



SUSCEPTIBILITY ASSESSEMENT OF TRIGGERED LANDSLIDE IN EL SALVADOR. APPLICATION TO THE 2001 EARTHQUAKES

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN EL SALVADOR. APLICACION AL CASO DE LOS TERREMOTOS DE 2001

Belén Benito⁽¹⁾ María José García⁽¹⁾ Jorge Rodríguez⁽¹⁾ Carlos Rodríguez⁽²⁾

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Madrid. E. U. de Ingeniería Técnica Topográfica. Autovía de Valencia, km 7, 28031, Madrid. España. ma_ben@euitto.upm.es, mjosegr@euitto.upm.es, jorge@euitto.upm.es

⁽²⁾Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria-Bogotá. Cra 30, Calle 45. Colombia. rcarlos@ing.unal.edu.co

SUMMARY

The study is aimed at developing a rational methodology of analysis which can be applied to susceptibility assessment of earthquake-triggered catastrophic landslides. The method is validated using available data from the El Salvador earthquakes of January and February of 2001. The database includes field observations of more than 600 landslides together with digital cartography, geological maps and strong motion records from both earthquakes. These data have been introduced in a Geographical Information System which makes easier the application of the method and allows the combination of different layers through the necessary algorithm. The predicted susceptibility model is compared to real observations corresponding to the 2001 earthquakes. The parameters are subsequently recalibrated in order to obtain a new model which fits better the observations. Finally, the model will be applied to the development of a landslide hazard map in El Salvador.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de laderas inducidos por terremotos son fenómenos inherentes al potencial destructor de los mismos, que han causado enormes daños personales, económicos y estructurales en terremotos recientes. La evaluación del correspondiente riesgo en zonas sísmicamente activas resulta por ello de especial interés, dirigida como fin último a la prevención de este tipo de desastres. En este contexto se enmarca el proyecto ANDES, que tiene por objetivo la evaluación del riesgo y prevención de deslizamientos de laderas inducidos por terremotos, con aplicaciones particulares a El Salvador y al sureste de España.

Un primer objetivo del estudio es el desarrollo de una metodología racional de análisis que integre los diversos aspectos involucrados en este riesgo, como son la topografía del terreno, las características geológicas y geotécnicas del suelo, la humedad relativa del mismo y el detonante por terremoto. Dicha metodología será aplicada y contrastada con toda la información existente de los terremotos ocurridos en El Salvador a comienzos del 2001. El primero de estos sismos tuvo lugar el 13 de enero, con el epicentro situado en la costa Oeste de El Salvador, en la zona de subducción entre las placas de Cocos y Caribe. El terremoto tuvo magnitud Mw 7.7 y produjo más de 600 deslizamientos de laderas, siendo el mayor de ellos el conocido deslizamiento de Las Colinas de Santa Tecla, donde perdieron la vida más de 600 personas. El segundo sismo destructor ocurrió un mes más tarde, el 13 de Febrero, con M 6.6, y cuyo epicentro se situó al oeste de San Miguel, en el interior del país. Este sismo fue asociado a una de las fallas locales que atraviesan el país de Este a Oeste. La información disponible de los deslizamientos producidos por ambos sismos, unida a los numerosos registros de movimiento fuerte del suelo existentes y a los mapas topográficos y geológicos, proporcionan una completa base documental para la aplicación de la citada metodología y para su contraste con las observaciones existentes. Los modelos calibrados permitirán la posterior evaluación del riesgo de deslizamientos asociados a futuros terremotos en El Salvador.

2. ANTECEDENTES

Los terremotos ocurridos en El Salvador, a comienzos del 2001, constituyen una secuencia sísmica compuesta por multitud de eventos de distintas características, en cuanto a origen y mecanismo focal, magnitud, profundidad y propiedades de los movimientos fuertes generados. El sismo ocurrido el 13 de Enero fue de

subducción, con mecanismo de falla normal, magnitud M 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 magnitud 6.6 y profundidad de unos 14 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 los correspondientes movimientos fuertes y deducir modelos independientes de atenuación para subducción y cadena volcánica.

Por otra parte, los citados sismos activaron más de 800 deslizamientos, en diferentes condiciones geotécnicas y topográficas, cuyo estudio puede proporcionar una valiosa información sobre mecanismos de generación y propagación de los mismos. Para el estudio se cuenta con datos de un inventario de deslizamientos elaborado en el país inmediatamente después de los sismos, así como de cartografía digital 1:25.000, mapa geológico a escala 1:100.000, datos pluviométricos, y los propios registros acelerométricos. Parte de esta información fué recabada "in situ" en el transcurso de una visita que algunos miembros del grupo investigador hicieron al país poco después del sismo del 13 de enero. La información restante ha sido facilitada por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador (SNET) y la Universidad Centroamericana Simeón Cañas (UCA), organismos con los que se ha establecido una estrecha colaboración en el marco del proyecto ANDES.

3. METODOLOGÍA

En este proyecto se trata de deducir un modelo de susceptibilidad de deslizamientos que incluya esencialmente factores representativos de la topografía, la geología, la pluviometría y el movimiento fuerte activado por un terremoto. Para la elaboración de dicho modelo se parte de la metodología desarrollada por Rodríguez (2001), que se aplicará con información local de El Salvador y cuyos resultados se contrastarán con el inventario de deslizamientos de 2001.

La metodología citada cuantifica la susceptibilidad de los deslizamientos por medio de una función H_s , que es combinación de la *susceptibilidad del talud a deslizarse* (S) y de la carga sísmica que actúa como *detonante* (T):

$$H_s = T \cdot S \quad (1)$$

Una vez construidas las funciones S y T, el nivel de susceptibilidad se define en base a gráficas como la presentada en la Figura 1.

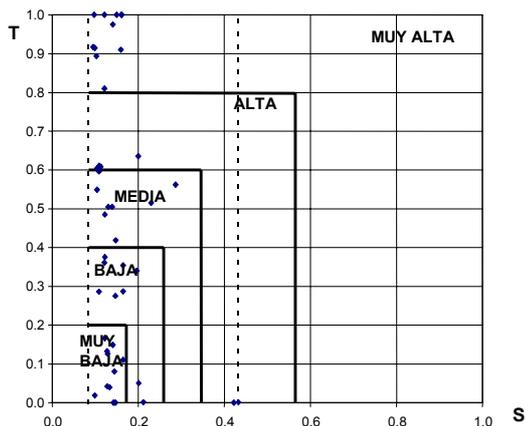


Figura 1. Modelo para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos.

A su vez, la función de susceptibilidad, S, depende de la topografía, y las condiciones de humedad del suelo, esencialmente.

$$S = \frac{1}{2}(G + C) \quad (2)$$

La topografía se tiene en cuenta a través del ángulo de inclinación del terreno, por medio de un factor G que representa la geometría del talud. El factor C representa el factor climático, que incluye las lluvias totales durante un periodo de acumulación de un año (LTR) y de un mes (STR), y sus respectivos excesos con respecto a la media multianual de cada uno de ellos (LTE y STE).

$$C = \frac{1}{4}(LTR + STR + LTE + STE) \quad (3)$$

En este estudio el termino C que es el factor promedio de los valores de precipitación anual, mensual y excesos de lluvia, indica el grado de humedad del suelo durante el año de estudio. Aunque el estudio trata de evaluar la susceptibilidad a los movimientos inducidos por terremotos, la humedad existente produce falta de cohesión del material, aumentando la probabilidad de deslizamiento para un mismo nivel de aceleración de disparo. Por ello, este factor climático es considerado en el término de susceptibilidad aunque el factor de disparo siga siendo el sismo.

Por otro lado, la función detonante T se define como:

$$T = \frac{(SP - SP_{\min})}{(SP_{\max} - SP_{\min})} \quad (4)$$

En esta ecuación SP representa el parámetro sísmico característico del movimiento, en nuestro caso la aceleración pico, PGA, en el emplazamiento de estudio. SP_{\min} y SP_{\max} representan los valores mínimo y máximo del parámetro, PGA_{\min} y PGA_{\max} , que definen el rango de aceleraciones dentro de la zona potencialmente afectada por deslizamientos. Esta función detonante (T) tiene en cuenta la amplificación por geología, la amplificación por topografía y las características geotécnicas del suelo.

Para la aplicación práctica de esta metodología al caso de los sismos de 2001 en El Salvador, se han desarrollado las siguientes fases:

1. Elaboración de un modelo digital del terreno y de un mapa de pendientes de El Salvador, con base en la cartografía digital a escala 1:25,000.
2. Digitalización del mapa geológico a escala 1:100,000 e identificación de las unidades litológicas superficiales para la aplicación del modelo (Figura 2).
3. Análisis de los registros de movimiento fuerte del suelo y deducción de modelos de atenuación (Cepeda et al., 2004).
4. Elaboración y aplicación de algoritmos para la generación de un mapa de aceleraciones pico a nivel de superficie, incluyendo los efectos locales por topografía y geología (figura 3).
5. Elaboración de mapas de lluvias, esencialmente de promedios anuales y mensuales y de excesos para el 2001

6. Creación de un sistema de información geográfica (SIG) con las capas de información correspondientes a los datos anteriores y preparación de los algoritmos necesarios para implementar la metodología descrita.

Se genera así un modelo de susceptibilidad que permite diferenciar zonas de diferente nivel de riesgo, tal como se esquematiza en la Figura 1. El modelo se contrasta después con el inventario de deslizamientos existente, que refleja las observaciones reales asociadas a los sismos de 2001. Se trata entonces de ajustar las predicciones a las observaciones, para lo cual se estudian posibles cambios en la formulación del modelo, como p.e. variación de los pesos de los distintos factores, generalizaciones geológicas alternativas, etc.; hasta encontrar el modelo que explique de forma optima las observaciones.

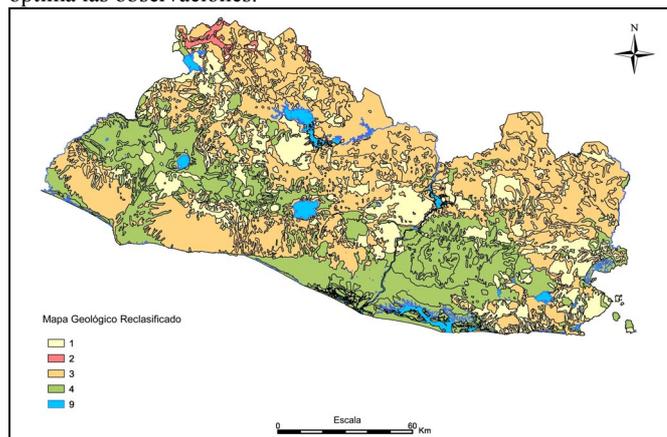


Figura 2. Mapa geológico adoptando una generalización de 4 clases

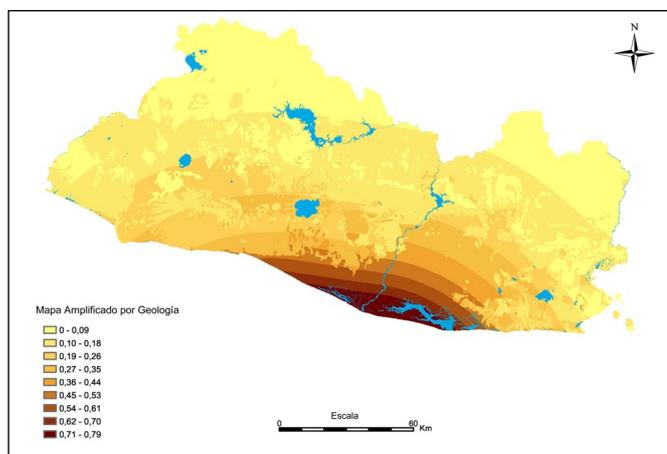


Figura 3. Mapa de aceleraciones pico PGA (g) estimadas para el terremoto del 13 de enero, con amplificación por geología local

4. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología de análisis que permite evaluar, de forma relativamente sencilla, el riesgo de deslizamientos de laderas inducidos por terremotos. Dicha metodología establece la susceptibilidad como una función combinada de la susceptibilidad del talud al deslizamiento, dada por las condiciones locales, y del detonante impuesto por la carga sísmica. A su vez la susceptibilidad se define como producto de un factor geométrico (topografía) y otro climático (índice de lluvias) y el detonante se cuantifica a través de la aceleración pico del movimiento, lo que conlleva consideración implícita de la amplificación por geología. La metodología se ha aplicado a la evaluación del riesgo de deslizamientos en El Salvador, para lo que se ha construido un modelo que se ha contrastado con datos de los terremotos del 13 de enero y 13 de febrero de 2001. Tras el ajuste de parámetros del modelo, se ha encontrado buen acuerdo entre las zonas predichas con alto riesgo y los deslizamientos reales observados. Se comprueba así la utilidad de la metodología propuesta, implementada por medio de un SIG con las diferentes



capas de información requeridas, para la evaluación y prevención de este tipo de riesgos en zonas sísmicamente activas.

5. REFERENCIAS

- Bommer, 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". In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **22**, 389-418.
- J. M. Cepeda, B. Benito y E. A. Burgos (2003): "Strong-motion characteristics of January and February 2001 earthquakes in El Salvador". *GSA Special Paper 375: Natural Hazards in El Salvador*
- C. E. Rodríguez (2001): "Hazard assesment of earthquake-induced landslides on natural slopes". Tesis Doctoral, University of London