Reporte de la metodología para identificar los deslizamientos de la tierra usando LIDAR y producir un mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Proyecto CONACYT-INEGI 209243

"Aplicación de LIDAR en la Evaluación del Peligro y Cartografía de la Susceptibilidad por deslizamientos en áreas montañosas de la Ciudad de México y Guerrero".

Responsable técnica del proyecto

Dra. María Teresa Ramírez-Herrera (UNAM)

Participantes:

Dr. Krzysztof Gaidzik (Posdoctorado)

Dr. Ben A. Leshchinsky (Oregon State University)

Dr. Netra R. Regmi (The University of Arizona)

Dr. Luis Mario Paredes Mejia (California Department of Transportation – CALTRANS)

Dr. Gabriel Legorreta Paulin (UNAM)

Dr. Ramón Arrowsmith (Arizona State University, Tempe, AZ, USA)

Mr. Michael Bunn (Oregon State University)

Dr. Michael Olsen (Oregon State University)

Dr. Nathan Lyons (Posdoctorado)

Dr. Christopher Crosby (UNAVCO y Open Topography)

Dr. Nancy Glenn (Boise State University)

Dr. Edwin Nissen (Colorado School of Mines)

Dr. Nestor Corona Morales (El Colegio de Michoacán)

Introducción

Los deslizamientos son fenómenos naturales muy complejos, que podrían plantear un gran peligro para la actividad humana, resultado en consecuencias graves, incluyendo los impactos económicos y de infraestructura, como también damnificados. Por lo tanto la identificación de los deslizamientos, como las áreas vulnerable a ocurrencia de los deslizamientos es fundamental para la planificación de la gestión del uso del suelo y la ocupación humana en la región. Hasta ahora la metodología más común para investigar los deslizamientos, incluye las siguientes técnicas: trabajo de campo para mapear los deslizamientos, estudio de los mapas topográficos, geológicos, de suelo, de vegetación, uso de suelo, fotografías aéreas e imágenes de satélite, las informaciones históricas sobre los deslizamientos históricos y paleodeslizamientos (fechados por ^{14}C o otros métodos radiométricas), estudio de clima (en particular la precipitación), etc. Aunque esas técnicas usadas son apropiadas podrían dar resultados satisfactorios, la implementación de todo el proceso requiere tiempo considerable, como también un experto con gran experiencia en esa materia. Además, al final los resultados siempre son subjetivos.

Afortunadamente en los últimos años la resolución de los modelos digitales y las técnicas para obtener la información validable y de buena resolución de los sensores remotos se ha desarrollado rápidamente. La posibilidad de adquirir información con gran exactitud y alta resolución espacial en las tres dimensiones del terreno ha permitido investigar el fenómeno de los deslizamientos en nuevas formas. La novedosa técnica de LIDAR (Light Detection and Ranging) nos permitió desarrollar las técnicas automatizadas y semi-automatizadas para identificar los deslizamientos y producir mapas de susceptibilidad a deslizamientos.

En este proyecto, aunque nos hemos comprometido a desarrollar solo un método semi-automatizado, **desarrollamos un método automatizado**, que incluye dos técnicas para identificar los deslizamientos y crear los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos usando los datos topográficos de alta resolución (LIDAR). De este modo, el mapa de susceptibilidad a deslizamientos puede hacerse automáticamente utilizando las técnicas propuestas: 1) Método de Conexión Contorno (*Contour Connection Method, CCM*) para identificar y mapear los deslizamientos basado en la forma de las características topográficas y 2) método de regresión logística binaria para producir un mapa de la probabilidad y la susceptibilidad a deslizamientos de tierra. La gran ventaja del método aquí propuesto (CMM) es que aparte de los datos

topográficos de LIDAR, la técnica no necesita ninguna otra información para identificar y mapear los deslizamientos. Además debido a un gran volumen de datos contenidos en LIDAR, en este proyecto el método fue modificado para acelerar el tiempo que se necesita para realizar los cálculos de la regresión logística. En el *Reporte de la metodología para identificar los deslizamientos de la tierra usando LIDAR y producir un mapa de susceptibilidad a deslizamientos* adjunto en archivo PDF al informe técnico del etapa 2 del proyecto CONACYT-INEGI número 209243 describimos en detalles la metodología propuesta. Más detalles sobre la metodología automatizada propuesta se pueden encontrar en los manuscritos que mandamos a las revistas internacionales y que se encuentran en revisión.

Hemos demostrado que la combinación de esas técnicas automatizadas puede resultar en el modelo de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra con una precisión y exactitud muy alta (hasta 85%), sin embargo se requiere de datos LIDAR en alta resolución. Los datos topográficos de LIDAR mejoraron significativamente los modelos de susceptibilidad. Estos modelos son más precisos y proporcionan mejores resultados. Muestran claramente la diferenciación de la probabilidad de deslizamientos y la susceptibilidad a lo largo y ancho de las pendientes en escala detallada, lo que es imposible obtener usando los datos de la resolución horizontal de 15 m y más.

Dichas técnicas para mapear deslizamientos y la susceptibilidad a los deslizamientos son particularmente válidas para una evaluación rápida de peligro de deslizamientos. El único requisito es el acceso a datos LIDAR necesarios para alcanzar una alta precisión de los productos. Esto exige producir datos LIDAR y otros datos de teledetección de alta resolución que sean de libre acceso.

1. Método de Conexión Contorno (*Contour Connection Method, CCM*)

A) Introducción

El objetivo principal del método de conexión contorno (CCM) es explorar rápidamente grandes áreas y automáticamente identificar posibles deslizamientos por delinear los escarpes de deslizamientos de tierra basado en la detección de características morfológicas. De esa manera, el método es similar a la técnica tradicional (manual), la cual también utiliza las características morfológicas del paisaje para reconocer los deslizamientos y zonas con riesgo de posibles deslizamientos de tierra. La gran ventaja del método desarrollado es su objetividad. La segunda ventaja es que esta técnica requiere sólo un conjunto de datos para su aplicación, es decir, el modelo de elevación digital de alta resolución LIDAR, por lo que es método sencillo y rápido para identificar los deslizamientos de tierra y evaluar el riesgo de deslizamientos de tierra en áreas amplias con poca accesibilidad, tales como las zonas montañosas del estado de Guerrero. Esto es especialmente importante, porque hace que este método sea mejor que otras herramientas actualmente disponibles para la detección de los deslizamientos.

El CCM opera con los datos LIDAR y utiliza los contornos y las conexiones de vectores para estimar y analizar la forma y pendiente entre las capas. La aplicación de CCM consta en tres etapas principales: 1) pre-procesamiento, 2) procesamiento, y 3) post-procesamiento (Figura 1). El proceso se lleva a cabo mediante la discretización de la elevación de un MDT (modelo digital del terreno) derivado de los datos LIDAR con contornos de nodos asignados para permitir el cálculo de la pendiente entre las conexiones de nodo-nodo en contornos. Utilizando este marco, CCM identifica primero escarpes de deslizamiento de tierra sobre la base de un umbral de talud superior y, a continuación, busca las conexiones más empinadas abajo hasta que se alcanza un umbral límite. De esa manera el CCM mapea los límites y la extensión de un deslizamiento de tierra (Figura 2).

El CCM necesita un modelo digital de alta resolución (preferiblemente píxeles menos de 5 m) para resolver adecuadamente los pequeños rasgos de deslizamientos, en el caso de estudio eran los más comunes después del huracán Manuel, y las características que se esperan más comunes en las zonas montañosas de clima cálido y húmedo, tales como Sierra Madre del Sur en Guerrero. Por lo tanto el método requiere de un modelo de buena calidad.

B) Pre-procesamiento

Pre-procesamiento comienza con la entrada de datos LIDAR, junto con una bien definida por tres coordenadas (X_o, Y_o, Z_o) área de estudio, y los criterios de detección de entrada (Figura 1).

En esta etapa los datos de LIDAR se cortan en el área de búsqueda definida, de acuerdo con las coordenadas de entrada X_o, Y_o, Z_o. Este proceso es seguido por la asignación de capas de contorno basado en proporcionado MDT y al espaciamiento de ΔEz, que depende de la resolución de MDT. El último paso es la asignación de nodos espaciados uniformemente en cada contorno, que se utilizan para detectar deslizamientos de tierra durante procesamiento.

C) Procesamiento

El procesamiento incluye la detección de los deslizamientos en base a los criterios de búsqueda de gradiente de escarpa Δ_{scarp}, gradiente de la zona activa diapositiva, y los parámetros de ramificación, a partir del contorno de la parte superior (Z_i), y al lado del contorno en la cota inferior ($Z_j = Z_i - \Delta_{Ez}$) (Figs. 1-3).

El algoritmo (utilizando software MATLAB) calcula el gradiente de escarpa entre cada nodo Z_i a cada nodo Z_j. Si las conexiones entre los nodos son iguales o exceden un gradiente indicativo de escarpa (Δ_{scarp}), el nodo Z_i se considera un nodo de la activación, el nodo Z_j - nodo activo, y la conexión entre estos puntos se denomina un vector de activación conexión ((ΔX_{i-j}, ΔY_{i-j}, ΔZ_{i-j}) ≥ Δ_{scarp}) (Figuras 1-3).

D) Post-procesamiento

El método de CCM, aparte de identificar los deslizamientos, proporciona también información sobre las características morfológicas de un deslizamiento. Tal información se puede extraer del vector de la densidad de conexión (D_i), la cual representa el número de vectores de conexión pendiente arriba que se conectan a los nodos activos en una capa de contorno. Por ejemplo, los contornos que contienen nodos con varias conexiones de ladera son indicativos de concavidades empinadas, y podrían indicar escarpas, o el cuerpo de un

deslizamiento de tierra que se ha producido (por lo general esto es cierto para $D_i > B_n$). Por otra parte, las zonas con nodos huérfanos sugieren convexidades menos profundas, que sugieren un abanico de deslizamiento, o depósitos de flujo de tierra ($D_i < B_n$).

E) La aplicación de CCM para Guerrero

Para aplicar el método de CCM para las áreas de estudio, primero creamos un MDT alisado utilizando estadísticas focales (disponibles en el paquete comercial de ESRI ArcGIS) y las celdas de 3x3 (Figura 4). Luego utilizamos los parámetros de búsqueda y los parámetros de entrada.

F) Resultados de las áreas de estudio

Utilizando el método de CCM identificamos 1726 deslizamientos de tierra en dos áreas seleccionadas de Guerrero: 1328 (~ 77%) en la región No. 1 y 344 (23%) en la región No. 2.

Región No. 1

El algoritmo de CCM detectó 1382 deslizamientos de tierra, incluyendo el catastrófico deslizamiento de tierra en La Pintada, que terminó en la muerte de 71 personas (Figura 5). La extensión del deslizamiento fue corroborada luego utilizando las fotografías del Dron y los modelos del SfM. La mayoría de los deslizamientos de tierra eran de pequeño a mediano tamaño, lo que demuestra un área promedio de las extensiones de deslizamientos (medido directamente de polígonos deslizamiento de tierra medida) de aproximadamente 4500 m^2. La mayoría de los deslizamientos se ocurrió en la parte central y norte de esta región, en las zonas de convergencia topográfica. Sin embargo, varios grandes deslizamientos también se ocurrieron, principalmente en la región sur, relacionados con la inclinación de los pendientes. Los deslizamientos identificados por el CCM se producen principalmente en la proximidad de ríos y arroyos, pero también, como en las partes occidental y septentrional, en la proximidad de carreteras y asentamientos humanos. Estadísticas calculadas demuestran una tendencia bimodal en relación longitud/anchura (L/A) con una relación media de aproximadamente 3,6. Cerca de 300 deslizamientos de tierra demuestran ratio L/A menos de dos, típicos de los deslizamientos de

tierra profundos. Sin embargo, muchos de los deslizamientos de tierra restantes demostraron valores de ratio L/A muy alto (hasta > 10), sugestivo de fluidización, lo que sugiere la existencia de los flujos de escombros y deslizamientos que se producen después de la precipitación pesada.

Región No. 2

A menos de 350 deslizamientos de tierra se identificaron en la región No. 2 utilizando el algoritmo de CCM (Figura 6). Se observó una diferencia significativa en el número de de deslizamientos entre las pendientes con orientación diferente. En la ladera orientada hacia el norte sólo se identificaron 73 deslizamientos de tierra (el 21,2% de todos los deslizamientos de tierra en esta región), mientras que en la ladera opuesta – orientada al sur – reconocimos 271 deslizamientos (78,8%). Los deslizamientos observados en esta región son generalmente más pequeños que los de la región No. 1. El ratio L/A muestra valores altos, similares como en la región No. 1, lo que sugiere predominio de flujos de escombros y deslizamientos que se producen después de la precipitación pesada.

2. Regresión logística para mapear susceptibilidad a deslizamientos

A) Introducción

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos fue producido por medio del método de regresión logística modificado por K. Gaidzik y N.R. Regmi (participantes del proyecto). La versión modificada mejoró el código y el tiempo requerido para el análisis de los datos LIDAR, de 7-8 días a 1-2 días.

Los métodos para mapear susceptibilidad a deslizamientos se pueden clasificar en cualitativos y cuantitativos (Figura 7). Los métodos cualitativos se basan en el conocimiento previo de expertos sobre los factores geológicos y geomorfológicos de deslizamientos. En esta técnica un experto pone normas y/o asigna ponderaciones a los factores causantes y los utiliza en mapear la susceptibilidad. Los métodos cuantitativos se basan en la integración de los factores que causan deslizamientos de tierra mediante el uso de relaciones estadísticas observadas con deslizamientos de tierra (probabilísticos), o mediante el uso de ecuaciones numéricas que explican mecanismo físico de deslizamientos (es decir, determinista). Por lo tanto, en los métodos cuantitativos eliminamos la subjetividad de un intérprete.

Métodos deterministas se concentran principalmente en la geometría de la pendiente, los datos de resistencia al cizallamiento (cohesión y ángulo de fricción interna), y los datos relacionados con el agua intersticial, considerando los siguientes factores: ángulo de inclinación, resistencia del material pendiente, estructura (discontinuidades de la roca y la estratificación del suelo), el contenido de humedad del material pendiente, y la profundidad de la capa freática para determinar un índice de la estabilidad de la pendiente, tales como el factor de seguridad. Estos métodos sólo proporcionan la estabilidad de una pendiente en el momento de la recolección de datos. Pero no tienen en cuenta los cambios o modificaciones de los factores que provocan deslizamientos de tierra, las frecuencias espaciales y temporales de los deslizamientos de tierra, y las magnitudes de los deslizamientos. Por lo tanto, un método que analiza el entorno de la pendiente fracasado, basado en la relación entre deslizamientos anteriores y los factores que provocan deslizamientos de tierra, y calcula la probabilidad de las laderas a fallar en el futuro – el método de regresión logística – es más apropiado para planificadores y tomadores de decisiones. Este método proporciona la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en el

futuro. Y por lo tanto el método de regresión logística es la técnica más adecuada para el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra.

B) Regresión logística

El método de regresión logística se compone de tres etapas principales (Figura 8): 1) identificación y recolección de los deslizamientos y los factores causantes de deslizamientos, junto con la conversión de estos datos en formatos SIG, 2) la clasificación de los deslizamientos de tierra y sus muestreo (la extracción de los valores de factores causantes a los puntos que representan la presencia o ausencia de los deslizamientos), y 3) la regresión logística para diferentes escenarios de muestreo de datos y variables tipos de deslizamientos de tierra. La regresión logística utiliza la siguiente ecuación para determinar la probabilidad de la presencia o ausencia de los deslizamientos:

$$p(y=1|x) = \frac{exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \ldots \beta_n x_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \ldots \beta_n x_n)} \quad (2)$$

donde x es el vector de una variable independiente (= factor causante de deslizamientos), β es el coeficiente(s) de la variable(s) independiente, y p es la probabilidad de la presencia (y = 1) de la variable dependiente (= deslizamiento).

Software necesario: A) ArcGIS o Global Mapper (o otro software de SIG), como también MATLAB, y B) cualquier software estadístico (por ejemplo, SPSS Statistics). ArcGIS se utiliza para superponer todas las capas espaciales, incluyendo inventario de deslizamientos y los mapas de los factores causantes de deslizamientos, pero también para visualizar los modelos de susceptibilidad resultados.

C) Etapa 1

La primera etapa del método de regresión logística consiste en la recolección de datos y su conversión en formato SIG (Figura 8). Los datos necesarios son los siguientes: 1) los deslizamientos existentes como puntos o polígonos, y 2) los datos de los factores causantes de deslizamientos de tierra

El inventario de los deslizamientos puede ser producido en manera tradicional (manual interpretación de las imágenes de satélite, fotografías aéreas, ortofotos, modelos digitales de elevación en diferentes escalas, trabajo de campo, etc.) o como lo proponemos en este proyecto – en forma automatizada utilizando el método de conexión contorno (CCM).

La selección de las variables (factores causantes de deslizamientos) que se utilizan en el cálculo puede depender de la disponibilidad de los datos, tipos de deslizamientos (diferentes factores serán cruciales para diferentes tipos de deslizamiento), la zona y escala de estudio. Por ejemplo en el taller (3 de Agosto 2016) presentamos la aplicación de este método al área seleccionada en el estado de Guerrero. En este ejemplo sólo se utilizaron los siguientes factores:

1. Topografía: elevación, inclinación, curvatura (planta, perfil y la curvatura tangente), aspecto;
2. Hidrología: proximidad a los ríos, la acumulación de flujo, longitud del flujo, índice de humedad topográfica (*topographic wetness index*), índice de poder de corriente (*stream power index*);
3. Clima: la radiación solar.

La razón de tal selección de los factores causantes de deslizamientos es que la mayoría de los deslizamientos estudiados están provocados por extremos eventos de precipitación. Estos deslizamientos se forman generalmente en la convergencia topografíca (Montgomery y Dietrich, 1994, Roering et al., 1999). Por lo tanto, las características topográficas, pero también hidrológicas y la orientación de las laderas, se cree que son los factores más importantes controlando la distribución de deslizamientos de tierra en el área de estudio. Las variaciones en la geología, uso de la tierra y el suelo podrían también influir la formación de deslizamientos, sin embargo, para el área de estudio estos conjuntos de datos carecen de la resolución para proporcionar información útil para producir mapas de susceptibilidad a deslizamientos en alta precisión y además no muestran ninguna diferenciación.

D) Etapa 2

Si el inventario de deslizamientos cubre diferentes tipos de deslizamientos deben ser clasificados y divididos en subgrupos separados y desde este punto aún más el análisis debe llevarse a cabo de forma individual para cada subconjunto. Sin embargo, si un tipo predomina y

los deslizamientos se formaron simultáneamente (es decir, provocados por el mismo evento), el análisis de regresión logística se puede realizar para el conjunto completo. En el caso de estudio presentado en el taller, el inventario de deslizamientos incluye principalmente los flujos de escombros producidos por un evento de precipitación extrema. Por esa razón no los dividimos en subconjuntos.

El segundo paso en esta etapa es el muestreo de puntos (píxeles) que representan la presencia o ausencia de los deslizamientos. Para eliminar el sesgo en el proceso de muestreo se utiliza la misma cantidad de puntos de la presencia y ausencia de los deslizamientos de tierra. Al principio tenemos que preparar un mapa con puntos que representan los deslizamientos de tierra. Para eso usando ArcGIS convertimos los polígonos de deslizamientos puntos. Las diferentes técnicas se pueden usar para muestrear los deslizamientos. Nosotros recomendamos usar solo los puntos de centroide de los polígonos. La discusión detallada cómo las diferentes técnicas de muestreo influyen la precisión de los modelos de susceptibilidad resultantes se encuentra en uno de nuestros manuscritos (Gaidzik et al., submitted 2016). Estos puntos estará obtener el valor 1, es decir, la presencia de deslizamiento de tierra. Consiguiente, usando la herramienta "geoestadística" en ArcGIS necesitamos determinar igual número de puntos distribuidos uniformemente fuera de los deslizamientos, que conseguirá el valor 0, es decir, ausencia de deslizamientos de tierra. En el siguiente paso tenemos que combinar los dos conjuntos de puntos con los valores de factores causantes de deslizamientos en una tabla de atributos. En el último paso la tabla de atributos debe ser exportado en formato *.dbf (para que pueda ser leído por SPSS Statistics en la tercera etapa). Originalmente se suponía que la tabla con los valores de todos los factores se producirá en ArcGIS. Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos relacionados con el LIDAR, se recomienda fusionar las tablas resultantes para cada factor en Excel, SPSS u otro software. Tal modificación del método propuesto puede resultar en hasta un 60-70% acortamiento del tiempo requerido.

E) Etapa 3

El análisis de regresión logística, junto con la producción de ROC Curve (para verificar el modelo) son los pasos principales en la tercera etapa de la metodología propuesta. En primer lugar tenemos que importar la tabla de atributos en SPSS Statistics. Consiguiente, el tipo de los

datos se necesita ser definido como categórico o numérico; es decir, los datos de deslizamientos es categórico y todos los datos topográficos son numéricos. El siguiente paso incluye la selección de regresión logística (Forward Logistic Regression). El cálculo de regresión logística se lleva a cabo utilizando los deslizamientos de tierra como una variable dependiente y todos los factores causantes como variables independientes. El proceso de cálculo de regresión logística en general es muy rápido, y resulta en la selección del mejor modelo y los coeficientes de regresión.

Teniendo los valores de coeficientes el mapa de probabilidad a deslizamientos se puede desarrollar en ArcGIS utilizando la ecuación No. 2. Los valores de probabilidad se pueden clasificar en diferentes tipos de susceptibilidad, en base a los cortes naturales en la curva de distribución de frecuencias de los valores de probabilidad o intervalos iguales si el histograma no muestra claras cortes naturales, por ejemplo: 0-0,25 – susceptibilidad muy baja (SMB), 0,25-0,5 – susceptibilidad baja (SB), 0,5-0,75 – susceptibilidad alta (SA), y 0,75-1 – susceptibilidad muy alta (SMA) (Figuras. 10 y 11).

Para verificar la precisión del modelo la curva de características operativas del receptor (ROC) se puede producir en SPSS Statistics (Figura 10 y 11). Para hacer eso tenemos que importar al software SPSS Statistics la misma tabla de datos como para la regresión logística y ejecutar análisis de la curva ROC. La predicción de probabilidad de la ocurrencia de deslizamientos de tierra se debe utilizar como variable de prueba, mientras que la presencia o ausencia de deslizamiento de tierra como variable de estado. Cuanto mayor sea el área bajo la curva, más precisa será la predicción de ocurrencia de deslizamientos.

E) Probabilidad y la susceptibilidad a deslizamientos basado en modelos digitales de elevaciones de diferentes escalas

Hemos producido mapas de probabilidad y susceptibilidad a deslizamientos utilizando los factores causantes extraídos de los datos LIDAR. Sin embargo, para comparar los resultados obtenidos, y para poner a prueba el valor de los modelos derivados de los datos LIDAR produjimos también los modelos de probabilidad y susceptibilidad para las mismas áreas utilizando los modelos con resolución horizontal de 15 m. Los resultados muestran diferencias muy significativas en la precisión y exactitud de los mapas producidos (Figura 12). Modelos derivados de DEM de 15 m de resolución en los detalles muestran muy baja resolución, no

adecuada y no suficiente para los planificadores y tomadores de decisiones. Modelos derivados de datos LIDAR son mucho más detallados, mostrando claramente las zonas de muy alta, alta, media y baja susceptibilidad a deslizamientos de tierra, y las variaciones de los valores de probabilidad de deslizamientos a lo largo y a través de la pendiente. El modelo basado en los datos LIDAR mejoró la precisión de más del 20%, llegando a valores de la curva ROC de hasta 97%.

3. Conclusión

En cocnlusión la propuesta que hacemos de metodología automatizada para determinar la probabilidad y susceptibilidad a deslizamientos de tierra basado en el inventario de CCM usando datos LIDAR (DTM derivados de datos LIDAR son mucho más detallados), muestra claramente las zonas de muy alta, alta, media y baja susceptibilidad a deslizamientos de tierra, y las variaciones de los valores de probabilidad de deslizamientos a lo largo y a través de la ladera. El modelo propuesto basado en los datos LIDAR mejora la precisión y exactitud de los mapas producidos. Esta información es adecuada y suficiente para los planificadores y tomadores de decisiones

Referencias

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the environment 58(1), 21-44.

Carrara A., 1983. Multivariate methods for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology 15, 403–426.

Gaidzik, G., Ramírez-Herrera, M.T., Bunn, M., Leshchinsky, B.A., Olsen, M., Regmi, N.R. (submitted, 2016). Comparing landslide susceptibility mapping based on LIDAR MDTs using manual and automated inventories in tropical mountains of Guerrero, Mexico. Geomatics, Natural Hazards and Risk.

Lees B.G., 1996. Neural networks applications in the geosciences: an introduction. Computers & Geosciences 22, 955–957.

Montgomery, D.R, Dietrich, W.E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water resources research 30(4), 1153-1171.

Ramírez-Herrera, M. T., Gaidzik, K. (submitted, 2016). Extreme events and climate change – Hurricane Manuel and the La Pintada Landslide, Southwest Mexico. Scientific Reports.

Roering, J.J, Kirchner, J.W, Dietrich, W.E. 1999. Evidence for nonlinear, diffusive sediment transport on hillslopes and implications for landscape morphology. Water Resources Research 35(3), 853-870.