

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Facultad de Ciencias

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo, aplicación y validación de
procedimientos y modelos para la evaluación
de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a
procesos geomorfológicos**

MEMORIA PRESENTADA POR

Jaime Bonachea Pico

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

SANTANDER, JULIO 2006



CAPÍTULO 8

CONCLUSIONS/CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONS

As a result of the work carried out, which has been presented above, there have been a number of advances made with respect to the development and application of models for susceptibility, hazard, vulnerability and risk for geomorphological processes. These advances, are described below, and refer, to the improvement in prediction capability of the susceptibility and hazard models, to the development of risk models, and also of models to predict some geomorphologic processes and risks that had not been previously analysed using probabilistic techniques. The potential of those methods as prospective tools for Strategic Environmental Impact Assessment applicable to town planning has also been demonstrated.

In relation with the aims set out (see Chapter 5) the following conclusions can be drawn:

- The improvement in the statistical procedures used to produce landslide susceptibility models has made it possible to obtain models with a greater prediction capability than that corresponding to the susceptibility models presented by previous authors. As a result of the new models obtained from this work, prediction capability has increased on the average by 5% with respect to the results obtained by Remondo (2001). This improvement can partly be attributed to the use of statistical techniques that make it possible to use quantitative variables as continuous data as well as to the use of variables of greater accuracy.
- The combination of variables that have shown a greater prediction capability is: lithology, landcover, regolith thickness, elevation, slope gradient, and aspect. The use of geometric variables derived from the use of high resolution Digital Elevation Models increases the prediction capability of susceptibility models. The DEM used for this work, of greater accuracy and of greater resolution than the one used previously, is also partly responsible for the improvement obtained.
- The inclusion of new variables in the analysis (such as insolation, distance from faults or from rivers) has not produced any improvement in the prediction capability of the models. It does, therefore, seem that these variables contribute very little to the occurrence of landslides, which could be due to the fact that they are not properly represented or, what is even more likely, that they become redundant when used in conjunction with other variables or combinations of variables, or simply that the variable bears no significant influence upon the process. The null effect of including the last two variables mentioned suggests that neither seismic activity nor river bank undercut are triggering factors for shallow landslides in the area.
- Alternatively, neither the incorporation of fuzzy boundaries in the case of the categorical variables, nor the improvement of the landcover map (one of the most significant variables in principle), has given rise to improvements of any importance in

susceptibility prediction. This is probably indicative of the fact that the variables that were used previously were of relatively high quality, for which reason the added improvements have not made any appreciable difference.

- The new inventory of shallow landslides obtained for the area under study, together with the already existing ones, has been used to produce new susceptibility models and to evaluate the models based on preceding inventories. In addition, this new inventory has shown a decrease in landslide frequency in the area; earlier works indicated, in contrast, that the number of landslides showed a rising trend. This fact must be analysed for longer periods in order to be able to determine whether the frequency conforms to the previously identified trends or to those observed in the last four years that were analysed.
- The evaluation or validation of susceptibility models is essential in order to be able to determine their prediction reliability or capability. The different validation strategies tested, which have shown similar results, have made it possible to select the susceptibility model offering the greatest prediction capability. Of all the models generated, it is the model obtained with the 1991-1997 landslide sample and the combination of variables: lithology, landcover, regolith thickness, elevation, slope gradient and aspect, that provides the best prediction. This spatial probability model has been used to transform susceptibility into hazard.
- The information relative to temporal data on past landslide occurrences in the area under study, together with the information gathered at world and/or national level on the frequency of catastrophic events, has served to draw up scenarios simulating possible future frequency trends for landslides. These scenarios range from an optimistic situation (scenario A: the average for what has happened in the past) to an extremely pessimistic situation (scenario C: the exponential increase in accordance with the best fit for the data observed in the past), and these have been the basis for the construction of different hazard models, one for each of the three different scenarios being considered.
- In order to predict future behaviour with regard to magnitude, volume and run-out distance, what has been proposed is an event scenario based on the average (and most frequent) type of landslide that exists in the area under study (shallow landslides that affect the regolith; average surface area: 510 m²; average volume: 250 m³; speed ranging from fast to very fast), and for which the different susceptibility models have been created. That is to say, the hazard models created from the susceptibility models take into consideration the magnitude and the run-out distance. This magnitude is a determining factor when it comes to estimating the vulnerability of exposed elements.
- Landslides that have occurred recently allow the elements at risk to be identified directly, and these elements are: infrastructure, buildings and landcover. Another aspect to be taken into consideration is that of socio-economic activities, which are affected indirectly.
- The spatially represented exposed elements have been mapped, producing the corresponding database in which the €/pixel economic value of the element has been included, thus making it possible to create economic value maps which have then later been used to estimate vulnerability and risk.

- From the analysis of the effects caused by landslides in the past it has been possible to extract criteria on which to base the vulnerability estimation. Due to there being little data referring to damage produced by landslides in the past, it has been necessary to carry out a series of estimations, based on indirect data, which take into account the possible costs that the type of landslide being analysed can cause when it affects a specific element.
- It has been possible to create vulnerability models for each exposed element, based on the ratio between losses that have been incurred on the element (if this latter is affected by landslides) and the value of the element itself. In this way, vulnerability has been expressed in values fluctuating between 0 and 1. Obviously, vulnerability depends on the type of element affected and on the magnitude of the landslide. Out of the different kinds of infrastructure, it is the local roads and railway track that are the most vulnerable, whereas the motorway is the least. The vulnerability of buildings is very low because the landslides are of limited magnitude, causing scarcely any damage to them. As far as agricultural usage is concerned, the crop-growing areas are the most vulnerable to landslides, followed by meadow areas and then reforested areas.
- A procedure has been developed to deal with the estimation of indirect losses (the disruption of economic activities), since these could be highly relevant. In order to do this, it has been supposed that the occurrence of a landslide affecting different infrastructures in the area causes the traffic using that particular road to come to a halt and, as a consequence, workers are either delayed or are forced to take an alternative longer route. This ultimately means a loss in working hours and, therefore, a series of indirect economic losses. The analysis of indirect losses is not as exact as that of direct losses, and should be considered as a first approximation to the indirect damage caused in this area by landslides.
- Integrating the vulnerability models with the element value maps and with the hazard models has made it possible to obtain specific risk models for each type of element, expressed in economic terms (€/pixel), for a specific period of time and in accordance with the hazard scenarios being considered.
- The greatest specific risk is produced in the infrastructures (and within this group, in local roads), with buildings being a far less important case. The integration of different specific risk models has led to different direct risk models being obtained, one for each hazard scenario. Indirect risk is more important in the case of the railway than in any of the other infrastructures, where it is of little significance. Indirect risk is equivalent to one fifth of direct risk, which indicates that the indirect effects caused by landslides in the area are relatively minor importance. However, if all the possible indirect effects were taken as a whole, then those figures could be equal to or greater than those corresponding to the direct risks.

The final figures for shallow landslide risk obtained for the different periods under analysis are relatively small when compared to those resulting from other kinds of processes (floods, for example). Therefore, in most cases it can actually be more viable, from an economic point of view, to let the process take place and then repair or restore.

Since it has not been possible to carry out a rigorous evaluation of the risk models obtained (due to insufficient data for validation), the values represented in the models should not be considered as exact values of future losses, but rather as approximate or potential figures,

assuming that the process will continue to behave in the future in a similar way to as it did in the past.

Obtaining risk models, expressed in economic terms, makes it possible to identify those areas where a greater effort should be made, in order to anticipate and mitigate the damage caused by geomorphological processes, as well as earmarking economic funding to deal with possible damage.

- The application of procedures and techniques developed for landslide analysis and prediction to a completely different process, the appearance of collapse sinkholes and shallow subsidence in evaporitic terrains, underlines the potential these procedures have for the analysis of different geomorphological processes. The preliminary results obtained indicate that this set of techniques is indeed useful for predicting the areas affected by this process in the future. The absence of temporal inventories (past frequency) has made it impossible to transform the susceptibility models into hazard models. Nevertheless, given the degree of activity of the process in the area under study, following it up over the next few years will allow hazard maps expressed in terms of probability to be drawn up.
- The creation of databases and metadata on variables and the models generated helps towards making this procedure one that can be reproduced by any operator and towards keeping it up to date. The way they are presented makes them comprehensible documents for decision makers and, therefore, useful tools for risk management.

Summing up, the existence of detailed inventories of landslides that have occurred in the past, as well as spatial data, referring to variables related to terrain instability, of high quality and in great detail, has made it possible to generate susceptibility models with a known prediction capability that improves upon the previously attained one. The more detailed the landslide inventories become in the future, the more reliable the models generated will be, and these latter will make it possible to better establish future behavioural trends. The three scenarios proposed in this work show the possible future frequency of landslides based on the existing landslide frequency in the past and on the general trends shown by this type of process at both national and world level. A more detailed analysis of these trends would make it possible to develop probabilistic hazard models that come closer to future situations and, therefore, better quality risk models.

In relation with the aspects dealt with in this work and the conclusions obtained, possible future lines of research that would improve both the procedures and results obtained have been considered.

- One of the lines to follow is improving the understanding of the different conditioning factors in relation with landslides; that is to say, knowing what influence the variables used in the susceptibility analysis have on the occurrence of landslides.
- It is also important to include additional variables, not taken into consideration in previous works. It is likely that the most important variable, out of those not taken into account previously, is the one that represents the structure/topography relationship, which can be fairly accurately modelised from the data present in conventional geological maps.
- It would be convenient to look into the possibility of obtaining very high resolution Digital Elevation Maps, since it seems very clear that the higher the resolution on these

maps is, the greater the susceptibility model's prediction capability is. The use of different techniques (photogrammetry, LIDAR, GPS, total stations, etc), allows a large number of points to be captured, and these serve to generate high resolution and high quality DEMs.

- Similarly, the effect of a better representation of the instability features as data for analysis (dependent variable) should also be analysed. So far, instability features have been considered as points that are indicative of the centre of the failure area, or as polygons that represent the entire rupture area. What is intended for the future is to use the aureole close to the scarp area, as this area is the one that offers the conditions closest to those on the slope prior to the rupture.
- Another of the lines to follow up is that of applying analysis to other cinematic types of mass movements and to work on the development of other methods incorporating magnitude and the run-out distance, especially in the case of large-scale landslides, which bears a direct influence upon the vulnerability of the elements and, therefore, that of risk. The models on the run out distance, both deterministic (dynamic simulation) and probabilistic, would make the estimation of possible damage caused by the corresponding processes far easier to carry out.
- Improvement in mathematical techniques to modelise landslide susceptibility is indeed promising. There have recently been improvements of a technical nature to optimise modelisation. Nevertheless, it is still necessary to look into these potentialities in greater detail, like making use of other techniques such as the artificial neural networks. Some models involving the use of this type of technique have been experimented with, providing us with promising results that must be analysed in detail.
- It is essential to continue carrying out systematic inventories of events in order to improve the susceptibility analyses and to contrast them with those results obtained prior to this. That data will in turn improve the hazard models thanks to there being a greater amount of information referring to landslide frequency, which will make it possible to define more precisely the future trends that the process could undergo and, consequently, propose more realistic scenarios of future frequency.
- When defining those scenarios it will be necessary to take into consideration the relationship between landslide frequency and socio-economic or climatic factors. Consequently, it will be necessary to look even more deeply into the study of the relationship between human activities and the frequency of the process. Data so far analysed have shown that there is a certain relationship between a rise in the GDP and the increase in the number of natural processes, for which reason it is necessary to carry out an in-depth analysis of this type of relationship. On the other hand, the frequency of triggering factors should also be considered in order to design scenarios that are complementary to those based on the frequency of past events.
- The continuous updating of non static variables such as land use or the elements (new infrastructures and buildings, town planning, etc.), would help to generate susceptibility models and risk models more in accordance with the new situations that can arise. The formulation of different land-use scenarios, based on different planning proposals, would allow the generation of risk models that could be used as tools for planning or for strategic EIA.

- It would be convenient to carry out systematic cost/benefit analyses to compare potential damage under different scenarios with the cost of implementing mitigation measures or strategies, to determine to what extent the latter are justified.
- The evaluation process for risk models needs to be improved by means of methods or strategies that are comparable to those used for susceptibility model evaluation. Efforts should be devoted to the gathering of data on damage caused by landslides in order to better test the quality of the risk predictions obtained.
- Diffusion of the methods and procedures used would make it possible to develop performance protocols for use in disasters and to interact with the decision makers so as to gain a better understanding of hazard and risk models and to design mitigation measures that will help to reduce those losses.
- The last of the avenues to be explored in the future is that of attempting to apply these methods to other processes. Although preliminary results have been given here in relation to sinkhole susceptibility models, it would also be interesting to go even more deeply into the question of the method's potentiality regards this and other processes linked to a series of spatial variables such as the determining of areas liable to undergo erosion processes, or processes related to the presence of permafrost or the elaboration of potential vegetation models. Following the trends indicated by the European programmes, the methodologies and analysis of the processes described should be contemplated within a broader framework, the multi-risk analysis that would include the potential damage due to all the different processes threatening an area. To integrate into one single model all that which is relative to several different processes is, from the conceptual point of view, a complex task, but this certainly does not mean that an attempt to find a better application of these tools for prevention should not be made.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

Como consecuencia del trabajo realizado, presentado anteriormente, se han obtenido una serie de avances en lo que se refiere al desarrollo y aplicación de modelos de susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo para procesos geomorfológicos. Dichos avances se describen a continuación y, se refieren, sobre todo, a la mejora en la capacidad de predicción de los modelos de susceptibilidad y de peligrosidad, al desarrollo de modelos de riesgo, también al desarrollo de modelos para predecir procesos y riesgos geomorfológicos que no se habían ensayado con anterioridad utilizando técnicas probabilísticas, o incluso en la puesta de manifiesto del potencial de los métodos descritos como herramientas de carácter prospectivo para la Evaluación del Impacto Ambiental de tipo Estratégico, aplicable al planeamiento urbanístico.

En relación con los objetivos planteados (ver capítulo 5), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La mejora de los procedimientos estadísticos empleados para la elaboración de modelos de susceptibilidad de deslizamientos, ha permitido obtener modelos con mejor capacidad de predicción que la que presentaban los modelos de susceptibilidad propuestos por anteriores autores. Como resultado de los nuevos modelos obtenidos durante este trabajo, la capacidad de predicción se ha visto incrementada de promedio un 5% respecto a los resultados obtenidos por Remondo (2001). Parte de esa mejora es atribuible al uso de técnicas estadísticas que permiten tratar las variables no categóricas de forma continua (sin ser discretizadas) y al uso de variables más precisas.
- La combinación de variables que ha demostrado una mayor capacidad de predicción es: litología, usos del suelo, espesor de regolito, altitud, pendiente y orientación. El uso de variables geométricas derivadas de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDEs) de alta resolución, aumenta la capacidad de predicción de los modelos de susceptibilidad. El MDE utilizado para este trabajo, más exacto y de mayor resolución que el utilizado anteriormente, explica también una parte de la mejora obtenida.
- La inclusión de nuevas variables en el análisis (como insolación, distancia a fallas o distancia a ríos), no ha producido mejoras en la capacidad de predicción de los modelos. Por tanto, parece que dichas variables contribuyen poco a la aparición de deslizamientos, lo cual puede deberse a que la representación de las mismas no es satisfactoria o, más probablemente, al hecho de que sean redundantes con otras variables o combinaciones de variables, o bien a que la variable no tenga influencia significativa sobre el proceso. En concreto, el nulo efecto de la inclusión de las dos últimas variables indicadas, sugiere que ni la actividad sísmica ni el socavamiento erosivo producido por los cauces fluviales son factores desencadenantes de deslizamientos superficiales en la zona.

Por otro lado, ni la incorporación de límites difusos en el caso de las variables temáticas, ni la mejora del mapa de usos del suelo (una de las variables en principio más significativas), ha dado lugar a mejoras importantes en la predicción de la susceptibilidad. Esto probablemente refleja el hecho de que las variables previamente utilizadas tenían bastante calidad, por lo que las mejoras añadidas no han representado una diferencia apreciable.

- El nuevo inventario de deslizamientos superficiales obtenido para la zona de estudio, junto con los ya existentes, se ha utilizado para la elaboración de nuevos modelos de susceptibilidad y para la evaluación de los modelos realizados a partir de los inventarios precedentes. Además, este nuevo inventario ha mostrado un decremento de la frecuencia de deslizamientos en la zona; trabajos anteriores indicaban, por el contrario, que existía una tendencia al aumento en el número de deslizamientos. Este hecho deberá analizarse para periodos más largos, con el fin de comprobar si la frecuencia se ajusta a las tendencias anteriormente identificadas o bien a las observadas en los últimos cuatro años analizados.
- La evaluación o validación de los modelos de susceptibilidad es indispensable para determinar su fiabilidad o capacidad de predicción. Las diferentes estrategias de validación ensayadas, que han mostrado resultados similares, han permitido seleccionar el modelo de susceptibilidad que ofrece una mayor capacidad de predicción. De todos los modelos generados, el modelo obtenido con la muestra de deslizamientos 1991-1997 y la combinación de variables: litología, usos del suelo, espesor de regolito, altitud, pendiente y orientación, es el que proporciona una mejor predicción. Este modelo de probabilidad espacial se ha utilizado para transformar la susceptibilidad en peligrosidad.
- La información relativa a la frecuencia temporal de deslizamientos en la zona de estudio, junto con la información recopilada a nivel mundial y/o nacional sobre frecuencias de eventos catastróficos, ha servido para formular escenarios que simulan las posibles tendencias de frecuencia futura de deslizamientos. Dichos escenarios, varían desde una situación optimista (escenario A: promedio de lo sucedido en el pasado) hasta una situación muy pesimista (escenario C: incremento exponencial de acuerdo con el mejor ajuste de los datos observados en el pasado), y han sido la base para elaborar distintos modelos de peligrosidad, uno para cada uno de los tres escenarios considerados.
- Con el fin de predecir el comportamiento futuro en lo que respecta a magnitud, volumen y alcance de la masa deslizada, se ha propuesto un escenario de evento basado en el tipo medio de deslizamiento (y más frecuente) existente en el área de estudio (deslizamientos superficiales que afectan al regolito; superficie media: 510 m²; volumen medio: 250 m³; velocidad rápida a muy rápida) y para el cual se han elaborado los distintos modelos de susceptibilidad. Esto es, los modelos de peligrosidad elaborados a partir de los modelos de susceptibilidad tienen en cuenta la magnitud y el alcance de la masa deslizada. Dicha magnitud es determinante a la hora de estimar la vulnerabilidad de los elementos expuestos.
- Se han identificado los elementos afectados directamente por los deslizamientos en el pasado reciente. Estos elementos son: infraestructuras, edificios y usos del suelo. También se ha considerado la exposición de las actividades socioeconómicas, las cuales son afectadas de forma indirecta.
- Los elementos expuestos con representación espacial han sido cartografiados y se han generado las correspondientes bases de datos en las cuales se ha incorporado el valor

económico del elemento en €/píxel, a partir del cual se han elaborado los mapas de valor económico que han sido utilizados en la posterior estimación de la vulnerabilidad y del riesgo.

- A partir del análisis de los efectos producidos por los deslizamientos en el pasado se han podido extraer criterios en los que se ha basado la estimación de la vulnerabilidad. Debido a la escasez de datos relativos a daños provocados por los deslizamientos en el pasado, ha sido necesario realizar una serie de estimaciones, basadas en datos indirectos, que tienen en cuenta los posibles gastos ocasionados por el tipo de deslizamiento analizado cuando afecta a un determinado elemento.
- Se han podido elaborar modelos de vulnerabilidad para cada elemento expuesto, a partir de la relación entre pérdidas provocadas sobre el elemento (si éste queda afectado por deslizamientos) y el valor del propio elemento. De esta forma la vulnerabilidad se ha expresado en valores que oscilan entre 0 y 1. Obviamente, la vulnerabilidad depende del tipo de elemento afectado y de la magnitud del deslizamiento. De todas las infraestructuras, las carreteras locales y la línea de ferrocarril son los elementos más vulnerables, mientras que el elemento menos vulnerable es la autopista. La vulnerabilidad de los edificios es muy baja debido a la reducida magnitud de los deslizamientos, que apenas les dañan. En lo referente a usos agrarios, las zonas dedicadas a cultivos son las más vulnerables a los deslizamientos, seguidas de las zonas de prados y de las repoblaciones forestales.
- Se ha desarrollado un procedimiento para abordar la estimación de pérdidas de carácter indirecto (alteración de las actividades económicas), puesto que éstas podrían ser muy relevantes. Para ello se ha supuesto que la ocurrencia de un deslizamiento que afecta a las diferentes infraestructuras de la zona, ocasiona una interrupción del tráfico que circula por esa vía y, como consecuencia, se produce un retraso de los trabajadores o bien, un desplazamiento alternativo más largo. Esto se traduce en pérdidas de horas laborables y, por tanto, en una serie de pérdidas económicas indirectas. El análisis de las pérdidas indirectas no es tan preciso como el de las pérdidas directas, y debe considerarse como una mera aproximación a los daños indirectos que en esta zona causan los deslizamientos.
- La integración de los modelos de vulnerabilidad con los mapas de valor de elemento y con los modelos de peligrosidad, ha permitido obtener modelos de riesgo específico para cada tipo de elemento, expresados en términos económicos (€/píxel), para un periodo de tiempo determinado y de acuerdo con los escenarios de peligrosidad considerados.
- El mayor riesgo específico se produce en las infraestructuras (y dentro de éstas, en las carreteras locales), siendo poco importante en el caso de los edificios. La integración de los diferentes modelos de riesgo específico ha permitido obtener diferentes modelos de riesgo directo, uno para cada escenario de peligrosidad considerado. El riesgo indirecto es más importante en el ferrocarril que en el resto de las infraestructuras, donde es poco significativo. El riesgo indirecto equivale a una quinta parte del riesgo directo, lo que indica que los efectos indirectos producidos por los deslizamientos en la zona son poco importantes. Sin embargo, si se contemplasen todos los posibles efectos indirectos, esas cifras podrían ser equiparables o superiores a las de los riesgos directos.

Las cifras finales de riesgo por deslizamientos superficiales obtenidas para los distintos periodos analizados, son relativamente pequeñas cuando se comparan con las ocasionadas

por otros tipos de procesos (por ejemplo, las inundaciones). Por tanto, en la mayoría de los casos puede ser más rentable, desde un punto de vista económico, dejar que el proceso actúe y luego reparar o restaurar.

Dado que los modelos de riesgo obtenidos no se han podido evaluar de forma rigurosa (debido a la escasez de datos para validar), los valores que se representan en los modelos no deben considerarse como valores exactos de pérdidas futuras, sino que se han de tomar como cifras aproximadas o potenciales, suponiendo que el proceso se comportará en el futuro de forma similar a como lo hizo en el pasado.

La obtención de modelos de riesgo, expresados en términos económicos, permite identificar las zonas donde es necesario dedicar mayores esfuerzos, con el fin de prevenir y mitigar los daños ocasionados por los procesos geomorfológicos, así como prever partidas económicas para afrontar posibles daños.

- La aplicación de los procedimientos y técnicas desarrollados para el análisis y predicción de los deslizamientos a un proceso muy diferente, la aparición de dolinas por colapso y subsidencia en terrenos evaporíticos, ha puesto de manifiesto el potencial que dichos procedimientos tienen para el análisis de diferentes procesos geomorfológicos. Los resultados preliminares obtenidos indican que este conjunto de técnicas son útiles para predecir las zonas afectadas por este proceso en el futuro. La ausencia de inventarios temporales (frecuencia pasada) ha imposibilitado la transformación de los modelos de susceptibilidad a modelos de peligrosidad. No obstante, dada la actividad del proceso en la zona de estudio, un seguimiento del mismo durante unos pocos años permitiría la elaboración de mapas de peligrosidad expresados en términos de probabilidad.
- La creación de bases de datos y de metadatos sobre las variables y los modelos generados contribuye a la reproducibilidad del procedimiento por parte de cualquier operador y a la actualización. Su representación ayuda a que sean documentos comprensibles para las personas encargadas de la toma de decisiones y, por tanto, constituyan herramientas útiles para la gestión del riesgo.

En resumen, la existencia de inventarios detallados de deslizamientos ocurridos en el pasado, así como de información espacial referente a variables relacionadas con la inestabilidad del terreno, de alta calidad y nivel de detalle, ha permitido generar modelos de susceptibilidad con una capacidad de predicción conocida que mejora la lograda anteriormente. La posibilidad de realizar inventarios de deslizamientos más detallados en el futuro, permitirá generar modelos más fiables, a partir de los cuales establecer mejor las tendencias de comportamiento futuro. En este trabajo se han propuesto tres escenarios que muestran la posible frecuencia futura de los deslizamientos a partir de la frecuencia de deslizamientos existente en el pasado y de las tendencias generales mostradas por este tipo de proceso a nivel mundial y nacional. Un análisis más minucioso de estas tendencias permitiría desarrollar modelos de peligrosidad probabilística más acordes con las situaciones futuras y, por tanto, modelos de riesgo de mayor calidad.

En relación con los aspectos tratados en este trabajo y las conclusiones obtenidas se han planteado posibles líneas de investigación futuras que permitirían mejorar los procedimientos y resultados obtenidos.

- Una de las líneas a seguir es la mejora en el conocimiento de los distintos factores condicionantes en relación con los deslizamientos, es decir, conocer cómo las variables utilizadas en los análisis de susceptibilidad influyen en la aparición de los deslizamientos.
- También es importante la inclusión de variables adicionales, no consideradas en los trabajos precedentes. Probablemente, la variable más importante, entre las que no se han considerado previamente, es la que representa las relaciones estructura/topografía, que pueden ser modelizadas con bastante precisión a partir de los datos presentes en los mapas geológicos convencionales.
- Sería conveniente explorar la posibilidad de obtener Modelos Digitales de Elevaciones de alta resolución ya que todo parece indicar que cuanto mayor es la resolución de éstos, la capacidad de predicción de los modelos de susceptibilidad aumenta. El uso de diferentes técnicas (fotogrametría, LIDAR, GPS, estaciones totales, etc.) permite capturar gran número de puntos que sirven para generar MDEs de alta resolución y calidad.
- Igualmente se debe analizar el efecto de una mejor representación de los rasgos de inestabilidad como evidencias para el análisis (variable dependiente). Hasta el momento, los rasgos de inestabilidad se han considerado como puntos indicativos del centro de la zona de rotura, o bien como polígonos que representan toda el área de rotura. Para el futuro se pretende utilizar la aureola cercana al escarpe de rotura, puesto que esta área es la que presenta las condiciones más próximas a las que había en la ladera previamente a la rotura.
- Otra de las líneas a trabajar es la aplicación del análisis a otros tipos cinemáticos de movimientos en masa y en el desarrollo de otros métodos que incorporen la magnitud y el alcance de la masa, sobre todo en el caso de grandes deslizamientos, lo cual influye directamente en la vulnerabilidad de los elementos y por tanto del riesgo. Los modelos sobre la distancia de la masa deslizada, tanto determinísticos (simulación dinámica) como probabilísticos, facilitarían en gran medida la estimación de los posibles daños ocasionados por los procesos correspondientes.
- La mejora de las técnicas matemáticas para modelizar la susceptibilidad de deslizamientos resulta prometedora. Recientemente se han desarrollado algunas mejoras de tipo técnico para optimizar la modelización. No obstante, todavía hay que explorar tales potencialidades con más detalle, así como utilizar otras técnicas como son las redes neuronales artificiales. Se han experimentado algunos modelos con este tipo de técnicas, obteniéndose resultados prometedores que deberán ser analizados con más detalle.
- Es preciso seguir realizando inventarios sistemáticos de eventos con el fin de mejorar los análisis de susceptibilidad y contrastar los resultados obtenidos anteriormente. Esos datos permitirán a su vez mejorar los modelos de peligrosidad gracias a que se dispondrá de mayor información referente a la frecuencia de deslizamientos, lo cual permitirá definir con mayor precisión las futuras tendencias que podría experimentar el proceso y, por tanto, proponer escenarios de frecuencia futura más realistas.
- En la definición de esos escenarios habrá que considerar la relación de los deslizamientos con los factores socioeconómicos y/o climáticos. En consecuencia, se debe ahondar aún más en el estudio de la relación entre actividades humanas y la frecuencia del proceso. Algunos estudios han mostrado que existe una cierta relación entre el incremento del Producto Interior Bruto (PIB) y el aumento de los procesos naturales, por lo que

conviene analizar en profundidad este tipo de relaciones. Por otro lado, se debe considerar la frecuencia de factores desencadenantes para diseñar escenarios complementarios a los basados en la frecuencia de eventos pasados.

- La actualización continua de las variables no estáticas como son los usos del suelo o los elementos (nuevas infraestructuras y edificaciones, planes de urbanismo, etc.), ayudaría a generar modelos de susceptibilidad y de riesgo más acordes con las nuevas situaciones que se pueden plantear, así como utilizar éstos como herramienta de ordenación y planificación del territorio.
- Sería conveniente llevar a cabo análisis sistemáticos de costos/beneficios, comparando las pérdidas esperables en una zona según distintos escenarios, con los costos de puesta en práctica de diferentes medidas o estrategias de mitigación, con el fin de determinar hasta qué punto éstas estarían justificadas.
- Es deseable mejorar el proceso de evaluación de los modelos de riesgo mediante métodos o estrategias equiparables a las utilizadas en la evaluación de los modelos de susceptibilidad. Se deberían dedicar esfuerzos en la recopilación de datos sobre daños ocasionados por los deslizamientos para contrastar la calidad de las predicciones de riesgo obtenidas.
- La difusión de los métodos y procedimientos utilizados permitiría desarrollar protocolos de actuación en caso de desastre e interactuar con los responsables de la toma de decisiones de cara a mejorar la comprensión de los modelos de peligrosidad y riesgo y diseñar medidas de mitigación que ayuden a reducir tales pérdidas.
- La última de las vías futuras a explorar es el intentar aplicar estos métodos a otros procesos. Aunque aquí se han presentado resultados preliminares en relación con los modelos de susceptibilidad de dolinas, sería interesante profundizar aún más en la potencialidad del método ante este y otros procesos ligados a una serie de variables espaciales como son la determinación de zonas susceptibles de sufrir procesos de erosión, o procesos relacionado con la presencia de permafrost o la elaboración de modelos de vegetación potencial. De acuerdo con las tendencias que marcan los programas europeos, conviene considerar las metodologías y el análisis de los procesos descritos dentro de un marco más amplio, el análisis multi-riesgo que incluya los daños potenciales debidos a todos los procesos que amenazan una zona. Integrar en un solo modelo los relativos a varios procesos es complejo, desde el punto de vista conceptual, pero no por ello debe dejar de ser abordado para una mejor aplicación de estas herramientas de prevención.