

Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del volcán Pico de Orizaba, México

Recibido: 15 de abril de 2013. Aceptado en versión final: 26 de agosto de 2013.

Gabriel Legorreta Paulín*

José Lugo Hubp**

Resumen. La cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto, de 111 km² de superficie, ubicada en el flanco suroccidental del volcán Pico de Orizaba (5675 msnm), se estudió utilizando fotografías aéreas de diversos años y trabajo de campo, con una adaptación del *Protocolo de zonificación del peligro de remoción en masa del Departamento de Recursos Naturales*, del Estado de Washington, EUA. Se reconocieron 571 procesos gravitacionales de seis tipos: superficial, de escombros-avalancha y profundo, flujos de escombros y de tierra, y caída de rocas. Se definieron doce formas principales del relieve en las que ocurren procesos gravitacionales: barrancos, cabeceras, escarpes de cabeceras de deslizamiento profundo, meandros, planicies, además de tres tipos de laderas clasificadas por su gradiente (véase

Tabla 2): bajo, moderado y alto, caída de rocas, barrancas no reguladas, cabeceras no reguladas y laderas convergentes no reguladas. Los procesos gravitacionales potenciales se clasifican en tres rangos de peligro: bajo, alto y muy alto. Los procesos gravitacionales se presentan principalmente en laderas con gradiente moderado, en barrancas no reguladas, en barrancas y en laderas con gradiente bajo. Mientras que el rango de estabilidad es bajo en planicies y en laderas de gradiente menor, es alto en las laderas de gradiente moderado y mayor, en las ocho restantes es muy alto.

Palabras clave: SIG, inventario de procesos gravitacionales, mapa de peligros de procesos gravitacionales, volcán Pico de Orizaba.

Hazard zonation of gravitational processes on the southwestern flank of Pico de Orizaba volcano, Mexico

Abstract. The study area is the river Chiquito-Barranca del Muerto watershed that covers 111 km² and lies on the southwestern flank of Pico de Orizaba volcano. The watershed was studied by using aerial photographs of different years and fieldwork with an adaptation of the *Landslide*

Hazard Zonation Protocol of the Washington State Department of Natural Resources, USA. 571 gravitational processes of six types were recognized: shallow, debris-avalanche and deep, debris flows and earthflows, and rock falls. We defined 12 major landforms on which gravitational processes occur: in-

* Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE), Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: legorretag@hotmail.com

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: lugoh@igg.unam.mx

Cómo citar:

Legorreta Paulín, G. y J. Lugo Hubp (2014), "Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del volcán Pico de Orizaba, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 84, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 20-31, dx.doi.org/10.14350/rig.37004.

ner gorges, headwalls, active scarps of deep-seated landslides, meanders, plains, three types of hillslopes classified by its gradient: low, moderate, and high, rockfall slopes, non-rule-identified inner gorges, non-rule-identified headwalls, and non-rule-identified converging hillslopes. The potential gravitational processes were classified into three hazard ranges: low, high, and very high. Gravitational processes occur primarily in moderate gradient hillslopes, non-rule-identified

inner gorges, inner gorges, and low-gradient hillslopes. The stability is low for plains and low gradient hillslopes, high for moderate and steep gradient hillslopes, and very high for the remaining eight landforms.

Key words: GIS, landslide inventory map, landslide hazard map, Pico de Orizaba volcano.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los mapas de inventario de procesos gravitacionales (remoción en masa, *landslides* en inglés) se han utilizado para estudiar estos procesos, tipo, abundancia, susceptibilidad y zonificación del peligro (Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, 2006; Hervás and Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010).

La elaboración, automatización y aplicación del inventario de procesos gravitacionales ha sido integrada a los sistemas de información geográfica (SIG) para hacer una evaluación a escala local o regional (Hammond *et al.*, 1992; Montgomery y Dietrich, 1994; Pack *et al.*, 1998; Zhou *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2006; Qui *et al.*, 2006). El mapa en cuestión es el paso preliminar, la base y fundamento para la elaboración de mapas de susceptibilidad, de peligros y de riesgos a escala local o regional y con enfoques desde el heurístico y el estadístico, hasta el determinístico (Castellanos y Van Westen, 2008; Hervás y Bobrowsky, 2009; Guzzetti *et al.*, 2012; Legorreta *et al.*, 2013).

En México se han venido realizando esfuerzos para evaluar y cartografiar procesos gravitacionales y su riesgo, a través de los SIG (Capra *et al.*, 2003; García *et al.*, 2006; Pérez, 2007; Secretaría de Protección Civil, 2010). Estos estudios incluyen conceptos básicos y las explicaciones de clasificación, mecanismos detonantes, criterios, consideraciones y análisis para el reconocimiento del peligro de deslizamiento, etc. A pesar de este esfuerzo por parte de científicos y autoridades gubernamentales, son pocos los mapas de inventario y de peligro de deslizamiento, y bases de datos geospaciales existentes en el país. Este es el caso del volcán Pico de Orizaba, en donde pese a la importancia de los procesos gravitacionales, no existen

procedimientos estandarizados para preparar el inventario o los mapas de peligro que recopilen el tipo, la abundancia, la distribución y el peligro por geoformas. Esta investigación utiliza al sistema fluvial de la cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba, como área de estudio, misma que presenta un relieve montañoso de pendientes fuertes, donde los materiales volcánicos y sedimentarios parentales han sido intemperizados a través de los años por las altas precipitaciones estacionales y el hidrotermalismo. Así por ejemplo, a pesar de la destrucción de vidas y bienes materiales en 2003 y 2011, en el valle inferior del río Chiquito-Barranca del Muerto, por la coalescencia de pequeños procesos gravitacionales cuyos depósitos aumentaron el poder destructivo de flujos de escombros, aún no existen medidas preventivas en la parte media y superior de la cuenca, ni tampoco inventarios de procesos gravitacionales o mapa de peligros.

Con base en lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es mostrar el desarrollo de una zonación de peligros de procesos gravitacionales por formas del relieve y con ello proveer un método cartográfico estandarizado que apoye a las autoridades gubernamentales y al público en general para la mitigación de estos fenómenos en México.

Este estudio desarrolla un inventario histórico de procesos gravitacionales con base en dos series de fotografías aéreas digitales y trabajo de campo. Los procesos de remoción en masa fueron digitalizados en el SIG, y una base de datos geoespacial se desarrolló para una mejor descripción. El trabajo de campo y la fotointerpretación permitieron la representación cartográfica de 571 procesos gravitacionales. La definición y cartografía geomorfológica se realizó por varios medios, como la morfometría, el conocimiento heurístico del área en estudio y sus procesos, la verificación y validación con trabajo

de campo (Dikau *et al.*, 1995; Evans, 2012) y utilizando y adaptando el protocolo de zonificación del peligro de procesos gravitacionales del Departamento de Recursos Naturales (DNR), División de Prácticas Forestales del Estado de Washington, (Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, 2006). Este análisis divide la cuenca en doce formas del relieve originadas por remoción en masa, a las cuales se les asignaron índices de peligrosidad y de estabilidad de bajo a muy alto. En la cartografía se incluyen unidades o formas reguladas del relieve (FRR) definidas como de alto riesgo de producir deslizamientos e incluyen: barrancos, cabeceras (también llamados depresiones de lechos rocosos, rellenamientos de coluvión o simplemente depresiones), cabeceras convergentes, deslizamientos de asentamiento profundo activos, flujos de tierra y meandros. Otras formas del relieve que fueron cartografiadas, llamadas formas no reguladas del relieve (FNRR) incluyen: barrancos, cabeceras, cabeceras convergentes, planicies, laderas con gradiente bajo, moderado y alto.

Para cada forma de relieve, el rango de valoración de procesos gravitacionales por área (RVDA) y rango de valoración de procesos gravitacionales por frecuencia (RVDF) fue calculado, así como el riesgo global de la cuenca. El estudio muestra que la cuenca tiene un riesgo potencial muy alto de producir procesos gravitacionales, siendo las barrancas de las FRR y FNRR así como de las laderas de gradiente moderado de las FNRR, las que presentan el mayor número de casos y, por ende, son las de mayor susceptibilidad y peligro.

ANTECEDENTES

Proyectos de zonación de la susceptibilidad, del peligro y del riesgo por procesos gravitacionales, se han abordado mediante la compilación de inventarios multitemporales y el modelado de la inestabilidad, mediante el uso de un SIG (Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, 2006; Hervás and Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010). Una vez compilada la distribución, la frecuencia, densidad y bases de

datos geoespaciales en el inventario de procesos gravitacionales, se analiza la susceptibilidad, el peligro y el riesgo, clasificando la superficie en formas del relieve (Iwashasi *et al.*, 2001; Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, 2006; Evans, 2012; Jasiewicz and Stepinski, 2013). El análisis de los procesos en cuestión y su relación con las formas del relieve es fundamental para la calibración y evaluación de modelos de procesos gravitacionales (Dietrich *et al.*, 2003; Legorreta y Bursik, 2009). Las formas del relieve son definidas y cartografiadas mediante el uso de diversos enfoques, como el uso de parámetros geomorfológicos, técnicas de filtros espaciales, el análisis estadístico y con base en el conocimiento del investigador y de la evidencia empírica (Pennock *et al.*, 1987; Pike and Dikau, 1995; Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, 2006; Iwashasi and Pike, 2007; Minar and Evans, 2008; Evans, 2012). Así por ejemplo, desde inicios de la década de los noventa, geólogos del Departamento de Recursos Naturales (DNR), EUA, han estado realizando inventarios multitemporales de procesos gravitacionales y elaborando mapas del peligro por formas del relieve, para apoyar y planear las prácticas forestales de este estado. Su metodología establecida en forma de protocolo cartográfico y de análisis del peligro abarca tres niveles:

- nivel 1 de análisis: el inventario de procesos gravitacionales;
- nivel 2: la cartografía de las formas del relieve y el cálculo de un índice de peligrosidad;
- nivel 3: la investigación específica de sitios forestales prioritarios (Washington State Department of Natural Resources, 2006).

En México, numerosas aplicaciones apoyadas en los SIG se han utilizado para representar y evaluar las formas de relieve y el riesgo de procesos gravitacionales a escala local o regional, mediante el uso de métodos heurísticos, estadísticos o determinísticos (Bocco, 1983; Tapia y López, 2002; Bolongaro *et al.*, 2005; Capra *et al.*, 2003; Pérez, 2007; Secretaría de Protección Civil, 2010). Un marco general y orientación para la preparación de atlas de peligros

y riesgos de procesos gravitacionales a nivel estatal fue preparado por el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) de México. Esta guía incluye conceptos, descripciones y explicaciones de los tipos de procesos y su clasificación, los mecanismos de activación y criterios a considerar en la evaluación y el reconocimiento del peligro en un área determinada (CENAPRED, 2004).

En el estado de Veracruz fue creado en 2010 un atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado por la Secretaría de Protección Civil, en colaboración con otras agencias del gobierno federal y estatal. El atlas cuenta con un marco heurístico general para la evaluación en los SIG de los peligros respectivos a nivel estatal y municipal. En el área en estudio se han elaborado mapas de riesgo de lahares a lo largo de los sistemas fluviales del Pico de Orizaba (Sheridan *et al.*, 2001; Hubbard *et al.*, 2007). Para la cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto se hizo un mapa de inventario multi-temporal y un mapa de susceptibilidad a procesos gravitacionales. Permite la comparación de dos modelos: regresión logística múltiple (RLM) y de un modelo cartográfico/hidrológico (mapeo de estabilidad índice: SINMAP). Ambos modelos poseen un grado moderado de concordancia con el mapa del inventario de procesos gravitacionales. Es preferible la RLM por su capacidad de poder incorporar nuevas variables al análisis conforme se

van mejorando o adquiriendo los mapas temáticos de un área (Legorreta *et al.*, 2013). A pesar de este esfuerzo, son pocos los mapas de inventario, los conjuntos de datos geospaciales estandarizados, o de peligro asociados a las formas del relieve a lo largo del sistema fluvial del volcán Pico de Orizaba.

ÁREA EN ESTUDIO

La cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto se encuentra ubicada a $19^{\circ} 01' 49''$ $-18^{\circ} 48' 28''$ N y $97^{\circ} 16' 12''$ $-97^{\circ} 10' 5''$ W, en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba, México (Figura 1), situado en la sección oriental de la provincia fisiográfica llamada Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), una zona volcánica y tectónicamente activa que se extiende 1 000 km de oeste a este, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. El Pico de Orizaba es el punto más alto (5 675 msnm) y es una de las mayores amenazas potenciales para la formación de deslizamientos y flujos de escombros, debido a que en sus laderas se encuentran depósitos no consolidados de piroclastos de caída, de avalancha de escombros y coladas de lava. Algunos de estos materiales presentan una fuerte alteración por intemperismo e hidrotermalismo y están sujetos a condiciones de alta precipitación en temporada de lluvias. El clima en el área se clasifica como de

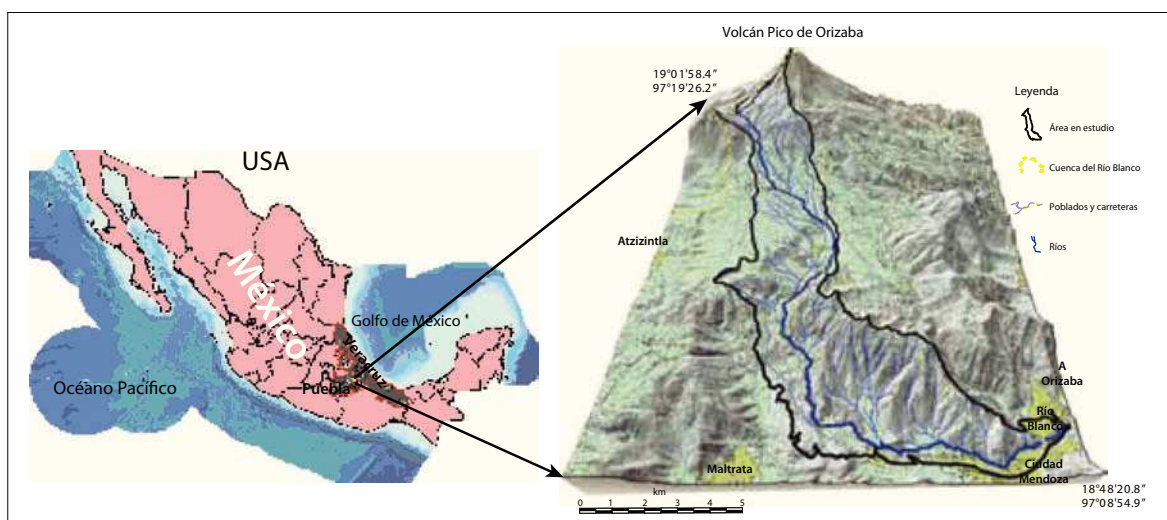


Figura 1. Localización del área en estudio.

tundra a más de 4 400 msnm, subtropical semifrío en 3 000-4 400 msnm, y templado subtropical, subhúmedo y semitropical cálido y húmedo a menos de 3 000 msnm (García, 2004). La precipitación media anual es de 1 000-1 100 mm/año a > 4 000 msnm y 927 mm/año a <1 500 msnm (Palacios *et al.*, 1999). La mayor precipitación es debida a lluvia durante las tormentas de la temporada entre mayo y noviembre.

La cuenca se encuentra entre los estados de Puebla y Veracruz y cubre un área de 111 km², con un rango de elevación de 1 340 a 5 675 msnm. Presenta una red fluvial dendrítica. El proceso es esencialmente de erosión. El río es afluente del Río Blanco que desemboca en el Golfo de México. La cuenca es de cuarto orden, de acuerdo con la clasificación de Strahler (1957) y posee una densidad de cauces de 1.7 km/km². Las pendientes oscilan entre <5° (valles o llanuras relativamente planas) y 61° (terrenos montañosos); están controladas por el tipo de rocas volcánicas o sedimentarias existentes, así, por ejemplo, lutita, lodolitas no cementadas o débilmente cementadas y calizas, constituyen laderas de hasta 32°. Laderas con pendiente fuerte, de entre 32 y 45° presentan intercalaciones de conglomerados cementados, aglomerados y depósitos de lahares. Los escarpes de más de 45° consisten en coladas de lava. El 29.7% de la superficie total de la cuenca es roca sedimentaria cretácica muy disecada, plegada y fracturada. Rocas volcánicas dacíticas y andecíticas del Terciario y depósitos cubren el 60.3% del área de la cuenca, mientras que tobas, brecha y aluvión son el 10%.

METODOLOGÍA

La evaluación del peligro se hizo en tres etapas (Figura 2). En la primera se elaboró el mapa de inventario de procesos gravitacionales históricos; en la segunda el mapa de formas del relieve, y en la tercera el cálculo del peligro de procesos asociados a formas del relieve, y en general de toda la cuenca.

En la primera etapa el investigador compila y analiza tanta información existente sobre la cuenca como sea posible. Incluye mapas impresos de carreteras, topografía y geología a escala 1:50 000, y

mapas de uso del suelo, clima e hidrología a escala 1:250 000. Todos los mapas analógicos en papel se convirtieron a un formato raster georreferenciado de 10 m de resolución, e incorporados como capas digitales en el SIG. Dentro de la información compilada también se incluyen ortofotos a escala 1:10 000 y 1:20 000, así como un modelo digital de elevación (MDE) de 10 m de resolución y sus productos derivados: porcentaje de pendiente del relieve y curvatura de la pendiente. A partir del análisis del mapa topográfico, del MDE y de las capas temáticas en el SIG, se calculó el área de la cuenca, la longitud del río principal y de los ríos secundarios, el patrón de escurrimiento, el orden de cauces y la densidad del drenaje. Toda esta información también fue agregada a la base de datos geoespacial de la cuenca, lo que permitió establecer una caracterización generalizada de los procesos gravitacionales y así facilitar su cartografía, análisis e interpretación. Por medio de las capas temáticas compiladas en el SIG y de su alternancia para mostrarse de manera gráfica, se creó un mapa base para ayudar en el proceso de digitalización, tanto de procesos como de las formas del relieve. Los primeros se identificaron mediante la fotointerpretación multitemporal y trabajo de campo. De esto resultó un mapa histórico de inventario de procesos gravitacionales. Las fotografías aéreas son de 1994 a escala 1:20 000 y de 2008 a una escala de 1:10 000. El trabajo de campo se llevó a cabo tres veces al año, desde 2009 hasta 2012, a lo largo del río principal y en algunos tributarios.

Durante la interpretación de las fotografías aéreas los procesos gravitacionales fueron cartografiados y clasificados en deslizamientos superficiales, flujos de escombros, deslizamientos de escombros, deslizamientos de asentamiento profundo, flujos de tierra y caídas de roca, de acuerdo con el protocolo ya mencionado (Washington DNR, 2006), Cruden y Varnes (1996), y Wieczorek (1984). Se utilizó un SIG que permite la digitalización directa en pantalla. Para la cartografía se utilizó papel transparente sobre las fotografías aéreas. En paralelo con la digitalización se elaboró una base de datos geoespacial con los atributos de los procesos: *i)* identificación única de los procesos gravitacionales, *ii)* tipo de proceso, *iii)* nivel de certeza de la

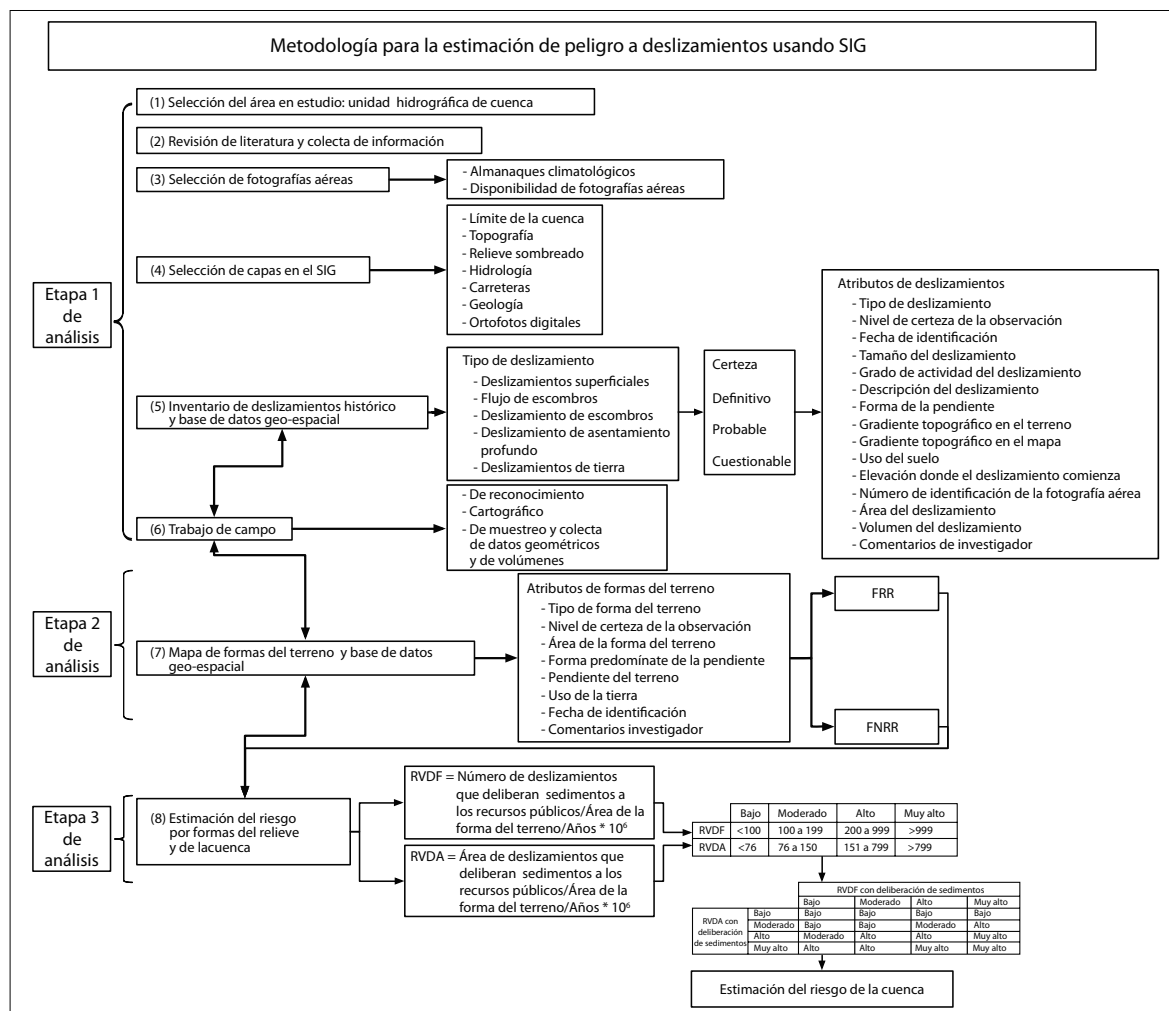


Figura 2. Procedimiento general para la elaboración del mapa de inventario de procesos gravitacionales y de peligros.

observación, *iv*) dimensiones del fenómeno (largo, ancho y profundidad), *v*) área en km², *vi*) la situación actual (activo, inactivo o relicto), *vii*) geometría de la ladera (cóncava, convexa y recta), *viii*) pendiente medida en el campo, *ix*) pendiente medida con el MDE, *x*) uso del suelo, *xi*) altitud de la base del proceso, *xii*) forma del relieve donde se ubica el movimiento, *xiii*) volumen, *xiv*) fecha de identificación del proceso (en el campo o en la foto aérea), *xv*) fecha del trabajo de campo o el año, y el número de la fotografía aérea donde fue identificado, y *xvi*) comentarios del investigador. Al mismo tiempo que se elaboraba la cartografía de procesos gravitacionales, se llevó a cabo el reconocimiento

de campo y la verificación, cubriendo un 37% de todos los procesos gravitacionales.

En la segunda etapa los procesos gravitacionales fueron asociados y agrupados con las formas del relieve definidas, aplicando las reglas del protocolo (Washington DNR, 2006). Son barrancas, cabeceras, cabeceras convergentes, deslizamientos de asentamiento profundo activos, flujos de tierra y meandros, y se definieron por su aspecto geométrico, la pendiente, litología y estructura geológica. Se incluye en el estudio la densidad de procesos gravitacionales y su relación con las prácticas forestales. Las fotografías aéreas, el inventario de procesos gravitacionales, el trabajo de campo y las

capas temáticas dentro del SIG se utilizaron también para identificar otras formas del relieve que no cumplieran con las definiciones señaladas para las formas reguladas del relieve. Estas FNRR incluyen barrancas, cabeceras, cabeceras convergentes, planicies, laderas con gradiente bajo, moderado y alto. Ambas formas de relieve (las FRR y las FNRR) se introducen en el SIG como polígonos con sus respectivos atributos: *a)* identificación única del polígono de las FRR y FNRR, *b)* tipo de forma del relieve, *c)* nivel de certeza de la observación, *d)* área de la forma del terreno, *e)* forma predominante de la ladera (cóncava, convexa y recta), *f)* pendiente del relieve, *g)* uso del suelo, *h)* fecha de identificación, e *i)* comentarios del investigador.

En la tercera etapa, el rango de valoración de procesos gravitacionales por área (RVDA) y rango de valoración de procesos gravitacionales por frecuencia (RVDF) fue calculado, así como el riesgo global de la cuenca. Por experiencia del DNR del estado de Washington, todas las FRR tienen índice de peligrosidad alto. Más tarde, mediante un análisis de evaluación semicuantitativa, la categoría de estas formas del relieve puede ser cambiada a la de peligro “muy alto”. Tanto para las FRR como para las FNRR el peligro se deriva de los valores que se corresponden con el número y el área de deslizamiento en cada forma de relieve, normalizado por el periodo analizado durante el estudio, y por el área de cada forma del relieve. Estos valores son llamados RVDF y RVDA. Este procedimiento se limita a los procesos gravitacionales que liberan sedimentos

a los obras públicas (carreteras, construcciones, valles fluviales que desembocan en poblaciones, etc.). Después de que los rangos RVDF y RVDA fueron determinados, cada uno se utilizó para clasificar las formas del relieve en bajo, moderado, alto o de muy alto riesgo. Para ello, los valores de RVDF y RVDA se introducen en una matriz con el fin de determinar el índice de peligrosidad general de la cuenca (paso 8 en la figura 2).

RESULTADOS

Una muestra representativa de 571 procesos gravitacionales fue inventariada durante la evaluación de la cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto. Se identificaron seis tipos de procesos de remoción en masa. Del total, 46.6% son superficiales, 26 flujos de escombros; 15.2 deslizamientos de escombros, 1.7 deslizamientos de asentamiento profundo, 1 flujos de tierra y 9.5 caída de rocas, respectivamente. De todos ellos, 93% fueron inventariados como definitivos, 6.3% como probables y 0.70% como cuestionables (Tabla 1). Los procesos gravitacionales son más abundantes en la parte media-alta de la cuenca, donde predominan depósitos piroclásticos y de caída. Casi dos terceras partes de los procesos gravitacionales se encuentran en roca volcánica o depósitos, y el resto están en rocas sedimentarias y depósitos.

En el área en estudio se definieron doce tipos de formas del relieve (Figura 3 y Tabla 2). En cada

Tabla 1. Resumen del tipo y número de procesos gravitacionales cartografiados en la cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto

Tipo de deslizamiento	Número de procesos gravitacionales cartografiados	Área del deslizamiento (ha)
Deslizamiento superficial	266	16.56
Flujo de escombros	149	1.29
Deslizamiento de escombros/avalancha	87	6.93
Deslizamiento de asentamiento profundo	10	0.46
Flujos de tierra	5	1.87
Caída de rocas	54	7.96
Total	571	30.07

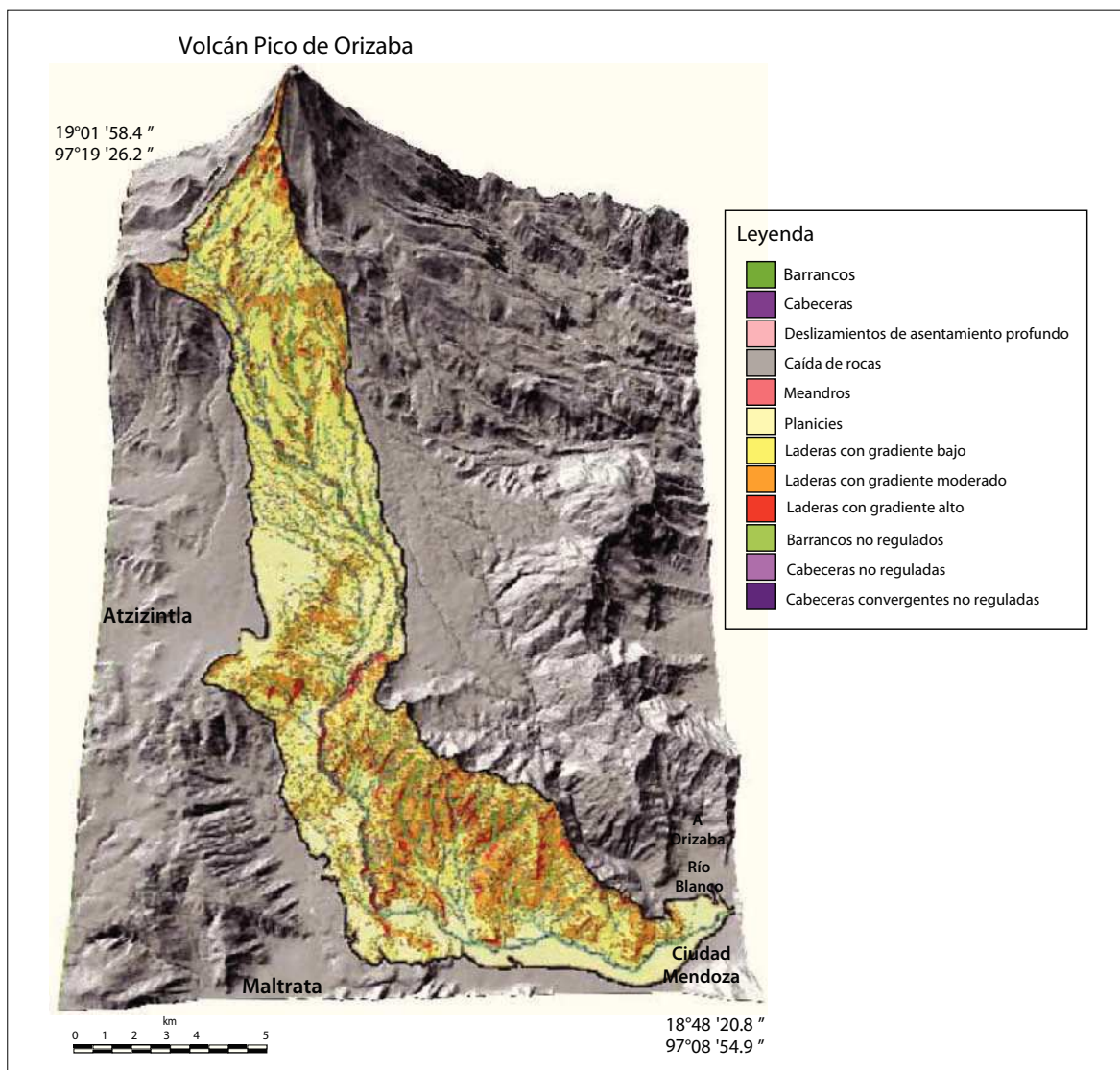


Figura 3. Mapa de formas del relieve.

caso se interpreta el grado de peligro por procesos gravitacionales. Las formas del relieve incluyen:

1. Las barrancas, con laderas asimétricas y simétricas son continuas en su extensión lateral, en forma de parches en valles secundarios o el primario. Pueden ocurrir procesos gravitacionales en laderas con paredes convexas o rectas de <65%.
2. Las cabeceras son de forma alargada elíptica o redonda, principalmente en las laderas

convexas, pero también se pueden encontrar en las laderas rectas, a menudo en las partes superiores de los cauces secundarios. Las depresiones de las cabeceras pueden ocurrir en terrenos menos escarpados.

3. Los escarpes incluyen la cabeza activa y laderas laterales del deslizamiento de asentamiento profundo. Hay un alto potencial de procesos gravitacionales secundarios superficiales en la cabecera, el cuerpo y el pie de los deslizamientos de asentamiento profundo, debido

Tabla 2. Resumen de las formas del relieve cartografiadas en la cuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto

Forma del relieve	Rango de estabilidad	Pendiente	Área (ha)	Porcentaje de la superficie total	Núm. de procesos gravitacionales	Porcentaje del total cartografiado
Barrancos	Muy alto	>70%	236.24	2.13	105	18.4
Cabeceras	Muy alto	>70%	4.93	0.14	1	0.2
Escarpes de cabeceras activas de deslizamientos de asentamiento profundo	Muy alto	>50%	1.32	0.01	19	3.3
Caída de rocas	Muy alto	30-145%	28.30	0.25	31	5.4
Meandros	Muy alto	30-70%	12.45	0.11	16	2.8
Planicies	Bajo	<10%	2194.12	19.74	14	2.5
Laderas con gradiente bajo	Bajo	11-40%	4449.93	40.04	82	14.4
Laderas con gradiente moderado	Alto	41-70%	2801.95	25.21	147	25.7
Laderas con gradiente alto	Alto	>70%	488.62	4.40	23	4.0
Barrancas no reguladas	Muy alto	30-70%	887.30	7.98	123	21.5
Cabeceras no reguladas	Muy alto	<70%	3.61	0.03	2	0.4
Cabeceras convergentes no reguladas	Muy alto	<70%	3.61	0.03	8	1.4
Total			11 112.38	100	571	100

- a la inestabilidad por lluvias extraordinarias o por el corte basal y lateral que producen las corrientes superficiales.
- La caída de rocas ocurre a lo largo de los cauces secundarios y el principal, en donde flujos de lava forman escarpes y paredes. Los deslizamientos forman terrazas taludes de escombros al pie de las paredes y muchas veces se extienden de una pared a otra sepultando el cauce.
 - Los meandros producen procesos gravitacionales cuando la corriente socava la base externa del mismo, a lo largo de las paredes verticales del valle o en altas terrazas de un cauce serpenteante no confinado.
 - Las planicies son terrenos bajos, tales como cauces y llanuras fluviales, terrazas y otras superficies. Los deslizamientos ocurren en esta unidad debido al corte de la corriente fluvial en los bordes exteriores de las paredes del valle.
 - Las laderas con gradiente bajo son convexas, cóncavas y rectas,
 - Las laderas con gradiente moderado representan un 25% del área de la cuenca; 25.7% de los procesos gravitacionales cartografiados se encuentran en esta forma del relieve con potencial alto.
 - A las laderas abruptas se asocian otras formas del relieve de alto riesgo, como barrancos, cabeceras, cabeceras convergentes, etc. Son los puntos de inicio de muchos procesos gravitacionales y flujos de escombros.
 - Las barrancas no reguladas del relieve son similares a las gargantas contempladas en las formas del relieve reguladas, pero tienen laderas convexas de 30-70% de inclinación. Se aprecian de suave pendiente a lo largo de los barrancos. Aquí los procesos gravitacionales parecen ser detonados por la acción erosiva de la corriente y presentan evidencia a lo largo de sus paredes laterales. Estas formas del

relieve pueden ser simétricas o asimétricas y son comúnmente intermitentes en su extensión lateral.

11. Las cabeceras no reguladas del relieve son similares a las de las cabeceras pero tienen laderas convexas de <70% de inclinación. Esta forma del relieve es el punto de inicio de muchos deslizamientos y flujos de escombros.
12. Las paredes convergentes no reguladas del relieve son el punto de inicio de muchos deslizamientos y flujos de escombros y llegan a contener otras formas del relieve como barrancas y cabeceras, que suelen estar separados por crestas o bordes de fuerte pendiente. La geometría de esta forma facilita la concentración de agua de escorrentía y subterránea, lo que produce que la presión de poro del suelo se incremente rápidamente durante eventos de precipitación intensa o prolongada.

CONCLUSIONES

En este trabajo se expone la aplicación de un método para la elaboración de la cartografía y la zonación del peligro de procesos gravitacionales, por formas del relieve, en terrenos volcánicos y sedimentarios. El estudio del río Chiquito Barranca-Muerto es un intento de adaptar y crear un prototipo de métodos estandarizados para estudios futuros de procesos gravitacionales en México. Un inventario de este tipo puede ser de utilidad para las autoridades locales en México, para mitigar el peligro y en la planificación.

Se hace hincapié en el hecho de que este estudio es el primero en México para evaluar y adaptar el protocolo seguido por el DNR del Estado de Washington, por lo tanto, está sujeto a adaptación, modificación y mejora, conforme se validen los mapas y bases de datos geoespaciales en la cuenca, y se realicen nuevas evaluaciones y comparación con otras cuencas en México. El inventario elaborado, aunque con limitaciones, es la base de una metodología integral para gestionar y apoyar los estudios de pronóstico de inestabilidad de laderas. El mapa de peligro, su interpretación y utilidad dependen de la experiencia del usuario, de los objetivos del pro-

yecto, la complejidad de la zona en estudio, y la información disponible.

La superposición de las formas terrestres contra el inventario en el SIG, muestra que las formas tienen un patrón diferente de procesos gravitacionales debido a su geología y propiedades geomorfológicas. Se encontró que casi el 40% de los procesos gravitacionales se desarrollan a lo largo de barrancas reguladas y no reguladas, las cuales cubren solo el 10% del área en estudio. En estas dos formas del relieve, deslizamientos superficiales, deslizamientos de escombros y flujos de escombros son los predominantes. En ambos, los procesos son más comunes en la parte media de la cuenca, en donde las pendientes fuertes y el material suelto de caída de cenizas, flujos piroclásticos y material sedimentario prevalecen. Esto es importante para entender la evolución a largo plazo del sistema fluvial en el flanco suroeste del Pico de Orizaba, y puede ser de utilidad en la cuantificación, evaluación y modelado de los volúmenes de materiales que aportan continuamente los procesos gravitacionales en la cuenca. La conjugación de los procesos gravitacionales aguas arriba en la cuenca aumentan el poder destructivo de los flujos de escombros, los cuales ponen en peligro a ciudades como Córdoba, Orizaba, Río Blanco, Nogales y Ciudad Mendoza, con una población total de 360 000 personas. Condiciones similares existen en las laderas de gradiente moderado, donde se da el 25% de todos los procesos gravitacionales cartografiados y hay un alto potencial de ocurrencia en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades del Departamento de Geología de la Universidad de Buffalo, el Consorcio Internacional sobre Procesos Gravitacionales (ICL), a las Divisiones de Prácticas Forestales y de Geología y Recursos Naturales del Departamento de Recursos Naturales (DNR) del Estado de Washington así como al laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía de la UNAM por su aprobación y ayuda. Esta investigación fue financiada por el Programa de

Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM núm. IB100412), The International Program on Landslides (IPL) y al programa de Ciencia Básica SEP-CONACYT # 167495.

REFERENCIAS

- Blahut, J., C. J. Van Westen and S. Sterlacchini (2010), "Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas", *Geomorphology*, vol. 119, no. 1-2, pp. 36-51.
- Bocco, G. (1983), "La zonalidad geomorfológica de la región comprendida en la carta Querétaro 1:250 000", *Memoria del IX Congreso Nacional de Geografía*, Guadalajara, Jal., febrero, pp. 28-36.
- Bolongaro-Crevenna, A., V. Torres Rodríguez, V. Sorani, D. Frame and M. A. Ortiz (2005), "Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico", *Geomorphology*, no. 67, pp. 407-422.
- Capra, L., J. Lugo Hubp y N. Dávila Hernández (2003), "Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento", *Revista mexicana de ciencias geológicas*, vol. 20, núm. 2, pp. 95-106.
- Castellanos Abella, E. A. and C. J. Van Westen (2008), "Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba", *Geomorphology*, no. 94, pp. 453-466.
- CENAPRED (2004), *Guía básica para la elaboración de mapas estatales y municipales de peligros de riesgos*, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación, México.
- Cruden, D. M. and D. Varnes (1996), "Landslide types and processes", in Turner, A. K. and R. L. Shuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transp. Res. Board, Spec. Rep., 247, pp. 36-75.
- Dietrich, W. E., D. G. Bellugi, L. S. Sklar, J. D. Stock, A. M. Heimsath and J. J. Roering (2003), "Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics", in Wilcock, P. R. and R. M. Iverson (eds.), *Prediction in Geomorphology*, Geophysical Monograph, 135, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 103-132.
- Dikau, R., E. E. Brabb, R. K. Mark and R. J. Pike (1995), "Morphometric landform analysis of New Mexico", *Z. Geomorphol.*, Suppl. Bd. 101, pp. 109-126.
- Evans, I. S. (2012), "Geomorphometry and landform mapping: What is a landform?", *Geomorphology*, vol. 137, no. 1, pp. 94-106.
- García, E. (2004), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, Serie Libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García Palomo A., V. Carlos Valerio, C. López Miguel, A. Galván García y A. Concha Dimas (2006), "Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 58, no. 2, pp. 195-204.
- Guzzetti, F., A. C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo and K. T. Chang (2012), "Landslide inventory maps: new tools for an old problem", *Earth Science Review*, no. 112, pp. 42-66.
- Hammond, C., D. Hall, S. Miller and P. Swetik (1992), *Level I Stability Analysis (LISA) documentation for version 2.0*, General Technical Report INT-285, US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT.
- Hervás, J. and P. Bobrowsky (2009), "Mapping: inventories, susceptibility, hazard and risk", in Sassa, K. and P. Canuti (eds.), *Landslides - Disaster Risk Reduction*, Springer, Berlin, pp. 321-349.
- Hubbard, B. E., M. F. Sheridan, G. Carrasco Núñez, R. Díaz Castellón and S. Rodríguez (2007), "Comparative lahar hazard mapping at Volcán Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 Digital Topography", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 160, no. 1, pp. 99-124.
- Iwahashi, J., S. Watanabe and T. Furuya (2001), "Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan", *Computer & Geosciences*, vol. 27, no. 7, pp. 851-865.
- Iwahashi, J. and R. Pike (2007), "Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature", *Geomorphology*, no. 86, pp. 409-440.
- Jasiewicz, J. and T. Stepinski (2013), "Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms", *Geomorphology*, no. 182, pp. 147-156.
- Lee, S., J. H. Ryu, J. S. Won and H. J. Park (2004), "Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network", *Engineering Geology*, no. 71, pp. 289-302.
- Legorreta P., G. and M. Bursik (2009), *Assessment of landslides susceptibility: LOGISNET: a tool for multithreshold, multilayer slope stability analysis*, VDM VERLAG DR. MÜLLER, USA.
- Legorreta, P. G., M. Bursik, M. T. Ramírez Herrera, J. Lugo Hubp, J. J. Zamorano Orozco and I. Alcántara Ayala (2013), Chapter 19 Landslide Inventory and Susceptibility Mapping in the río Chiquito-Barranca del Muerto Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico", in Sassa, K., B. Rouhban, S. Briceno, M.

- Mcaveney and B. He (eds.), *Landslides: Global Risk Preparedness*, Springer, Heidelberg, Germany, pp. 279-289.
- Minar, J. and I. Evans (2008), "Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping", *Geomorphology*, no. 95, pp. 236-259.
- Montgomery, D. R. and W. E. Dietrich (1994), "A physical based model for the topographic control on shallow landslides", *Water Resources Research*, no. 30, pp. 1153-1171.
- Pack, R. T., D. G. Tarboton and C. N. Goodwin (1998), "The SINMAP approach to terrain stability mapping", *Proceedings of the Eighth Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, British Columbia, Canada [<http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/>].
- Palacios, D., G. Parrilla and J. J. Zamorano (1999), "Paraglacial and postglacial debris flows on Little Ice Age terminal moraine: Jamapa Glacier, Pico de Orizaba (Mexico)", *Geomorphology*, no. 28, pp. 95-118.
- Pennock, D., B. Zebarth and E. De Jong (1987), "Landform classification and soil distribution inhummocky terrain, Saskatchewan, Canada", *Geoderma*, no. 40, pp. 297-315.
- Pérez Gutiérrez, R. (2007), "Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuitlapa, Guerrero", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 59, no. 2, pp. 171-181.
- Pike, R. J. and R. Dikau (1995), "Advances in geomorphometry", *Z. Geomorphol.*, N. F. Suppl. Bd., no. 101, p. 238.
- Qiu, C., T. Esaki, M. Xie, Y. Mitani and C. Wang (2006), *A GIS System Development for Evaluating 3D Slope Stability*, ESRI –Professional Papers–, Retrieved January 1 [<http://gis.esri.com/library/userconf/proc05/abstracts/a1158.html>].
- Secretaría de Protección Civil (2010), *Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz*, en Mora González, I., W. Morales Barrera y S. Rodríguez Elizarraráz (comps.), Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, UNAM, 1V.
- Sheridan, M. F., G. Carrasco Núñez, B. E. Hubbard, C. Siebe and S. Rodríguez Elizarraráz (2001), *Mapa de peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)*, escala 1:250 000, Instituto de Geología, Universidad Autónoma de Puebla, UNAM, Gobierno del Estado de Veracruz, México.
- Strahler, A. N. (1957), *Dimensional analysis in geomorphology*, Of. Nav. Res. Proj. NR 389-042, Ted, Rep. 7, Dept. Geol., Columbia Univ., N. Y., 43.
- Tapia Varela, G. y J. López Blanco (2002), "Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México a escala 1:100 000", *Rev. Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, núm. 1, pp. 50-65.
- Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, (2006), *Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol*, version 2.0 [http://www.dnr.wa.gov/BusinessPermits/Topics/LandslideHazardZonation/Pages/fp_lhz_review.aspx].
- Wieczorek, G. F. (1984), "Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction", *Bulletin of the Association of Engineering Geology*, no. 21, pp. 337-342.
- Xie, M., T. Esaki, C. Qiu and C. Wang (2006), "Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis", *Computers & Geosciences*, vol. 33, no. 4-5, pp. 260-274.
- Zhou, G., T. Esaki, Y. Mitani, M. Xie and J. Mori (2003), "Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach", *Engineering Geology*, no. 68, pp. 373-386.