

CLASIFICACIÓN PROBABILISTA DE UMBRALES DE LLUVIA PARA PREDECIR DESLIZAMIENTOS DE TIERRA¹

Zenón Medina-Cetina² y José Cepeda³

Resumen: Este artículo presenta la formulación probabilista de un modelo empírico para la determinación de deslizamientos de tierra producidos por el efecto de lluvia. El modelo de umbral propuesto $I(\Theta)$ contiene un vector de parámetros Θ , el cual integra el efecto de la intensidad de la lluvia I y su duración D . La clasificación probabilista de este modelo está basada en la solución del problema inverso definido por el marco teórico Bayesiano. Esta aproximación permite la identificación, caracterización y propagación de la incertidumbre contenida en los datos utilizados para la clasificación del modelo. El uso del paradigma Bayesiano resulta en la integración de una función de probabilidad conjunta definida por los parámetros del modelo de clasificación, el cual incluye su correlación estructural. A partir de esta función, es posible generar combinaciones de los parámetros del modelo que reflejen realizaciones de los umbrales más probables, de las cuales se puedan obtener estadísticas de variación para diferentes condiciones de intensidad y duración de lluvia, y proveer así una medida de confianza sobre las predicciones del modelo. Se presenta un caso de estudio basado en la colección de datos I - D que incluyen observaciones con y sin deslizamientos de tierra en la vecindad del volcán de El Salvador. La aplicación fundamental de este estudio es la definición probabilista de los niveles de alerta temprana condicionados en las observaciones históricas de los sistemas de monitoreo de la región.

Palabras clave: clasificación probabilista, deslizamientos de tierra, sistemas de alerta temprana, umbral de lluvia.

PROBABILISTIC CLASSIFICATION OF LOCAL RAINFALL-THRESHOLDS FOR LANDSLIDE TRIGGERING

Abstract: This work introduces the use of a probabilistic classification for an empirical threshold model for rainfall-triggered landslides. The threshold model $I(\Theta)$ is defined by a set of parameters Θ , which relies on measurements of rainfall intensity I and duration D . The probabilistic classification based on this model is the solution of an inverse problem under a Bayesian theoretical framework. This approach allows for identifying, characterizing and propagating the uncertainty encapsulated on the evidence used for the calibration of the classification model. The use of the Bayesian paradigm results in the integration of the joint probability distribution of the model parameters. From the parameters' joint probability distribution, it is then possible to assess the correlation between the model parameters and to populate likely realizations of the threshold curves that can provide a confidence measure over the model predictions. A case study is discussed where observations are provided for a dataset of I - D records considering both landslide-triggering and non-triggering rainfall events. A fundamental application of this exercise is the potential probabilistic definition of alert levels in the context of early-warning systems.

Keywords: early warning systems, landslide triggering, probabilistic classification, rainfall thresholds.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra causados por lluvia pueden ser generados por la activación de dos mecanismos: la reducción en la resistencia al cortante del suelo debido al incremento de la presión de poro y/o debido a la erosión causada

¹ Artículo recibido el 12 de septiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asistente, Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, CE/TTI 702D, College Station TX, 77845-3136. E-mail: zenon@tamu.edu

³ Investigador, International Centre for Geohazards, Norwegian Geotechnical Institute, Sognsveien 72, 0855 Oslo, Norway, +(47) 2202 3122. E-mail: Jose.Cepeda@ngi.no

en la superficie por el flujo de lodos (Nadim et al., 2009). Mediciones de campo indican que en su fase inicial, el deslizamiento de tierra se desarrolla típicamente sobre una capa impermeable que puede ser la roca de sustentación o una capa de arcilla impermeable. La resistencia al cortante es controlada entonces por la variación de la presión de poro, la cual a su vez es controlada por el proceso de infiltración a través del talud. Por otro lado, durante una lluvia intensa el flujo de agua puede inducir esfuerzos de corte en la superficie del talud producto de la velocidad de arrastre del flujo de lodos. En este caso, dependiendo de la distribución granulométrica y la densidad específica del material se puede iniciar un proceso de erosión cuando se excede un valor crítico de flujo de agua (Cepeda et al., 2010a).

Las aproximaciones existentes para evaluar valores de umbral por precipitación de lluvia se dividen en métodos empíricos y en métodos numéricos geomecánicos. Este trabajo presenta el caso de la clasificación probabilista de un modelo empírico. Cabe mencionar que la estimación de parámetros de modelos empíricos propuestos para la clasificación de umbrales de predicción de deslizamientos de tierra debido a lluvias se ha realizado tradicionalmente de manera determinista (Caine, 1980; Cepeda et al., 2010b). Esto implica que no se ha considerado la relevancia de la cantidad de datos acumulados recopilados, la correlación estructural entre los parámetros del modelo, ni las estadísticas de confianza, en la determinación de estos modelos. Esto resulta crítico ya que existe la posibilidad de predecir erróneamente un deslizamiento. Las consecuencias de emitir alertas falsas o bien, de no emitir las cuando en realidad existe un evento pueden tener consecuencias lamentables en términos de pérdidas de vidas humanas, pérdidas económicas y ambientales.

Para resolver este problema, se propone el uso de la solución probabilista del problema inverso para geomateriales basada en una aproximación Bayesiana (Medina-Cetina, 2006). Esta consiste en la calibración probabilista del modelo de clasificación utilizado para la predicción de umbrales de deslizamientos causados por precipitación de lluvia (Cepeda et al, 2010b). Esta aproximación permite: a) la identificación, caracterización, y propagación de la incertidumbre contenida en los datos utilizados para la clasificación del modelo; b) definir el estado de conocimiento de los parámetros del modelo; y c) permitir la transferencia de la experiencia del experto a cargo de la modelación. El uso del paradigma Bayesiano resulta en la integración de una función de probabilidad conjunta definida por los parámetros del modelo, el cual incluye la correlación estructural entre los parámetros del modelo. A partir de esta función, es posible generar combinaciones de los parámetros del modelo que reflejen realizaciones de los umbrales más probables, de las cuales se puedan obtener estadísticas de variación para diferentes condiciones de intensidad y duración de lluvia. Con este nuevo conjunto de inferencias, es posible entonces definir una estadística que refleje la confianza en las predicciones del modelo.

MODELO DE CLASIFICACIÓN

El modelo propuesto en este trabajo esta basado en la función de Caine (1980), la cual intenta definir un umbral inferior de observaciones globales de tormentas de lluvia que generaron deslizamientos de tierra y flujos de lodo:

$$I = \alpha D^{\beta} \quad (1)$$

donde,

I representa el umbral medio de intensidad de precipitación (mm/h),

D representa la duración de la precipitación (h),

β representa la pendiente del umbral en espacio log-log en el cual se representa I-D,

α representa el factor de ajuste a los datos en el espacio log-log en el cual se representa I-D.

Utilizando la definición convencional de umbral, un evento de lluvia con duración D será más probable a iniciar un deslizamiento de tierra o de flujo de lodos si $I \geq \alpha D^{\beta}$. El exponente β varia típicamente entre -2.00 y -0.19 (Guzzetti et al., 2007). Esta función empírica ha sido ampliamente utilizada para estimar umbrales de diferentes tipos de escalas geográficas (i.e. globales, regionales y locales). Su principal mérito estriba en poder predecir deslizamientos por precipitación de lluvia cuando no se cuenta con propiedades mecánicas del suelo. Por tanto, su uso se circunscribe a estimaciones indirectas de deslizamientos de lluvia, lo cual refuerza la necesidad de contar con un análisis probabilista que permita proveer estadísticas de confianza en su aplicación.

Cepeda et al. (2010b) presentaron un modelo conceptual que correlaciona curvas de umbrales regionales y locales basado en la ecuación (1) con niveles de susceptibilidad de deslizamientos de tierra y flujos de lodos. Este modelo (Figura 1) propone una curva umbral asociada a curvas paralelas en el espacio log-log describiendo diferentes niveles de susceptibilidad, definida por diferentes valores del coeficiente α . De tal forma, que al reducir α se incrementa la susceptibilidad para definir un umbral inferior que prediga eficientemente un evento de deslizamiento de tierra o flujo de lodos. De hecho, esta susceptibilidad está asociada a la precipitación acumulada A_n , de modo que:

$$\alpha = f(\text{susceptibilidad}) = (\alpha_1 A_n^{\alpha_2}) \quad (2)$$

Esta formulación relaciona indirectamente la precipitación acumulada después de n días A_n , con el estado de permeabilidad del medio (i.e., se espera que cuando se incremente el valor de la precipitación acumulada se reduzca el potencial de permeabilidad). Si bien en este trabajo se presenta de manera introductoria la clasificación probabilista de la ecuación (1), se ha presentado su generalización, ecuación (2), como una forma de relacionar la formulación empírica con las características esperadas del terreno. Se espera también que Esta refinación del modelo pueda servir en un futuro próximo para demostrar la reducción en la incertidumbre asociada al uso de métodos empíricos en la predicción de deslizamientos de tierra causados por precipitación de lluvia.

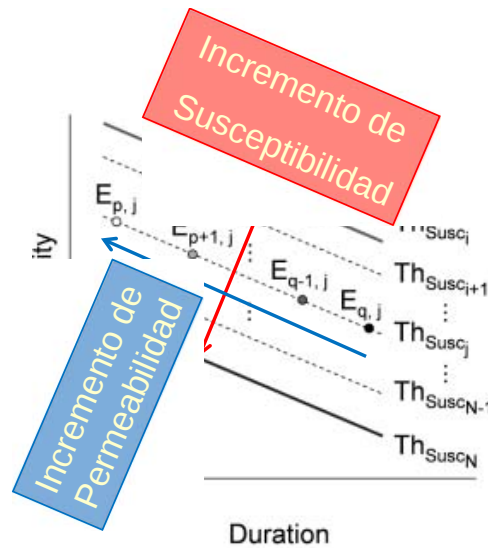


Figura 1: Modelo conceptual de susceptibilidad a deslizamientos.

CLASIFICACIÓN PROBABILISTA

El principio de clasificación probabilista se define como la solución probabilista a un problema inverso, tal y como se ha utilizado en diferentes geo-aplicaciones a modelos de suelo heterogéneos (Medina-Cetina et al., 2007), modelos geomecánicos de deslizamientos de tierra (Rannali et al., 2009), avalanchas de nieve (Gauer et al., 2009), inversión geofísica (Esmailzadeh y Medina-Cetina, 2010), y a modelos granulares de partícula (Zhang and Medina-Cetina, 2010).

Este trabajo introduce el paradigma Bayesiano para resolver el problema inverso cuando se aplica a la caracterización probabilista del modelo de clasificación propuesto. Esta aproximación permite introducir el conocimiento previo acerca de los parámetros del modelo (en este caso $\theta = [\alpha, \beta]$), el cual puede definirse a través de una función de densidad de probabilidad llamada *prior* $\pi(\theta)$. También introduce una medida que permite evaluar la probabilidad de predecir correctamente las observaciones $\mathbf{d}_{obs}$ para el conjunto de parámetros θ seleccionados, definido como la *función de verosimilitud* $f(\mathbf{d}_{obs}, \theta)$. El resultado normalizado de este producto genera la probabilidad *a-posteriori*:

$$\pi(\mathbf{d}_{obs}|\theta) \propto f(\mathbf{d}_{obs}, \theta)\pi(\theta) \quad (3)$$

La integración numérica de la función $\pi(\mathbf{d}_{obs}|\theta)$ se realiza a través de Cadenas de Markov y muestreo basado en Monte-Carlo CMMC (Robert and Casella, 2004). Un beneficio de esta aproximación es que se garantiza la convergencia en la integración de la función de probabilidad a-posteriori conforme se incrementa el número de muestras (i.e., combinaciones de los parámetros $\theta = [\alpha, \beta]$). La muestra resultante refleja la frecuencia relativa de la ocurrencia de estas combinaciones, que se asocia a un mapa de probabilidad bi-variable en el cual se pueden identificar los modos de frecuencia y los patrones de correlación entre las variables. Ambas inferencias son particulares de las soluciones probabilistas al problema inverso, a diferencia de las aproximaciones de optimización, donde únicamente se obtiene la combinación óptima de parámetros.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio propuesto consiste en el análisis de deslizamientos de tierra inducidos por precipitación de lluvia en el Pico el Picacho en la zona metropolitana de la Ciudad de San Salvador. Esta zona consiste en 14 municipios incluyendo la capital de El Salvador, el cual concentra una tercera parte de ese país. Históricamente, esta región ha sido afectada por varios desastres naturales, incluyendo sismos, inundaciones, deslizamientos de tierra y flujos de lodo, así como erupciones volcánicas. El riesgo por desastres naturales en esta zona es significativo debido a su alta probabilidad de ocurrencia de eventos naturales (o sus combinaciones), y a su alta concentración poblacional.

En la zona metropolitana de San Salvador se han registrado deslizamientos de tierra y flujos de lodo de gran velocidad, con recorridos significativos, tal y como ocurrió durante los sismos de 1986 y del 2001 donde murieron cientos de personas. Otros eventos similares que generaron también flujos de lodo se han registrado en 1934 y en 2008, pero su volumen y longitud de avance no registró pérdidas humanas ni económicas. Por tanto, los deslizamientos de tierra producidos por precipitación de lluvia son motivo de especial interés en esta zona.

La Figura 2 muestra una imagen aérea del flujo de lodo registrado en 1982, indicando el paso de la avalancha de flujo de lodos registrado en 1982: A) Corona de la zona de desgajamiento, B) marca de la media altura de la zona de ruptura, y C) zona de deposición. El Pico el Picacho se compone de rocas volcánicas y de flujos de lava fracturada intercalada con suelos piroclásticos. Las pendientes cercanas a la cima se encuentran severamente expuestas a cambios ambientales, alcanzando un espesor de 5-10m. El evento de 1982 registró una movilización de tierra de aproximadamente $425,000 \text{ m}^3$, en un área de $60,7000 \text{ m}^2$ y una distancia recorrida de 4 km.

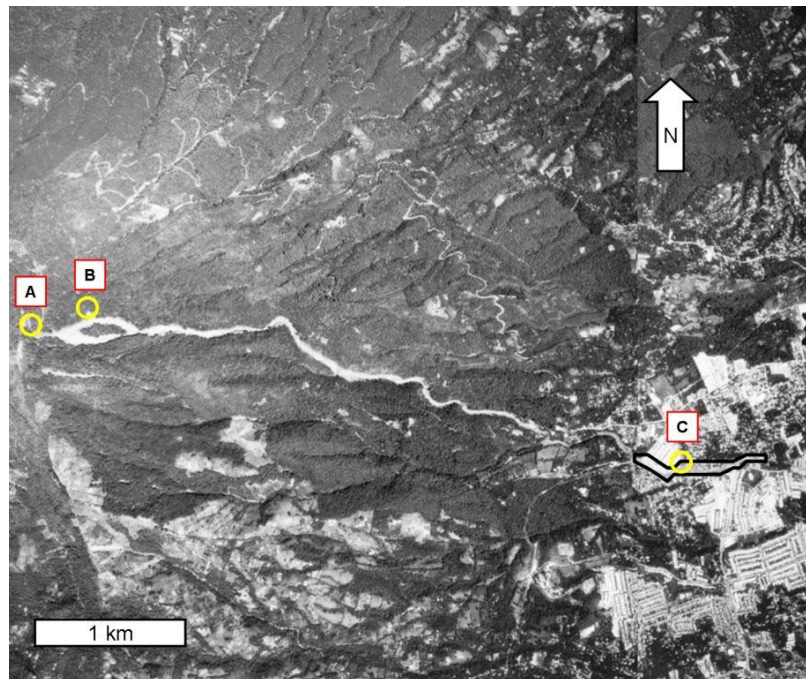


Figura 2: Foto aérea indicando el paso de la avalancha de flujo de lodos registrado en 1982: A) Corona de la zona de desgajamiento, B) marca de la media altura de la zona de ruptura, y C) zona de deposición.

El Pico el Picacho se localiza en la zona poniente de San Salvador (Figura 3). Desde principios de la década del 2000 se instaló un sistema de alerta temprana en esta zona, utilizando estaciones de monitoreo meteorológicas en áreas propensas a deslizamiento de tierra por precipitación de lluvia. Este sistema ha permitido incrementar la recolección de datos asociando las intensidades y acumulación de lluvia en el área de interés, incluyendo eventos de precipitación extremos como los producidos por los huracanes Adrian y Stan en Mayo y Octubre del 2005, respectivamente.

La base de datos propuesta para la calibración del modelo de umbral, ecuación (1), se ha generado de la estación el Boquerón (Figura 3). Esta consiste en datos de precipitación en forma de series de tiempo colectados cada hora para la tormenta que generó el flujo de lodo en septiembre de 1982, e información de precipitación cada diez minutos recabada durante el período 2004-2008. Los datos colectados cada diez minutos fueron re-muestreados a una hora, con objeto de homogenizar los datos recabados para el evento de 1982. El total de tormentas incluidas en la base de datos suman 1358, de

los cuales se indican con números aquellos que representan un evento (Figura 4). Estos eventos se presentan junto con los umbrales propuestos en otros estudios para casos particulares (como marco de referencia): Caine (1980), Innes (1983), Guzzetti et al. (2008), y por Cannon et al. (2008).

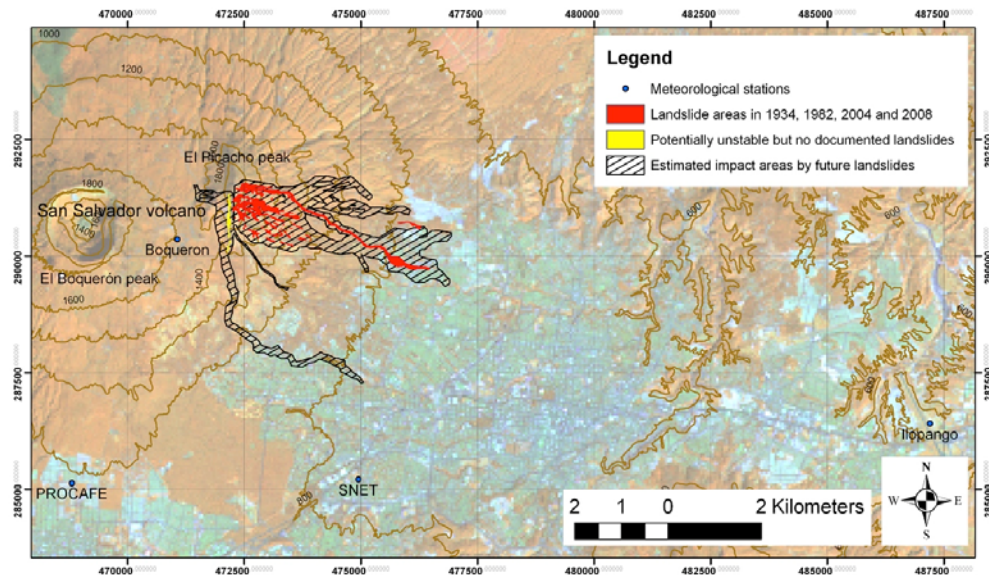


Figura 3: Pico el Picacho y áreas vecinas, incluyendo estaciones meteorológicas (puntos), áreas de deslizamientos de tierra anteriores (polígonos en rojo), y áreas susceptibles de deslizamientos (polígonos en amarillo y rallados).

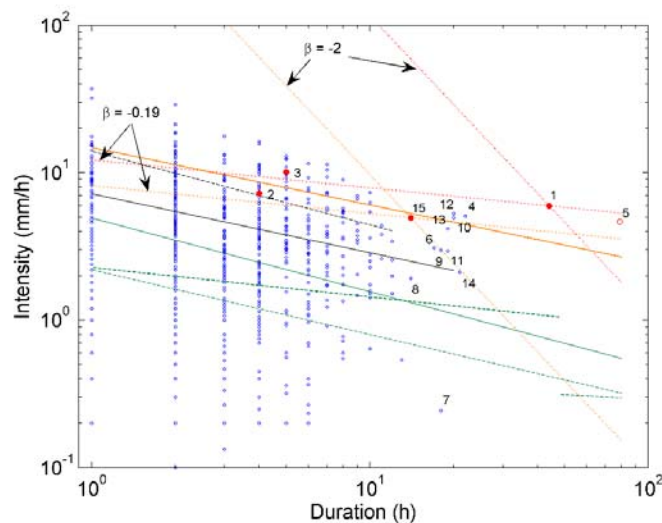


Figura 4: Datos de intensidad y duración para la estación El Boquerón, sobrepuestos con ecuaciones de umbrales propuestas predeterminados.

ANÁLISIS

La caracterización común de tormentas asociadas a deslizamientos de tierra y flujo de lodos consiste en utilizar el promedio de intensidad de lluvia respecto del total de duración de precipitación. En este estudio se incluye el promedio de intensidades de precipitación en combinación con intensidades pico durante cada tormenta. La Figura 5 presenta eventos de precipitación positivos (círculos) y también los negativos (cruces) en el dominio de duración D e intensidad I de la precipitación. Los eventos positivos se definen por las intensidades pico únicamente, los cuales se asocian a eventos conocidos como hiper-flujos (Cepeda et al., 2010a), relacionados con eventos causados por incendios ocurridos antes de iniciar la época de lluvias.

La clasificación de eventos se basa en la definición de verdaderos-positivos VP (positivos sobre o arriba de la línea de umbral), o falsos-negativos FN (negativos debajo de la línea de umbral). Existe también la posibilidad de contar con eventos que quedan arriba de la línea del umbral que no están asociados a la generación de deslizamientos o flujos, los cuales se definen como falsos-positivos FP, y viceversa (los eventos que quedan debajo de la línea del umbral los cuales están asociados a la generación de deslizamientos o flujos) los cuales se definen como verdaderos-negativos VN. El total de eventos positivos se define por P, mientras que los falsos por N. De este sistema de clasificación se puede evaluar las frecuencias de los VP o $FVP = VP/P$ y de los falsos positivos NP o $FVN = VN/N$. Las frecuencias de falsa alarma se definen por FFP/N . Los valores de estas frecuencias dependen de la selección de cada umbral (asociado a una combinación particular de los parámetros del modelo).

Para efectos de definir la función a-priori en la solución del problema inverso, se proponen funciones de probabilidad no-informativas para cada parámetro (en este caso distribuciones inversas uniformes) y se asume que estos son independientes. Para la función de máxima verosimilitud se propone que ésta se defina como el producto entre la Frecuencia de Valores Positivos y la Frecuencia de Valores Negativos $FVP \cdot FVN$, ya que este refleja la probabilidad de dos eventos que se asumen independientes y que se espera maximicen la probabilidad de seleccionar una combinación de parámetros del modelo de umbral de precipitación. Es decir, este producto refleja la probabilidad de seleccionar una combinación de parámetros que clasifique nuevos eventos de lluvia como verdaderos-positivos y como verdaderos-negativos.

La Figura 5 incluye los resultados esperados de la media de la clasificación probabilista, acompañada por los umbrales de más y menos una desviación estándar. La generación de distribuciones de frecuencias obtenidas para cada parámetro se presentan en las Figuras 6a y 6b respectivamente, para un total de 500,000 muestras (i.e., combinaciones de parámetros) obtenidas vía CMMC, donde se ha garantizado convergencia. Estas distribuciones representan la tendencia marginal de cada parámetro, las cuales asumen formas particulares de acuerdo a la función a-posteriori.

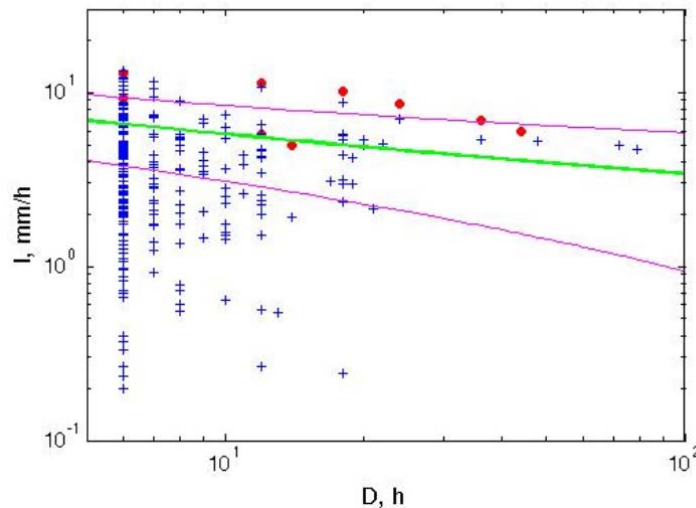


Figura 5: Base de datos utilizada para la clasificación probabilista, y definición del umbral medio y rango potencial de variación.

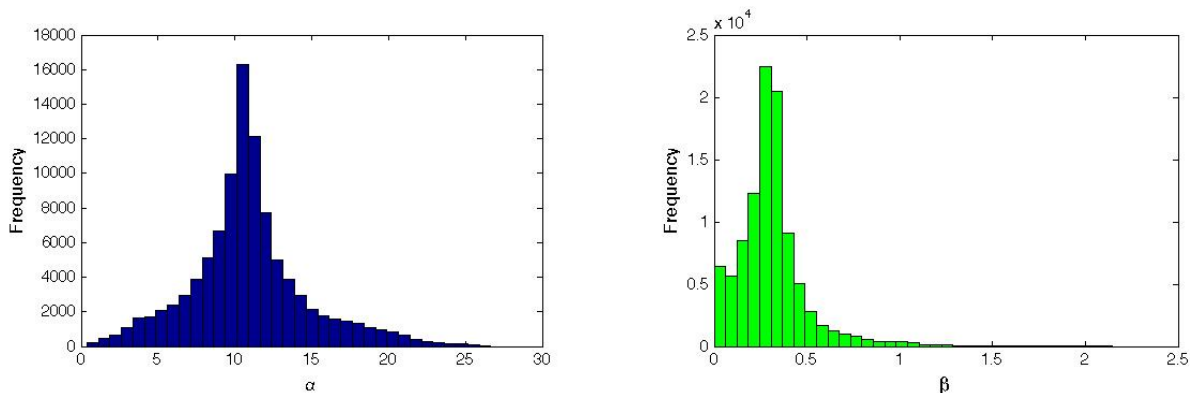


Figura 6: Distribuciones de frecuencia para el parámetro α (a) y β (b).

La Figura 7 presenta la distribución conjunta de frecuencias de estos mismos parámetros, en la cual se puede apreciar el grado de correlación entre sí. En este caso, el grado de correlación lineal es muy bajo, mostrando la aparente independencia entre ambos parámetros, pero la correlación no-lineal descrita por los contornos de frecuencia es de gran interés, ya que describe los dominios más probables donde la combinación de parámetros puede acercarse a la determinación óptima del umbral de precipitación.

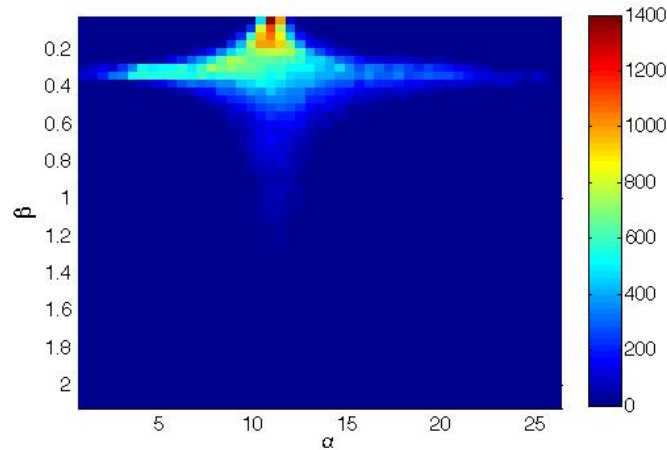


Figura 7: Mapa de frecuencias indicando la uni-modalidad de la distribución óptima de los parámetros del modelo, así como la estructura de correlación entre los parámetros del modelo.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta la formulación probabilista de un modelo empírico usado para la determinación de deslizamientos de tierra producidos por el efecto de lluvia. La clasificación probabilista de este modelo está basada en la solución del problema inverso definido por el marco teórico Bayesiano. Éste se ha aplicado al caso de umbrales por precipitación de lluvia asociados a eventos de deslizamientos de tierra y flujos de lodo en la vecindad del Pico El Picacho, cercano a la ciudad de San Salvador. El impacto de este análisis versa en la cuantificación de la incertidumbre asociada a la definición de los parámetros del modelo de clasificación que identifica eventos positivos y negativos. Esto permite identificar de manera indirecta las probabilidades de falsos positivos y falsos negativos para una zona de alto riesgo por pérdidas de vidas humanas y económicas donde no se cuenta con información geotécnica. Los resultados muestran las distribuciones de frecuencia de los parámetros del modelo de clasificación, del cual se pueden obtener muestras de combinaciones que permitan simular umbrales de precipitación condicionados en la base de datos, y asignar así una medida de confianza sobre el modelo propuesto. La aproximación probabilista propuesta podrá actualizarse de una manera sencilla siguiendo el principio Bayesiano, una vez que se cuenten con más datos. Así, se podrá determinar si la incertidumbre en la determinación de los parámetros disminuye con el consecuente incremento de confianza en la determinación del modelo de umbral de precipitación, y permitirá también comparar los niveles de confianza cuando se utilicen modelos basados en principios geomecánicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sistema Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador. En particular desean reconocer a Rosa María Araujo, por haber proporcionado la base de datos correspondiente a la estación del Boquerón. Los autores también agradecen el apoyo del Consejo de Investigación de Noruega y del Centro Internacional de GeoRiesgos ICG del Instituto Noruego de Geotecnia NGI, los cuales financiaron parcialmente los resultados de esta investigación.

REFERENCIAS

- Cepeda, J., Chávez, J.A. y Cruz-Martínez, C. (2010a). "Procedure for the selection of runout model parameters from landslide back-analyses: application to the metropolitan area of San Salvador, El Salvador", *Landslides*, Vol. 7, No. 2, pp. 105-116.
- Cepeda, J., Høeg, K. y Nadim, F. (2010b). "Landslide-triggering rainfall thresholds: a conceptual framework", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 43, No. 1, pp. 69-84.

- Caine, N. (1980). "The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows", *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography*, Vol. 62, No. 1-2, pp. 23-27.
- Cannon, S.H., Gartner, J.E., Wilson, R.C., Bowers, J.C. y Laber, J.L. (2008). "Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California", *Geomorphology*, Vol. 96, No. 3-4, pp. 250-269.
- Esmailzadeh, S. y Medina-Cetina, Z. (2010). "Joint states of information from different GEO-surveying methods," *Proceedings of the Engineering Mechanics Institute Conference*, Los Angeles, California, USA.
- Gauer, P., Medina-Cetina, Z., Lied, K. y Kristensen, K. (2009). "Optimization and probabilistic calibration of avalanche block models", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 59, Issues 2-3, pp. 251-258.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. y Stark, C.P. (2007). "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe", *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, Vol. 3-4, pp. 239-267.
- Innes, J.L. (1983). "Debris flows", *Progress in Physical Geography*, Vol. 7. No. 4, pp. 469-501.
- Medina-Cetina, Z. (2006). "Probabilistic calibration of soil constitutive models", Ph.D. Dissertation, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, USA.
- Medina-Cetina, Z., Ghanem, R. y Rechenmacher, A. (2007). "A functional Bayesian method for the solution of inverse problems with spatio-temporal parameters," *6th European LS_DYNA Users' Conference*, Gothenburg, Sweden.
- Medina-Cetina, Z. y Nadim, F. (2008). "Stochastic design of an early warning system", *Geo Risk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol. 2, Issue 4, pp. 223-236.
- Nadim, F., Cepeda, J., Sandersen, F., Jaedicke, C., y Heyerdahl, H. (2009). "Prediction of rainfall-induced landslides through empirical and numerical models", *Proceedings of the First Italian Workshop on Landslides (IWL 2009)*, Naples, Italy, pp. 206-215.
- Robert, C.P. y Casella, G. (2004). *Monte Carlo Statistical Methods*, Springer, New York.
- Zhang, Y., Medina-Cetina, Z. y Khoa, H.D.V. (2011). "Probabilistic calibration of a discrete particle model for geomaterials," *Proceedings of the Geo-Frontiers Conference*, Dallas, Texas, USA.