



# Evaluación de la Peligrosidad de Deslizamientos de laderas empleando Técnicas de Regresión Logística

## *Hazard Assessment of earthquake-triggered landslides using logistic regression techniques*

García-Rodríguez, M. J.<sup>(1)</sup> Morillo, M.C.,<sup>(1)</sup> Benito, B.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>ETSI. Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM, Madrid, mjosegr@topografia.upm.es

### SUMMARY

*In this paper, a hazard assessment of earthquake-triggered landslides model is applied to a local-scale area using logistic regression techniques. The probability of landslide occurrence is considered as dependent variable, which is modeled by a sigmoid function (taking values between 0 and 1), and the independent variables are the factors related to the susceptibility of the terrain. The methodology is implemented in a Geographical Information System (GIS), where the different susceptibility factors (elevation, slope, aspect, mean annual precipitation, lithology, land uses and roughness terrain) are stored, together with an inventory of landslides in order to calibrate the model in a subsequent phase. An application is developed in a 10x6 km area at Santa Tecla (El Salvador), modelling the scenario of 13th January 2001 with the necessary information to define the susceptibility as well as the triggering function: digital cartography 1:25.000, geological maps, rainfall database and strong-motion records of the 2001 earthquake. Results show the variables that more influence susceptibility and a hazard map which is contrasted with the landslides inventory. Finally, a high concordance between the landslides inventory and high-hazard areas is observed.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se dirige a evaluar la peligrosidad de deslizamientos inducidos por terremotos mediante un modelo de regresión logística, considerando como variable dependiente la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento (modelizada por una función sigmoide que toma valores entre 0 y 1) y como variables independientes los factores que pueden intervenir en la susceptibilidad del talud al deslizamiento (pendiente, orientación, rugosidad, litología,...). Mediante esta metodología se trata de deducir un modelo de peligrosidad que es calibrado haciendo uso de un inventario de deslizamientos para la zona de aplicación. La metodología se implementa en un Sistema de Información Geográfica (SIG), donde se tienen almacenadas distintas capas de información necesarias para calcular secuencialmente la susceptibilidad, la acción detonante y la peligrosidad, así como del inventario de deslizamientos para la verificación de dicho modelo.

La aplicación se ha desarrollado en una zona de 10x6 km localizada en las inmediaciones de Santa Tecla (El Salvador), donde se ha considerado el escenario correspondiente al sismo del 13 de enero de 2001 para calibrar los modelos de peligrosidad, junto con la información necesaria para definir tanto la susceptibilidad como la función sísmica detonante. Dicha información se compone de: cartografía digital a escala 1:25.000, mapas geológicos 1:100.000 (Misión Geológica Alemana), base de datos de precipitaciones y registros de movimiento fuerte para los sismos de 2001. Como resultado se han obtenido las variables con más influencia en la peligrosidad y sus pesos relativos en un cierto modelo funcional, así como un mapa de peligrosidad de los deslizamientos que se ha contrastado con el inventario existente, observando una alta concordancia entre los lugares donde se han producido deslizamientos y las zonas identificadas con mayor peligro en el mapa.

### 2. ANTECEDENTES

Los terremotos ocurridos en El Salvador, a comienzos del 2001, constituyeron una secuencia sísmica compuesta por multitud de eventos de distintas características. El sismo ocurrido el 13 de Enero fue de subducción, con mecanismo de falla normal, magnitud Mw 7.7 y profundidad de 40 km. El evento del 13 de febrero tuvo lugar en una de las fallas locales que coinciden con el eje volcánico, de Mw 6.6 y profundidad de 15 km (Bommer et al., 2002). De ambos sismos y sus respectivas secuencias de réplicas existe un importante número de registros acelerométricos, que han permitido estudiar con detalle la distribución espacio-temporal de

los movimientos fuertes (Benito et al, 2004) y deducir los correspondientes modelos independientes de atenuación para subducción y cadena volcánica (Cepeda et al., 2004). Por otra parte, los citados sismos activaron más de 600 movimientos de ladera, en diferentes condiciones geotécnicas y topográficas.

Previo al presente estudio, se aplicaron las técnicas de regresión logística haciendo uso de un SIG para la estimación del peligro de deslizamientos inducidos por sismos a escala regional (García-Rodríguez et al., 2007). Para ello se emplearon las capas que representan las variables independientes del modelo, que fueron: pendiente, elevación, orientación, precipitación media anual, litología, usos de suelo y rugosidad del terreno. Como resultado se obtuvo un modelo regional para todo el Salvador cuyas variables más significativas en la peligrosidad resultaron ser la rugosidad y la litología. También se desarrolló un mapa de peligrosidad de los deslizamientos que fue contrastado con el inventario existente. Este análisis previo demostró una alta concordancia (89.4 %) entre las observaciones consideradas y las zonas identificadas con mayor peligro en el mapa de El Salvador.

En este trabajo se pone en práctica un procedimiento similar, pero a una escala de mayor detalle y contando con datos de un inventario más refinado para una zona más reducida. Toda la información ha sido facilitada por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador (SNET), organismo con el que se ha establecido una estrecha colaboración en el marco de los proyectos ANDES y ANDROS (Plan Nacional I+D+i del MEC 2000-2003 y 2004-2007).

### 3. METODOLOGÍA

La peligrosidad asociada a los movimientos de ladera se puede definir, de forma simple, por medio de una función H, que es combinación de la *susceptibilidad del talud a deslizarse* (S) y de la carga sísmica que actúa como *detonante* (T), (Rodríguez, 2001):

$$H = T \cdot S$$

La metodología que se propone ahora trata de modelizar estocásticamente la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos por medio de técnicas de regresión logística, en un área en la que se conozcan los factores representativos de la topografía, la geología, la pluviometría y el movimiento fuerte asociado a un cierto escenario sísmico, para el posterior cálculo del detonante (T) y la peligrosidad (H) a los deslizamientos. Esto supone una estimación del modelo funcional y la asignación de pesos a los factores que intervienen con mayor significación estadística que los basados subjetivamente en juicio de experto o en el método de



ensayo y error. La regresión logística es un método estadístico, adecuado para análisis de presencia-ausencia de la variable dependiente (en este caso probabilidad de deslizamiento), así como para la evaluación del nivel de significación de los factores que intervienen en el modelo. Este método ha sido ya empleado para la predicción de inestabilidades de laderas, así como para cartografiar la susceptibilidad del terreno (Dai y Lee 2002, 2003; Ayalew et al., 2005).

El modelo de regresión logística múltiple considera una variable dependiente binomial, lo que implica tan solo dos posibilidades: un evento ocurre (valor 1) o no ocurre (valor 0). Además, se consideran otras variables independientes, que representan los factores que determinan la ocurrencia del evento. Los valores predichos pueden ser interpretados como probabilidades en un intervalo de 0 a 1. La relación cuantitativa entre la ocurrencia y su dependencia de varias variables puede ser expresada como una función tipo sigmoide:

$$p(y) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

donde:  $p(y)$  es la susceptibilidad estimada de ocurrencia del deslizamiento, que varía entre 0 y 1, mientras que el valor de la función  $Z$  varía entre  $\infty$  y  $-\infty$ , planteado como la siguiente combinación lineal:

$$Z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

donde:  $b_0$  y  $b_i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) son los coeficientes estimados a partir de la muestra de datos.

$x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) son las variable independientes (por ejemplo, los parámetros físicos relacionados con el deslizamiento).

Asumiendo una serie de transformaciones, el logaritmo neperiano de la razón entre la probabilidad de que el evento ocurra y la probabilidad de que no ocurra, denominado logit, está relacionado linealmente con las variables independientes de la siguiente forma:

$$\ln\left(\frac{p(Y=1)}{1-p(Y=1)}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

#### 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

Se ha comenzado generando un SIG con toda la información previamente indicada, sobre el que se actuará con la metodología propuesta para obtener, en primer lugar, mapas de susceptibilidad y del movimiento sísmico estimado para el escenario del sismo del 13 de enero de 2001 en el área de Santa Tecla y posteriormente, un mapa de peligrosidad de deslizamientos para ese escenario. El SIG se ha ido completando con otros mapas y capas de información obtenidas durante el desarrollo del estudio. La información litológica se ha generalizado reagrupando los materiales en cinco clases, a fin de considerar el efecto local en el movimiento sísmico que actúa como detonante (T) así como para considerar la geología en la evaluación de la susceptibilidad (S). Además, a partir de los datos topográficos, se ha construido un modelo digital del terreno (MDT), a partir del cual se ha generado un mapa de pendientes (Figura 1), un mapa de orientaciones y un mapa de rugosidad del terreno. Para el posterior cálculo de la susceptibilidad (S), las variables cuantitativas introducidas son la elevación, la pendiente, el promedio de lluvias y la rugosidad del terreno, mientras que las variables cualitativas consideradas son la orientación, la litología y los usos del suelo.

El método de regresión logística propuesto se ha implementado en el SIG y se ha calculado en primer lugar la función de susceptibilidad mediante operaciones de álgebra de capas. Los resultados se han representado en un mapa de susceptibilidad, diferenciando cinco niveles: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. A continuación, se ha procedido al cálculo de la función detonante (T), estimada para el movimiento asociado al sismo del 13 de enero de 2001, en representación de la acción sísmica que produjo los deslizamientos observados. Para ello, se ha empleado el modelo de movimiento fuerte de Cepeda et al. (2004) y se han obtenido valores de la aceleración pico PGA en roca, a partir de los cuales se ha trazado el correspondiente mapa de isóneas.

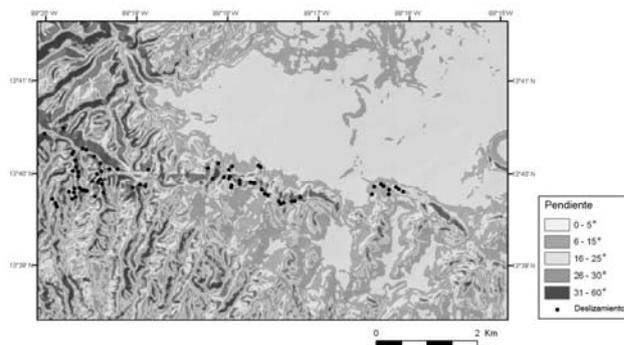


Figura 1 – Mapa de pendientes junto con los deslizamientos observados en el área de Santa Tecla (El Salvador)

Para cuantificar el efecto de la geología, se ha partido del mapa litológico generalizado y se ha asignado un factor de amplificación a cada clase. Tras la combinación de los mapas de aceleración en roca, con el mapa litológico generalizado y el mapa de pendientes, y aplicando los factores de amplificación definidos, se ha obtenido un nuevo mapa de valores de PGA que refleja el movimiento del suelo previsiblemente generado por el sismo del 13 de enero, incluyendo ya el efecto local. Este mapa es representativo de la función detonante (T) y es finalmente combinado con el resultante para la Susceptibilidad (S) para obtener el mapa final de Peligrosidad (H). Sobre éste se han definido cinco niveles, correspondientes a peligrosidad muy baja, baja, media, alta y muy alta. Este mapa de peligrosidad de los deslizamientos a gran escala se ha contrastado con el nuevo inventario de deslizamientos, demostrando una alta concordancia y una mejora en la identificación de las zonas estimadas con mayor peligro respecto a otros estudios previos. El modelo calibrado puede aplicarse a otros escenarios sísmicos, o bien emplear estimaciones probabilistas del movimiento para estimar la peligrosidad de deslizamientos asociada a aeventuales sismos futuros

#### 5. REFERENCIAS

- Ayalew, L. y Yamagishi, H. (2005). "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan", *Geomorphology* **65**, 15-31.
- Benito, B., Cepeda, J.M y Martínez Díaz, J.J. (2004). "Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes in El Salvador", in Rose, E.L., et al., eds., *Natural Hazards in El Salvador: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special paper 375*, 339-356.
- Bommer J.J., Benito, B., Ciudad-Real, M., Lemoine, A., López-Menjivar, M., Madariaga, R., Mankelov, J., Méndez-Hasbun, P., Murphy, W., Nieto-Lovo, M., Rodríguez, C. y Rosa, H. (2002). "The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **22**, 389-418.
- Cepeda, J.M., Benito B. y Burgos, E.A. (2004). "Strong-motion characteristics of January and February 2001 earthquakes in El Salvador", in Rose, E.L., et al., eds., *Natural Hazards in El Salvador: Boulder, Colorado, GSA Special Paper 375*.
- Dai F. and Lee C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* **42**, 213 – 228.
- Dai F. and Lee C.F. (2003). "A spatio temporal probabilistic modelling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression", *Earth Surface Processes and Landforms* **28**, 527-545.
- García-Rodríguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B. (2007) "Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression". *Geomorphology*.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.001>
- Misión Geológica Alemana en El Salvador en colaboración con el Centro de Estudios e Investigaciones Geotécnicas de El Salvador, (1967-1971). "Mapa Geológico de la Republica de El Salvador (6 hojas)", en papel, Escala 1:100,000.
- Rodríguez, C. E. (2001): "Hazard assessment of earthquake-induced landslides on natural slopes". *Tesis Doctoral, University of London*.