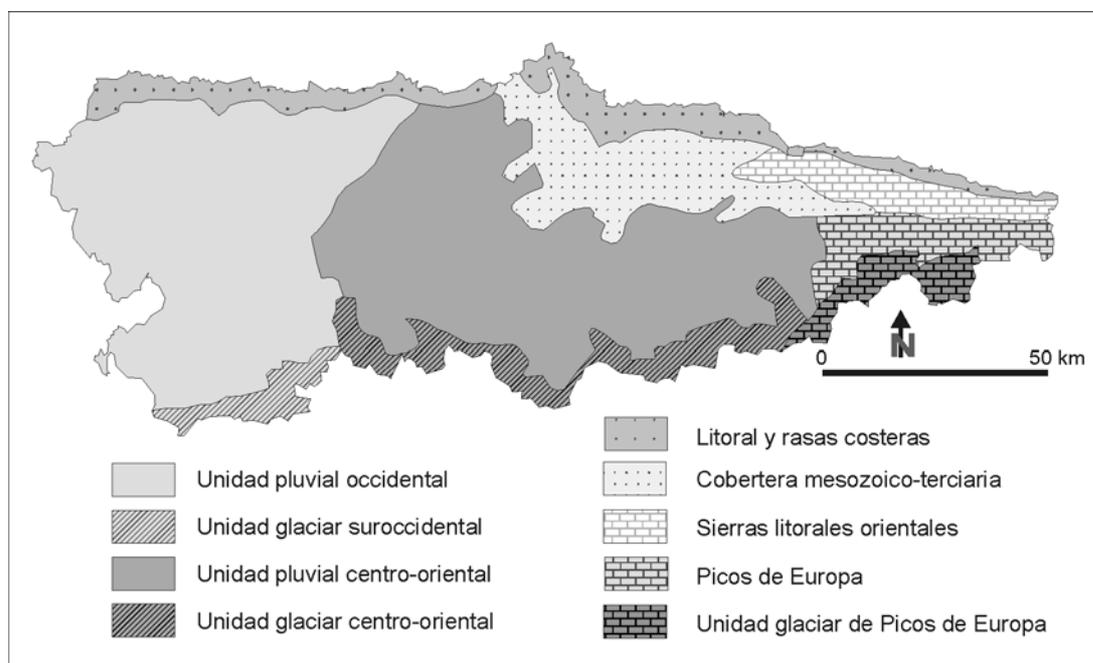


Figura 6. Unidades geomorfológicas en Asturias. Tomado de Marquín y Farias (1993).
 Figure 6. Geomorphologic units in Asturias. (after Marquín and Farias, 1993).

mente mesozoicas. Por último, la mayor presencia de movimientos en masa se da en formaciones de arcillas, lutitas, arenas y margas de edad mesozoica y sobretodo en las formaciones de lutitas y areniscas del Carbonífero superior, que ocupan una gran extensión en la zona centro-meridional de Asturias.

4.2. Subcuencas de drenaje

Como se hizo para la litología, para cada subcuenca de drenaje se calculó el porcentaje de su extensión ocupado por movimientos en masa profundos. Este valor varía desde cero hasta el 31,2%.

Los porcentajes obtenidos muestran una variabilidad espacial grande, pero es posible reconocer algunas tendencias o valores medios para diferentes zonas geomorfológicas. Las zonas geomorfológicas consideradas son las representadas en el mapa de la figura 6. Para cada una de estas zonas se calculó el valor medio que toman en el porcentaje de área afectada por movimientos en masa las subcuencas incluidas. Dentro de las zonas con

modelado típicamente fluvial la presencia de movimientos es mayor en la zona centro-oriental, en relación con las litologías dominantes en esta zona. También se reconoce un incremento en la frecuencia de movimientos en las áreas que estuvieron alaciadas; ésto es especialmente claro en la zona occidental. Como áreas con baja frecuencia de movimientos destaca la rasa costera, de acuerdo con su morfología prácticamente plana los movimientos en esta unidad se localizan únicamente en el actual acantilado.

4.3. Modelo de susceptibilidad

En el modelo de probabilidad final los valores varían de 0 a 1. Estos valores se agruparon en cinco intervalos que corresponden a cinco clases de susceptibilidad (Fig 7). En la clase de susceptibilidad muy baja se incluyen las combinaciones de litología y subcuenca de drenaje con probabilidad 0, es decir, con 0% del territorio afectado por movimientos en masa profundos. En la clase siguiente, de susceptibilidad baja, se incluyen las zonas con

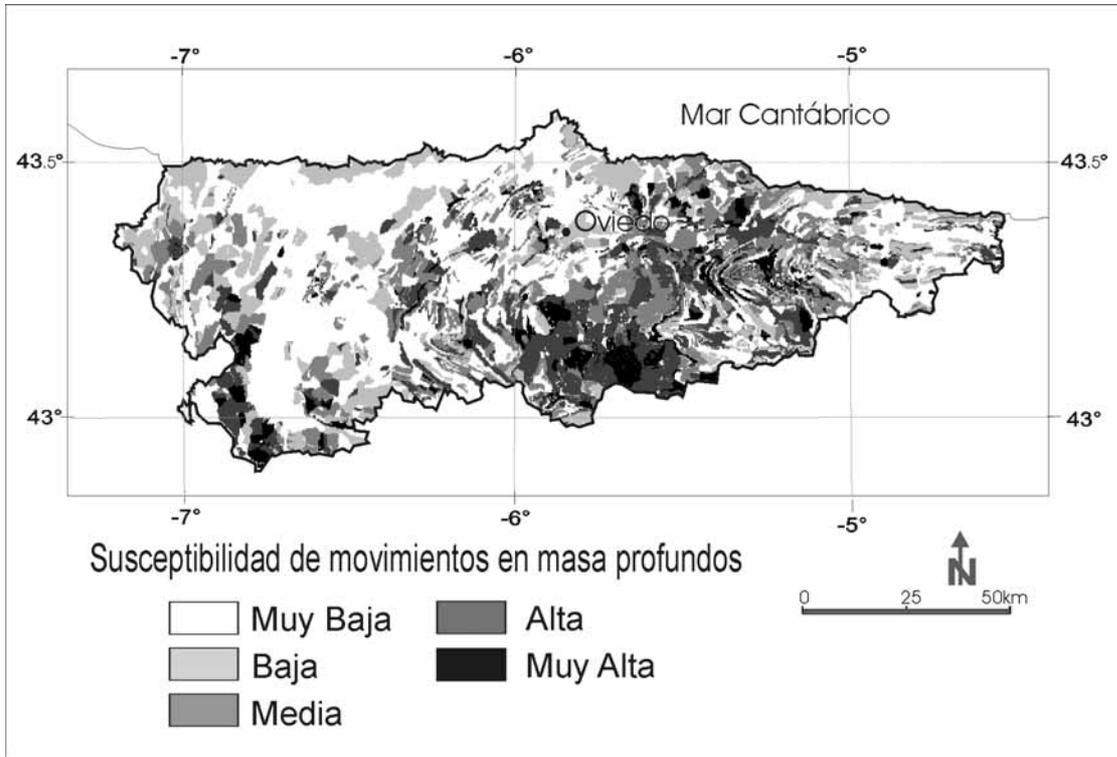


Figura 7. Modelo de susceptibilidad de movimientos en masa profundos para Asturias.
 Figure 7. Deep mass movements susceptibility model for Asturias.

un porcentaje de presencia de movimientos mayor de 0 y menor de 2; con susceptibilidad media si el porcentaje está entre 2 y 5; susceptibilidad alta si el porcentaje está entre 5 y 15; y, por último, se ha considerado como clase de susceptibilidad muy alta las unidades en las que el porcentaje de área afectada por movimientos en masa profundos es superior al 15%. En la tabla 1 se el área ocupada por cada clase para toda Asturias

La clase de susceptibilidad muy baja es la de mayor extensión y ocupa una gran parte del occidente de la región, preferentemente sobre formaciones cuarcíticas. Esta clase también tiene cierta continuidad en algunas áreas costeras y en las sierras calcáreas del oriente de Asturias y parte de la región de Picos de Europa.

La zona más extensa con alta frecuencia de movimientos en masa se concentra en el sector centro-sur de Asturias, en la región geológica de la Cuenca Carbonífera Central y algunas otras zonas con series terrígenas del carbonífero medio y supe-

rior. Además de en estas zonas con rocas carboníferas, también son frecuentes las áreas de alta susceptibilidad en algunas zonas del centro de la región, siguiendo las áreas en que afloran las rocas de la cobertera mesozoico-terciaria.

Un último sector con alta frecuencia de movimientos en masa se localiza en el extremo sur-occidental de Asturias, sobre formaciones de pizarras en áreas de fuerte relieve. En esta zona el modelado fluvial se caracteriza por la existencia de valles profundos con laderas muy largas y de fuerte pendiente.

Excluyendo las áreas de más alta susceptibilidad ya descritas, para toda la montaña central asturiana predominan los sectores de susceptibilidad media y alta.

5. Discusión y conclusiones

En el modelo presentado los factores condicionantes considerados son: 1) formación geológica

Tabla 1. Extensión ocupada por las diferentes clases definidas en el mapa de susceptibilidad (Fig. 7). Los valores se dan como extensión total y como porcentaje que representan respecto a la extensión total de Asturias. Los valores de 'Límite del intervalo' corresponden al valor máximo de porcentaje de unidad afectada por movimientos en masa profundos incluido en cada clase.

Table 1. Extension of the different classes on the susceptibility map (fig 7). The values are given as total extension and extension percentage with respect to the area of Asturias. The values of 'Limit of interval' are the maximum value of percentage of unit affected by deep mass movements including in each class.

Clase de susceptibilidad	Área (km ²)	Porcentaje de Asturias	Límite del intervalo
Muy Baja	4937.5	47	0
Baja	1625.0	26	2
Media	1750.0	28	5
Alta	1625.0	26	15
Muy Alta	625.0	10	100

del sustrato y 2) pertenencia a pequeñas subcuencas de drenaje. El primero es uno de los factores condicionantes que se recogen en todas las descripciones de procesos de inestabilidad de las laderas (Terzaghi, 1950) y se utiliza en muchos de los modelos de susceptibilidad por diferentes procesos de ladera (Remondo, et al., 2003; Fernández et al., 2003; Corominas, et al., 2003).

Una vez establecida la variable geología del sustrato, el conjunto de factores condicionantes y desencadenantes de grandes movimientos en masa es extremadamente variado, y consideramos, que con ámbito regional, son muy difíciles de definir y cartografiar con criterios homogéneos. Para subsanar este déficit, todo el territorio de la región se ha dividido en pequeñas unidades de relieve, las subcuencas de drenaje. El uso de 'unidades de relieve' definidas con diferentes criterios es relativamente frecuente en la realización de mapas de susceptibilidad y riesgo por movimientos en masa (Van Westen, et al., 1999); especialmente en análisis SIG, (Carrara et al, 1991, 1995; Pasuto and Soldati, 1999).

Además de la geología del sustrato, algunos de los factores que pueden ayudar a comprender la distribución de los movimientos en masa profundos son:

- presencia de fuertes pendientes, especialmente frecuentes en áreas de relieves jóvenes y en cabezas fluviales.
- presencia de modelados heredados que dan laderas inestables en las condiciones actuales, como el caso de los relieves heredados de la actividad glacial pleistocena.

- presencia de laderas de gran longitud en valles fuertemente encajados.
- áreas con actividad sísmica actual y/o reciente.
- disposición favorable de las superficies de discontinuidad del sustrato rocoso para el desarrollo de superficies de fractura.
- tramos de la red fluvial con importante erosión lineal y/o lateral a la que se asocia sobre-excavación en la base de las laderas.

Las subcuencas de drenaje utilizadas son lo bastante reducidas (área media de 8.2 km²) como para poder ser consideradas unidades relativamente homogéneas para los factores enumerados. Es decir, en cada una de las unidades se considera que la intensidad del relieve, la actividad sísmica o la presencia de modelado glacial serán uniformes, de modo que la mayor o menor presencia de movimientos en masa se relacionará con la acción conjunta de estos factores.

Utilizando estas unidades, se presenta un modelo a escala regional que estima la susceptibilidad a movimientos en masa profundos y que combina únicamente dos factores: litología del sustrato y pertenencia a subcuencas de drenaje. Como ya se ha indicado en la metodología, combinando estos dos factores se establecen Unidades de Condición Única (UCU) sobre las que calcular la frecuencia de movimientos en masa profundos. La definición de UCU en estudios de probabilidad y mapas de riesgo por deslizamiento es descrita, junto con otras técnicas estadísticas, en Carrara et al (1995). Con este método se expresa la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa para una determinada localidad y condiciones, de modo similar a

las Funciones de Favorabilidad utilizadas en modelos de susceptibilidad por procesos de ladera por Chung y Fabbri (1999) o Remondo et al (2003). La definición de UCU en el estudio de procesos de ladera también es utilizada por Irigaray (1995) e Irigaray et al (1999); este autor denomina esta técnica como el 'método de la matriz'.

El análisis condicional utilizado para es fácilmente abordable desde un SIG si se dispone de la base de datos cartográfica necesaria. En el análisis presentado deben de ser destacados dos aspectos: 1) para realizarlo se dispuso de la cartografía de todos los movimientos en masa profundos de la región, casi 4500 masas deslizadas y 2) la utilización de pequeñas subcuencas de drenaje permite una aproximación indirecta a la distribución espacial de un variado conjunto de posibles factores condicionantes, difíciles de cartografiar con criterio homogéneo para un territorio amplio.

En cuanto a la posible aplicación del modelo en un análisis de riesgo, deben de ser tenidas en cuenta algunas ideas que se discuten a continuación.

El inventario de procesos de ladera en Asturias, realizado a partir de archivos de prensa para un total de 15 años (Domínguez Cuesta et al. 1999), recoge numerosas referencias a movimientos en masa superficiales (más de 200), pero ninguna a movimientos en masa profundos. Algunas evidencias geomorfológicas parecen indicar que en la Cordillera Cantábrica algunas condiciones climáticas y tectónicas pasadas fueron más favorables para el desarrollo de grandes deslizamientos y flujos (Menéndez Duarte y Marquínez, 1996; González Díez et al, 1996). Por otra parte, estos fenómenos dejan una huella que tarda milenios en borrarse del relieve (Cendrero and Dramis, 1996; González Díez et al, 1996), por lo que hoy son detectables todos los movimientos en masa originados a lo largo de un lapso temporal muy largo. Así, el significado de un modelo de susceptibilidad realizado es muy diferente al de otras inestabilidades menores, mucho más frecuentes, como pueden ser los deslizamientos y flujos superficiales o las caídas de rocas.

Los movimientos en masa profundos pueden presentar algunas similitudes con los deslizamientos y flujos superficiales pero, en estos últimos, la más alta frecuencia temporal facilita las posibilidades de análisis: 1) ayuda a determinar los factores

condicionantes y desencadenantes más frecuentes (Pasuto y Silvano, 1998; Zêzere et al, 1999; Bell and Maud, 2000) 2) proporciona una población abundante que posibilita los análisis estadísticos (Carrara, 1983; Chung et al, 1995; Baeza y Corominas, 2001; Menéndez Duarte et al, 2003) 3) da la posibilidad de tener varias poblaciones de movimientos en masa que permitan validar los modelos (Irigaray et al, 1999).

En el caso de los movimientos en masa profundos no es posible trasladar de forma directa esta metodología de trabajo. Algunas de las limitaciones más evidentes son:

- la antigüedad de muchos de los individuos aún conservados dificulta la interpretación de los factores desencadenantes.

- la morfología actual reconocible en la ladera que ha sufrido la inestabilidad habitualmente está tan modificada que no es posible interpretar la morfología previa que sería la más favorable para que se desencadene un movimiento

- no es posible 'esperar' a tener una nueva población de movimientos en masa para validar el modelo

Además el estudio de los movimientos en masa superficiales que se han producido recientemente, permite suponer que las condiciones ambientales y geológicas no han variado y es posible hacer un análisis predictivo. En el caso de movimientos profundos la elevada pervivencia de las formas en el paisaje no siempre permite asumir esta hipótesis.

En definitiva, nos enfrentamos a fenómenos cuya frecuencia temporal en las condiciones actuales de la Cordillera Cantábrica podemos suponer baja, por lo que la lectura y posible aplicación de los mapas de susceptibilidad debe de ser considerada con cautela.

Desde el punto de vista estrictamente aplicado, si se puede destacar, sin embargo, que son muy frecuentes las reactivaciones de movimientos preexistentes. Por ello, el modelo no refleja únicamente la posibilidad de que se desencadenen nuevos movimientos sino, también, la posible actividad o reactivación de los preexistentes, que pueden producir daños en vías de comunicación, edificaciones y otras infraestructuras.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Principado de Asturias, Consejería de Infraestructuras y Política Territorial (Dirección General de Ordenación del Territorio y Urbanismo) en el marco del Proyecto de Investigación que lleva por título 'Cartografía de Riesgos Naturales en el Principado de Asturias'. Los autores quieren agradecer sus aportaciones a los revisores del trabajo, Dr. Marcel Hürlimann y un revisor anónimo, ya que han supuesto importantes mejoras en diversos aspectos del mismo, especialmente en la metodología.

Referencias bibliográficas

- Baeza, C. & Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surf. Process. Landforms*, 26, 1251-1263.
- Bastida, F. y Aller, J. (1985). Rasgos geológicos generales. En: C. Aramburu y F. Bastida (eds), *Geología de Asturias*, Ediciones Trea, Gijón, Asturias, 27-33.
- Bell, F.G. & Maud, R.R. (2000). Landslides associated with the colluvial soils overlying the Natal Group in the greater Durban region of Natal, South Africa. *Environmental Geology*, 39, 1029-1038.
- Carrara, A. (1983). Multivariate Models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15, 403-427.
- Carrara A., Cardinali M, Detti R, Guzzetti F, Pasqui V, Reichenbach P (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surf. Process. Landforms*, 16: 427-445.
- Carrara A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. & Reichenbach, P. (1995). Gis Technology in Mapping Landslide Hazard. In: A. Carrara & F. Guzzetti (eds), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Pub., Dordrecht, the Netherlands, 135-175.
- Cendrero, A. & Dramis, F. (1996). The contribution of landslides to landscape evolution in Europe. *Geomorphology*, 15, 191-211.
- Corominas, J.; Copons, R.; Vilaplana, J.M.; Altimir, J. and Amigó, J. (2003). Integrated Landslide Susceptibility Analysis and hazard Assessment in the Principality of Andorra. *Nat. Hazards*, 30, 421-435.
- Chung, C.F. & Fabbri, A. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogr. Eng. Remote Sensing*, 65, 12: 1389-1399.
- Chung, C.F.; Fabbri, A. & van Westen, C.J. (1995). Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: A. Carrara and F. Guzzetti, (eds), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Pub., Dordrecht, the Netherlands, 107-133.
- Dai F. C., Lee C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228.
- Domínguez M. J.; Jiménez, M. & Rodríguez A. (1999). Press archives as temporal records of landslides in the North of Spain: relationships between rainfall and instability slope events. *Geomorphology*, 30, 125-132.
- Dymond J.R., Murray R. J., Lovell L. R. (1999). Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country. *JAG (ITC)*. Vol. 1, 2. 122-131.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc). 1997. Arc-Info 7.1.2.
- Fernández, T.; Irigaray, C.; Hamdouni, R. & Chacón, J. (2003). Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain) *Nat. Hazards*, 30, 297-308.
- González-Díez, A.; Salas, L.; Díaz de Terán, J.R. & Cendrero, A. (1996). Late Quaternary climatic change and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region, Spain. *Geomorphology*, 15, 291-309.
- Irigaray, C.; Fernández, T.; Hamdouni, R. & Chacón, J. (1997). Validación de un método de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera. Aplicación al sector de Rute, en J. Corominas, E. Alonso y J. Chacón (eds.), *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Granada, vol.1, Granada, España, 39-49.
- Irigaray, C.; Fernández, T.; Hamdouni, R. & Chacón, J. (1999). Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surf. Process. Landforms*, 24, 537-544.
- Jonson, S.K. & Dominge, J.O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 11, 1593-1600.
- Jiménez Sánchez, M. (1997). Movimientos en masa en la cabecera del río Nalón (Cordillera Cantábrica, NO España). *Cuaternario y Geomorfología*, 11, 3-16.
- Jiménez Sánchez, M. (2002). Slope deposits in the Upper Nalón River Basin (NW Spain): an approach to a quantitative comparison. *Geomorphology*, 43, 165-178.
- Jiménez Sánchez, M.; Farias, P.; Rodríguez García, A. & Menéndez Duarte, R. (1999). Landslides development in a coastal valley in Northern Spain: conditioning factors and temporal occurrence. *Geomorphology*, 30, 115-123.
- Marquínez, J. & Farias, P. (1993). Síntesis de Información sobre el Territorio: La Geología. En: *Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de Asturias*. Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias, 20-27.
- Menéndez Duarte, R. & Marquínez, J. (1996). Glaciarismo y evolución postglaciar de las vertientes en el Valle de Somiedo. Cordillera Cantábrica. *Cuaternario y Geomorfología*, 10, 21-31.

- Menéndez Duarte, R.; Marquínez, J. & Devoli, G. (2003). Slope instability in Nicaragua triggered by the Hurrícan Mitch. Geomorphological control on shallow mass movements. Environmental. *Geomorphology*, 44. 290-300.
- Montgomery D. R., Sullivan K., Greenberg H. M. (1998). Regional test of a model for shallow landsliding. Hydrological processes. Vol. 12, 6, 943-955.
- Morgan, B. W. (1968). *An introduction to Bayesian statistical decision process*. Prentice-Hall, New York, pp. 116.
- Pasuto, A. & Silvano, S. (1998). Rainfall as a trigger of shallow mass movements. A case study in the Dolomites, Italy. *Enviromental Geology*, 35. 184-189.
- Pasuto, A. & Soldati, M. (1999). The use of landslide units in geomorphological mapping: an example in the Italian Dolomites. *Geomorphology*, 30. 53-64.
- Peucker, T.K.; Fowler, R.J.; Little, J.J. & Mark, D.M. (1978). The tirnagular irregular network. Proceedings of the ASP DTM Symposium: 516-540. American Societey of Photogrammetry. Falls Church, Virginia.
- Remondo, J.;González-Díez, A.; Díaz de Terán, J.R. & Cendrero, A. (2003). Landslide susceptibility models utilising spatial data análisis techniques. A case study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain), *Nat. Hazards*, 30. 267-279.
- Santanac, N; Baeza, C.; Corominas, J.; de Paz, A. & Marturiá, J. (2003). A GIS-Based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain), *Nat. Hazards*, 30. 281-295.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslide. *Geol. Soc. Am., Berkey Volume*, pp. 83-123.
- Van Westen, C.J.; Seijmonsbergen, A.C. & Mantovani, F. (1999). Comparing Landslide Hazard Maps, *Nat. Hazards*, 20. 137-158.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster & R.J. Krizek (eds.) *Landslides: Analysis and Control*, National Academy of Sciencies, Transportation Research Board, Washungton DC, Special Report, 176. 11-33.
- Zêzere, .JL.; Brum Ferreira, A. & Rodrigues, M.L. (1999). The role of conditioning and triggering factors in the ocurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology* 30. 133-146.