Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
ISSN (digital): 2448-7279 • DOI: dx.doi.org/10.14350/rig.58387 • ARTÍCULOS
Núm. 95 • Abril • 2018
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Evaluación de la eficiencia de predicción a deslizamientos usando un modelo cartográfico-hidrológico: caso de estudio Cuenca la Carbonera, flanco SE del Volcán Pico de Orizaba

Evaluation of landslide prediction efficiency using a cartographic-hydrological model: case study Cuenca la Carbonera, SE flank of the Pico de Orizaba Volcano

Gabriel Legorreta Paulín,* Rocío Marisol Alanís Anaya,** Lilia Arana Salinas*** y Fernando Aceves Quesada****

Recibido: 08/03/2017. Aprobado: 08/08/2017. Publicado en línea: 07/12/2017.

Resumen. En México hay una carencia de inventarios de deslizamientos (procesos gravitacionales, *landslide* en inglés) y de su modelado. Como resultado tampoco existe una evaluación de las ventajas y la desventaja de los modelos de susceptibilidad a deslizamientos. En este trabajo se lleva a cabo una evaluación exhaustiva de la eficiencia de los modelos de susceptibilidad a deslizamientos utilizando la tecnología SIG. Para ello se emplean diferentes técnicas de comparación (característica operativa del receptor, eficiencia del modelo, razón de momios y distintas precisiones del modelo obtenidas de una matriz de confusión) bajo el sistema LOGISNET y el programa estadístico SPSS. Los resultados permiten establecer las bondades y limitaciones de las técnicas de comparación empleadas para evaluar la predicción y eficiencia de los modelos. El área de estudio es la cuenca La Carbonera en el flanco SE del volcán Pico de Orizaba. En ella se realiza un inventario detallado de deslizamientos. Este inventario es el marco para la comparación cualitativa y cuantitativa de dos mapas de susceptibilidad creados con un modelo cartográfico-hidrológico (SINMAP). Estos mapas fueron elaborados usando datos geotécnicos específicos del área de estudio y pre-establecidos por el sistema, lo cual permite valorar su eficiencia de predicción con base en las técnicas de comparación. El modelo fue seleccionado por ser considerado en la literatura que su análisis tiene un éxito razonable en la definición de áreas que intuitivamente parecen ser susceptibles a deslizamientos en regiones con escasa información.

Palabras clave: SIG, evaluación de modelos, deslizamientos, volcán Pico de Orizaba, Cuenca La Carbonera.

Abstract. Worldwide, the areas prone to gravitational processes (landslides) have been identified through the application of landslide susceptibility models incorporated into a Geographic Information System (GIS). These models use a variety of deterministic, heuristic, probabilistic and statistical methods at local or regional levels. In all cases, the evaluation of the efficiency of the model to predict the gravitational processes is key to ensure their reliability in the land-use management and planning. To this end, the

* Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México. Email: legorretag@igg.unam.mx
** Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México. Email: ammonite@ciencias.unam.mx
*** Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México.
**** Departamento de Sociología, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.

susceptibility model should be compared with a detailed and accurate inventory of landslides. This research used the La Carbonera basin fluvial system, located in the southeast slope of the Pico de Orizaba volcano, Mexico, to evaluate the models and explain the comparison techniques. The study area has physiographic conditions that are susceptible to gravitational processes due to the combination of several factors, such as high rainfall during the rainy season, the intrinsic susceptibility of the existing types of rocks and deposits (poorly consolidated volcaniclastic deposits and weathered rocks, as well as folded and fractured sedimentary rocks), steep slopes and changes in land use. Within the study area, landslides and debris flows occur frequently. These two phenomena adversely affect human settlements and economic activities. In Mexico, there are few detailed maps on an inventory of landslides, geospatial databases of these processes, and susceptibility maps that could be used systematically to compare and contrast the limitations and advantages of the models for any region of the country. In addition, the evaluation of a model under natural conditions is a difficult issue due to the complexity of the natural and technical problems associated with it. The model performance may be compromised by natural issues such as the masking landslides by vegetation, the combination of several different types of landslides and processes, etc., in addition to technical issues including a poor DEM resolution, the sampling strategy selected, the collection and calculation of geotechnical parameters, the lack of a complete and detailed inventory, etc. The lack of a systematic comparison of the susceptibility models not only compromises the reliability of these models, but also leads to the abuse in their use. In order to alleviate some of these issues, this study built a detailed inventory of landslides based on two series of digital aerial photographs and field work. Landslides were digitized and incorporated into the GIS, and a geospatial database was developed for a better description. Field work and interpretation allowed the cartographic representation of 236 landslide processes. This inventory sets the framework for qualitative and quantitative comparisons, with two susceptibility maps created with a cartographic-hydrological model (SINMAP). SINMAP was selected because in the literature it is considered that its analysis is fairly successful in defining areas that intuitively seem to be susceptible to landslides in regions with scarce information.

With the landslide inventory and the cartographic-hydrological susceptibility model, this work provides a comprehensive assessment of different comparison techniques to highlight the advantages and limitations of each. To this end, the model was run using specific geotechnical data for the study area and predefined geotechnical data. Different comparison techniques (receiver operational feature, overall model accuracy, odds ratio and different precision values obtained from a confounding matrix) were used under the LOGISNET system and the SPSS statistical program. The results of this work set the advantages and limitations of the comparison techniques, as well as their use in the assessment of the model efficiency to predict landslides. The assessment showed that the overall precision and the odds ratio should be evaluated in parallel with other precisions (user and producer precision, and model efficiency), as their values are strongly influenced by the most common class, usually those pixels that represent "stable areas". The characteristic receiver operating curve (ROC) is a better technique for use in an overall assessment of models, and can be used even to define precise and objective cut-off levels to classify maps into "stable" and "unstable" areas. The ROC curve and the producer precision showed a greater predictive capacity for SINMAP using geotechnical data specific to the study area (70.8% and 67.26%, respectively) relative to SINMAP using predefined geotechnical data (34.4% and 38.46%, respectively). The low user precision value for both, i.e. SINMAP using specific geotechnical data and SINMAP using predefined geotechnical data, was further confirmed by its large negative value in the model efficiency test in areas with landslides, showing that models poorly predict landslide pixels. This is due to the fact that the model tends to be over-predictive. The fieldwork supports that the susceptibility map drawn based on SINMAP with specific geotechnical data is considerably better than the one from SINMAP model with geotechnical data predefined by the system. The areas with over-prediction can potentially be affected by future landslides, as these areas are located on or near existing landslides.

Key words: SIG, evaluation models, landslides, Pico de Orizaba volcano, La Carbonera watershed.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las áreas propensas a procesos gravitacionales (deslizamientos, *landslides* en inglés) se han identificado a través de modelos de susceptibilidad a deslizamientos incorporados en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Tales modelos emplean una variedad de métodos determinísticos, heurísticos, probabilísticos y estadísticos a escala local o regional (Hammond, Hall, Miller y Swetik, 1992; Montgomery y Dietrich, 1994; Pack, Tarboton y Goodwin, 1998; Zhou, Esaki, Mitani, Xie y Mori, 2003; Lee, 2005; Akgun, 2012; Raghuvanshi, Negassa y Kala, 2015; Bui *et al.*, 2016). En todos estos enfoques, la evaluación de la eficiencia del modelo para predecir deslizamientos es crucial a fin de asegurar su confiabilidad en la planeación y el ordenamiento territorial. Para lograrlo, el modelo de susceptibilidad se debe comparar con un mapa detallado y preciso de deslizamientos (Lee, 2005, Hervás y Bobrowsky, 2009; Raghuvanshi *et al.*, 2015). En México son pocos los mapas de inven-

tario, bases de datos geoespaciales y de modelado existentes en el país. Como resultado de lo anterior, no existe una comparación sistemática de los métodos en condiciones naturales y teóricas para delinear las ventajas y limitaciones de los modelos en cualquier región de México. La evaluación de los métodos se ve obstaculizada por la complejidad de los problemas naturales y técnicos concomitantes, tales como los cambios temporales en la ocurrencia de deslizamientos, el tipo de deslizamiento, la resolución del deslizamiento, el tamaño del píxel, la interpolación, la exactitud de los inventarios, las dificultades en la obtención parámetros geotécnicos del suelo, etc. La ausencia de esta comparación sistemática de los modelos de susceptibilidad no sólo compromete la fiabilidad de los modelos sino que también puede conducir al uso inadecuado de los mismos. Esto es especialmente cierto para validar un modelo en áreas naturales donde es escasa la información tanto de deslizamientos como de las condiciones que los ocasionan.

Con base en lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es mostrar la aplicación de estadísticas básicas en la evaluación de eficiencia de los modelos de predicción de deslizamientos y con ello proveer un método estandarizado que apoye a las autoridades gubernamentales y al público en general para el uso de modelos de deslizamientos.

Esta investigación utiliza al sistema fluvial de la cuenca del río La Carbonera, en el flanco sureste 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 local. Dentro del área de estudio, los deslizamientos (corrimiento y deslizamiento de masas de suelos y/o rocas producidos por la influencia directa de la gravedad sin la necesidad de un fluido; Cruden 1991; Lugo-Hubp, 2011, Hungr, Leroueil y Picarelli, 2014) y los flujos de escombros (mezcla de depósitos pobremente clasificados, es decir, de tamaños indistintos que se mueven por efecto de la gravedad y agua; Hungr, 2005; Lugo-Hubp, 2011, Takahashi, 2014) se producen continuamente a lo largo de la cuenca. Estos dos fenómenos afectan adversamente los asentamientos humanos y las actividades económicas; por ejemplo, en los años 2003 y 2011, en el valle inferior del río La Carbonera, por la coalescencia de pequeños deslizamientos los depósitos aumentaron el poder destructivo de los flujos de escombros resultando en la pérdida y destrucción de bienes materiales e infraestructura. A pesar de ello, aún no existen medidas preventivas ni tampoco inventarios y modelado de deslizamientos. Este estudio desarrolla un inventario detallado de procesos gravitacionales compilado con base en dos series de fotografías aéreas digitales y trabajo de campo.

Los procesos graviacionales fueron incorporados en el SIG, y una base de datos geoespacial se elaboró para una mejor descripción. El trabajo de campo y la fotointerpretación permitieron la representación cartográfica de 236 deslizamientos. Este análisis utiliza un enfoque cartográfico-hidrológico para modelar la susceptibilidad. El modelo cartográfico-hidrológico *Stability Index MAPping* (SINMAP) combina el Factor de Seguridad con la teoría de un modelo hidrológico, y fue seleccionado por ser considerado razonablemente exitoso en la definición de áreas que intuitivamente parecen ser susceptibles a deslizamientos, si el modelo es alimentado con parámetros geotécnicos calibrados y modelos de elevación digitales precisos (Wawer y Nowocień, 2003). Así mismo, para evaluaciones de reconocimiento de susceptibilidad, y en caso de no contarse con parámetros geotécnicos calibrados, se recomienda usar SINMAP con los parámetros predefinidos por el sistema (Pack *et al.,* 1998). En este estudio se elaboraron dos mapas de susceptibilidad para mostrar las ventajas y limitaciones del modelo. El modelo se evalúa usando: 1) parámetros predefinidos por el sistema, y (2) parámetros geotécnicos específicos de la zona de estudio. Tanto el inventario como los dos mapas de susceptibilidad son utilizados para presentar estrategias, así como comparar y contrastar las ventajas y limitaciones del modelo. Esta evaluación es llevada a cabo mediante el uso del sistema LOGISNET (Legorreta y Bursik, 2009) a través de sus superposiciones de SIG, histogramas y matrices de confusión. LOGISNET fue desarrollado mediante el uso de macros (AML) del sistema de información geográfica (SIG) ArcInfo

Workstation para comparar y contrastar los modelos de SINMAP y de Regresión Logística Múltiple. La evaluación también se realiza utilizando el área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) obtenida en el programa estadístico *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS). Se presentan y discuten las técnicas de comparación de los mapas de deslizamiento, así como la aplicación e implicaciones del modelado de susceptibilidad al área de estudio. Los resultados de este trabajo muestran las propiedades de sensibilidad o insensibilidad a los cambios en la distribución de clases de estabilidad, así como su utilización para detectar el exceso de predicción o la falta de predicción de los modelos de deslizamiento. Su aplicación permite establecer que, aunque el modelo tiende a mejorar con el uso de datos geotécnicos calibrados, el mapa de susceptibilidad a deslizamientos no representa perfectamente deslizamientos existentes.

ANTECEDENTES

Proyectos de zonación de la susceptibilidad a escala local o regional se han abordado mediante el modelado de la estabilidad, usando la integración de diversos métodos heurísticos, estadísticos y determinísticos en un SIG (Angeli, Pasuto, y Silvano, 2000; Dai, Lee y Ngai, 2002; Zhou *et al.,* 2003; Lee, 2005; Hervás y Bobrowsky, 2009; Blahut, van Westen y Sterlacchini 2010, Guzzetti *et al.,* 2012; Raghuvanshi *et al*., 2015). Su validación se lleva a cabo a nivel mundial mediante la compilación y comparación con inventarios detallados utilizando diversos métodos estadísticos, cada uno de los cuales tiene sus propias ventajas y limitaciones (Pack, Tarboton y Goodwin, 2001; Morrissey, Wieczorek y Morgan, 2001; Zaitchik, van Es y Sullivan., 2003; Lan *et al.,* 2004; Frattini, Crosta y Carrara, 2010; Guzzetti *et al.,* 2012; De Sy, Schoorl, Keesstra, Jones y Claessens 2013). La evaluación es especialmente difícil para los modelos diseñados para deslizamientos superficiales, debido a que sus dimensiones son pequeñas en comparación con otros tipos de deslizamientos (Can *et al.,* 2005). Los deslizamientos superficiales se definen por una superficie de falla de menos de tres metros de profundidad y se desarrollan por encima de la roca madre o de sedimentos (Washington State, DNR, 2006). SINMAP es uno de los modelos utilizados a nivel mundial para áreas con escasa información y afectadas por deslizamientos superficialess. El modelo combina el análisis del Factor de Seguridad (Hammond *et al.,* 1992) con un modelo hidrológico (Beven y Kirkby, 1979; O›Loughlin, 1986) para producir el mapa de susceptibilidad. Las aplicaciones de SINMAP van desde la planificación y el manejo forestal (Wawer y Nowocień, 2003) hasta el modelado de estabilidad de laderas (Witt, 2004; Lan *et al.,* 2004; Deb y El-Kadi, 2009). Se ha afirmado que el análisis del SINMAP es razonablemente exitoso en la definición de áreas que intuitivamente parecen ser susceptibles a deslizamientos. Para ello, el modelo tiene que ser provisto de parámetros geotécnicos calibrados y modelos de elevación digitales precisos (Wawer y Nowocień, 2003). Así, por ejemplo, se ha encontrado una subestimación de deslizamientos cuando no se usaron parámetros calibrados (Witt, 2004). Pero también se ha observado que, incluso con parámetros calibrados, el modelo puede fallar por sobre-predicción (Morrissey *et al.,* 2001; Witt, 2004). Algunos intentos para mejorar SINMAP han incluido su modificación para: a) aceptar parámetros geotécnicos ponderados y considerar multi-capas con diferentes propiedades geotécnicas (Legorreta y Bursik, 2009); b) permitir la variabilidad natural de las propiedades geotécnicas del suelo (Zaitchik *et al.,* 2003) y c) tomar en cuenta diferentes condiciones de precipitación (Lan *et al.,* 2004). Estas modificaciones mejoraron la predicción del modelo respecto al inventario de deslizamientos en un 61%, 75%, y 90% respectivamente. En México, durante la última década, ha habido una mejora significativa en los procedimientos de cartografía y modelado de deslizamientos mediante el uso de SIG y percepción remota (Pérez-Gutiérrez, 2007; Hubbard *et al.,* 2007; Secretaría de Protección Civil, 2010; Borja-Baeza y Alcántara-Ayala, 2014; González *et al.,* 2014; Legorreta *et al.,* 2016). Por ejemplo, en 2011 el Gobierno Federal, a través de la Secretaría de Desarrollo Social, publicó un atlas de riesgos naturales a nivel municipal basado en el uso del SIG (Secretaría de Protección Civil,

2010; Sedesol, 2011). En el estado de Puebla, el uso de SINMAP para modelar la susceptibilidad a deslizamientos fue evaluado cualitativamente frente a un inventario (Borja-Baeza y Alcántara-Ayala, 2014). En el volcán Pico de Orizaba, la mayor parte de la investigación se ha centrado en la historia volcánica para establecer la morfología del paisaje actual y el riesgo potencial de actividad volcánica, sus grandes y catastróficos colapsos de laderas e inundaciones por lahares (Carrasco-Núñez, Vallance y Rose, 1993; Carrasco-Núñez y Rose, 1995; Hubbard 2001; Sheridan *et al.,* 2001; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez, 2002; Macías, 2005; Hubbard *et al.,* 2007). A escala regional, en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba, se creó un mapa de inventario multi-temporal y mapas de susceptibilidad a deslizamientos para la cuenca de Barranca del Muerto-Río Chiquito. La cuenca es adyacente al área de estudio. El estudio utilizó la Regresión Logística Múltiple (RML) y SINMAP. El modelo RML predijo un 72.33% de las áreas de deslizamiento, mientras que el SINMAP, con valores derivados de la literatura y el trabajo de campo, fue capaz de predecir sólo el 45.39% (Legorreta *et al.,* 2013).

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río La Carbonera se encuentra ubicada a 18°58'45.78"-18°49'26.83" N y 97°15'34.62"-97°08'7.44" O, en el flanco sureste del volcán Pico de Orizaba, México (Figura 1a). El Pico de Orizaba es la montaña más alta de México (5675 msnm), situado en la sección oriental de la provincia volcánica llamada Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). El río La Carbonera es un afluente del río Blanco, que desemboca en el Golfo de México. La cuenca se encuentra en el estado Veracruz y cubre un área de 71.9 km^2, con un rango de elevación de 1224 a 1345 msnm. Los patrones de drenaje de la cuenca reflejan su relación con la pendiente y con la geología. La parte alta de la cuenca, donde predominan las rocas volcánicas, presenta una red fluvial paralela, característica de áreas de pie de monte donde las fuertes pendientes imponen la dirección del flujo de los escurrimientos. Algunos de los ríos secundarios reflejan también un control estructural (presencia de coladas de lava y/o fallas) al tener un patrón de drenaje rectangular. La parte media y baja de la cuenca, donde predominan las rocas sedimentarias, presentan un patrón de dendrítico y paralelo. El proceso es esencialmente de erosión. También en la cuenca, las pendientes de las laderas están controladas por el tipo de rocas volcánicas o sedimentarias existentes; así, por ejemplo, los escarpes de más de 45° consisten en coladas de lava. Laderas con pendiente fuerte, de entre 32 y 45° presentan intercalaciones de conglomerados cementados, aglomerados y depósitos de lahares. En las partes bajas de la cuenca, depósitos sedimentarios de calizas y lutitas, constituyen laderas de hasta 32°. Administrativamente, el área de estudio pertenece a los municipios de Ixhuatlancillo, La Perla, Maltrata, Mariano Escobedo, Nogales y Río Blanco.

El área de estudio es propensa a deslizamientos debido a la combinación de varios factores, tales como:

1) Alta precipitación durante la estación húmeda. En términos generales la mayor precipitación es debida a lluvia durante las tormentas de la temporada entre mayo y noviembre. El clima es semi-frío subtropical (Cb '(w)) a 3000-4400 msnm y subtropical templado, subhúmedo (C (w1), C (w2)) y C (m) (f) y tropical semi-cálido, húmedo (A) C (m) (f)) a <3000 msnm (García, 2004). La precipitación media anual es de 1000-1100 mm / año a> 4000 msnm y 927 mm / año a <1500 msnm (Palacios, Parrilla y Zamorano, 1999) (Figura 1b). Localmente solo existe una estación meteorológica en la cuenca y estuvo activa sólo de 2009 a 2013, con datos nulos en 2012. Sus registros muestran que los meses de mayor precipitación son de junio a septiembre, y alcanza su máximo registro en agosto con 10.7 mm promedio y un mínimo de 0.1 mm en diciembre (Tabla 1; CLICOM, 2014).
2) Alto grado de meteorización de rocas volcánicas y sedimentarias. El sistema fluvial del río La Carbonera erosiona un basamento Cretácico de caliza (con estratos de 20cm a 1m) y lutita

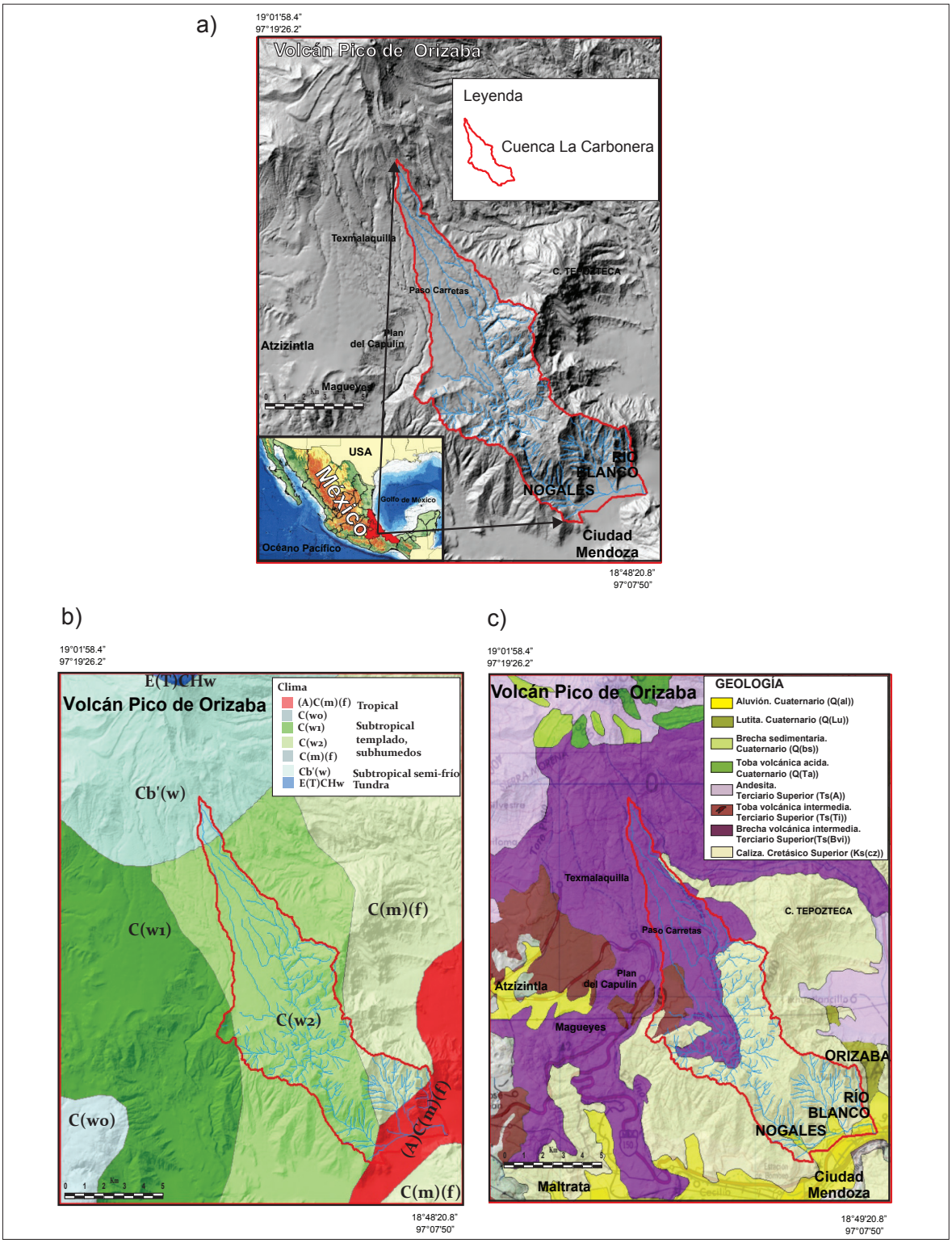

Figura 1. a) Localización, b) Clima, c) Geología del área de estudio.

Tabla 1. Temperatura y precipitación promedio mensual en la estación Loma Grande (CLICOM, 2014).

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitacion (mm)	0.45	0.45	0.15	1.23	2.01	6.29	10.3	10.7	9.09	1.18	0.29	0.1
Temperatura (°C)	12.2	13.01	14.1	15.6	15.5	14.4	14.2	14.6	14.3	13.5	12.3	12.7

(con estratos de 1 cm a 15 cm) fuertemente intemperizado, disectado y plegado (formando en algunas áreas anticlinales recumbentes con buzamientos de entre 45 y 60° hacia el SW). Las rocas sedimentarias cretácicas constituyen aproximadamente el 55.2% del área total de la cuenca y han sido cubiertas por lavas, flujos piroclásticos y depósitos de caída. Este basamento de rocas sedimentarias presenta planos orientados en dirección NW-SE y fracturamientos perpendiculares (NE-SW) que condicionan la red de drenaje en las calizas (Elizarráras *et al.,* 2011). Las rocas y depósitos volcánicos (compuestos de conjuntos de unidades de flujos piroclásticos no consolidados y de composición homogénea) terciarios y cuaternarios cubren el 40.8% y el aluvión Cuaternario el 4% (Figura 1c).

3) Laderas de gran disección vertical y fuerte pendiente. La cuenca presenta una disección vertical importante. Los valores de disección vertical por km^2 en la zona varían entre 300 y 400 m, siendo en su curso bajo y medio donde presenta algunos de los valores más altos. Las pendientes oscilan entre <5° (valles o llanuras relativamente planas) y 61° (terrenos montañosos).

METODOLOGÍA

Los deslizamientos se identificaron mediante trabajo de campo y la fotointerpretación de dos series de fotos aéreas para crear un mapa de inventario de deslizamientos (Figura 3a). Las fotografías aéreas cubren un período de 14 años, a partir de 1994, a escala de 1:20 000 al 2008 a escala de 1:10 000. El trabajo de campo se llevó a cabo durante diferentes períodos al año, desde 2013 hasta 2015, a lo largo del río principal y en algunos tributarios. Deslizamientos superficiales se cartografiaron en campo y en gabinete de acuerdo con los criterios de la División de Prácticas Forestales del estado de Washington (Washington State, DNR, 2006). Estos criterios simplifican el sistema de Cruden y Varnes (1996) y Wieczorek (1984) al listar sólo la clasificación primaria de un deslizamiento determinado. Todos los deslizamientos superficiales fueron digitalizados en el SIG de ArcGIS, y se construyó la base de datos geoespacial de los mismos. Los atributos de localización, geotecnia, tamaños, y tipos de los deslizamientos se colectaron en el SIG. La digitalización de los deslizamientos se llevó a cabo de manera directa en pantalla. A cada deslizamiento se le dividió en tres partes (cabecera, área de evacuación y depósito), cuando estas eran existentes en las fotografías aéreas o en el campo. Para el modelado susceptibilidad y su análisis de eficiencia, sólo se consideraron las cabeceras de los deslizamientos superficiales. La cantidad de verificación de campo fue del 15% de todos los deslizamientos. El trabajo de campo y la fotointerpretación permitieron la representación cartográfica de 236 deslizamientos superficiales.

El modelado de la susceptibilidad a deslizamientos en las laderas fue hecho con SINMAP. El modelo combina la teoría del Factor de Seguridad del modelo de estabilidad de pendiente infinita con un modelo hidrológico para predecir potenciales áreas de deslizamiento superficiales (Montgomery y Dietrich, 1994; Pack *et al.,* 2001). El modelo usa datos topográficos (pendiente, área de captación y dirección de flujo agua superficial), hidrográficos (transmisividad del suelo, precipitación total) y variables del suelo (densidad, ángulo de fricción interna y cohesión). Estos datos provienen de la capa de suelo inestable dentro de la cabecera para producir un índice de estabilidad (SI) (Pack *et al.,* 2001). Este índice expresa la estabilidad del terreno utilizando seis clases subjetivas: de 0 > SI ("ines-

table"); 0.5 > SI > 0.0 ("del umbral más alto de estabilidad"); 1.0 > SI > 0.5 ("del umbral más bajo de estabilidad"); 1.25 > SI > 1.0 ("casi estable"); 1.5 > SI > 1.25 ("moderadamente estable"), y SI > 1.5 ("estable") (Pack *et al.,* 1998, 2001). Las propiedades geotécnicas requeridas para correr el modelo y generar dos escenarios se establecieron con base en 1) valores geotécnicos pre-establecidos por el sistema (aquí referido como $SINMAP_{CarbDef}$) y 2) valores geotécnicos específicos del área de estudio (aquí referido como $SINMAP_{CarbGeoPar}$) (Tabla 2).

Para evaluar el desempeño de los mapas de susceptibilidad creados con SINMAP, se realizó un análisis cualitativo (visualmente) y cuantitativo por medio de su comparación con el inventario de deslizamientos. La comparación se realizó mediante el uso de superposiciones en el SIG y matrices de confusión bajo el sistema LOGISNET (Legorreta y Bursik, 2009) y el área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) obtenida en el programa estadístico SPSS. La superposición visual resultante de los modelos y el inventario de deslizamiento en el SIG se llevó a cabo para permitir, con base en el conocimiento del investigador y de la evidencia empírica, describir si los modelos tuvieron similares resultados o no, si hubo cambio en los patrones de predicción del modelo, y si estos reflejan las condiciones topográficas más que la geomorfología de los deslizamientos. A fin de facilitar la comparación numérica entre el inventario y los modelos se utilizó un esquema de dos clasificaciones ("con-deslizamiento" y "sin-deslizamiento") tanto para el inventario como para los dos mapas de susceptibilidad de SINMAP. Las seis clases del SI se clasificaron en: área "con-deslizamiento", que incluye las clases inestable, de umbral más alto y de umbral más bajo de inestabilidad, y área "sin-deslizamientos", que incluye las clases estable, moderadamente estable y casi estable. La superposición numérica sirvió para calcular la precisión y la eficiencia de los modelos mediante el uso de la matriz de confusión (Tabla 3).

Las precisiones obtenidas de esta tabla fueron:

1) La precisión global (*Overall Accuracy*), que representa la razón entre el número de pixeles clasificados correctamente en todas las categorías y el número total de pixeles (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2014). Por ejemplo, en la Tabla 3, $SINMAP_{CarbDef}$ tiene una precisión global de 72.26% ((370 + 518 907 pixeles) / 718 656 pixeles *100).
2) La precisión del producto (*Produce's accuracy*), que representa la razón entre el número de pixeles clasificados correctamente en cada categoría y el número total de pixeles verdaderos para esa categoría (Lilllesand *et al.,* 2014). Por ejemplo, en la Tabla 3, $SINMAP_{CarbDef}$ tiene una precisión del producto en áreas "con-deslizamientos" de 38.46% (370 pixeles / 962 pixeles * 100).
3) La precisión del usuario (*User's accuracy*), calculada como la razón entre el número de pixeles correctamente clasificados en cada categoría y el número total de pixeles que están clasificados por el modelo en esa categoría (Lilllesand *et al.,* 2014). Por ejemplo, en la Tabla 3, $SINMAP_{CarbDef}$ tiene una precisión

Tabla 2. Parámetros geotécnicos usados en SINMAP.

	$SINMAP_{CarbDef}$	$SINMAP_{CarbGeoPar}$
MDE	10 m	10 m
Capa del suelo (m)	1	1
Gravedad (m/s^2)	9.81	9.81
Densidad del agua (kg/m^3)	1000	1000
Densidad del suelo (kg/m^3)	2000	1575
*T/R Min (m)	2000	142.3
*T/R Max (m)	3000	246.2
Cohesión Min (sin unidades**)	0	0
Cohesión Max (sin unidades**)	0.25	0.23
Phi Min (°)	35	29.6
Phi Max (°)	45	36.4

* T es la transmisividad del suelo y R es la lluvia total.
** SINMAP requieren un factor de cohesión sin dimensión como entrada, que se obtiene dividiendo la cohesión (Pa) por la gravedad (m / s2), la densidad del suelo (kg / m3) y el espesor del suelo (m).

Tabla 3. Matriz de confusión entre el inventario de deslizamientos y el modelo $SINMAP_{CarbDef}$.

	Inventario "Con-deslizamientos" (1)	Inventario "Sin-deslizamientos" (0)	Total pixeles
Modelo SINMAPCarbDef "Con-deslizamientos" (1)	370	198 ∫787	199 157
SINMAPCarbDef "Sin-deslizamientos" (0)	592	518 907	519 499
Total	962	717 694	718 656

del usuario en áreas "con-deslizamientos" de 0.19% (370 pixeles / 198787 pixeles * 100).

Todas estas presiones tienen un valor máximo de 1 o 100% c uando un modelo ha predicho todo correctamente (Lilllesand *et al.,* 2014).

4) Razón de momios (*Odd ratio*), que representa la razón entre el producto del número de pixeles clasificados correctamente en cada categoría y el producto del número de pixeles clasificados incorrectamente en cada categoría. Esta precisión tiene un valor mayor a 0 cuando un modelo ha predicho correctamente, pero no puede ser usado si alguna de las categorías tiene valor de cero (Stephenson, 2000). Por ejemplo, en la Tabla 3, $SINMAP_{CarbDef}$ tiene una razón de momios es de 1.63 (370 * 518907 pixeles / 592 * 198 787 pixeles).
5) Razón de momios con habilidad de puntaje (*Odd ratio skill score*), que representa la razón entre el producto del número de pixeles clasificados correctamente en cada categoría menos el producto del número de pixeles clasificados incorrectamente en cada categoría y el producto del número de pixeles clasificados correctamente en cada categoría más el producto del número de pixeles clasificados incorrectamente en cada categoría. Esta razón tiene un valor máximo de 1 o 100% cuando un modelo ha predicho todo correctamente y de -1 cuando un modelo ha predicho todo incorrectamente (Yule, 1900). Por ejemplo, en la Tabla 3, $SINMAP_{CarbDef}$ tiene una razón de nomios es de 0.24 ((370 * 518 907 pixeles) - (592 * 198 787 pixeles) / (370 * 518 907 pixeles) + (592 * 198 787 pixeles)).
6) La eficiencia del modelo (*Model efficiency*), calculado como la razón del número de pixeles indicados correctamente como pixeles de deslizamiento, menos el número de pixeles indicados incorrectamente como pixeles de deslizamiento, entre el número total de los pixeles que representan verdaderos deslizamientos en el inventario correspondiente. Por ejemplo, en la Tabla 3, $SINMAP_{CarbDef}$ tiene una eficiencia del modelo de -206.25 ((370 - (199157 - 370)) / 962). La eficiencia del modelo tiene un valor máximo de 1 cuando el modelo ha indicado todos los deslizamientos correctamente, y tiene un valor negativo cuando el número de deslizamientos incorrectamente indicados por el modelo es mayor que el número de deslizamientos correctamente predicho (Van Den Eeckhaut *et al.,* 2005).

El área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) se calculó usando el programa SPSS, para lo cual se consideraron todos los pixeles del área de estudio, asignando a todos los deslizamientos como positivos y el resto como negativos. El área bajo la curva se define trazando en un gráfico bidimensional pares de sensibilidad (razón de pixeles positivos verdaderos) y especificidad (razón de pixeles falsos positivos) (Figura 2). La razón de pixeles positivos verdaderos es el número de pixeles correctamente clasificados en la categoría de deslizamiento dividido por el número total de pixeles de deslizamiento real y la razón de pixeles falsos positivos es el número de pixeles clasificados incorrectamente de la categoría "sin-deslizamiento" dividido por el número total de pixeles reales "sin-deslizamiento" (Yesilnacar y Topal, 2005; Lee,

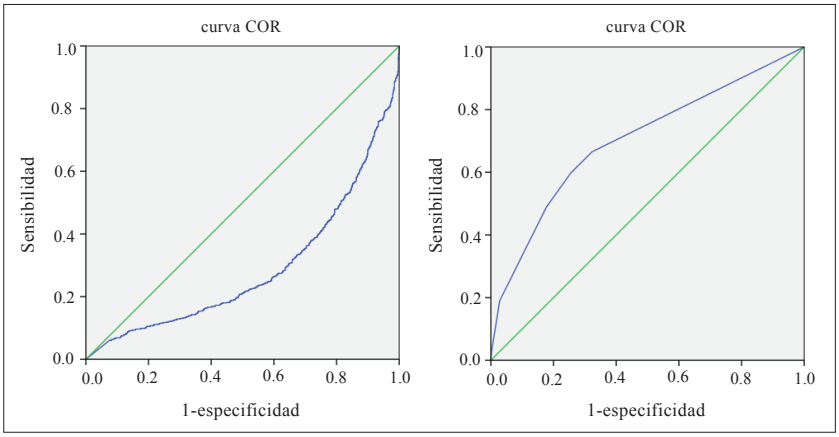

Figura 2. área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) para los modelos SINMAP$_{CarbDef}$ y SINMAP$_{CarbGeoPar}$.

2005; Fawcett, 2006; Namdi y Shakoor, 2010; Günther, Van Den Eeckhaut, Malet, Reichenbach y Hervás, 2014). Si el modelo es perfecto, el área bajo curva gráfica tiene un valor de 100%, mientras que un valor cercano al 50% indica inexactitud en el modelo (Fawcett, 2006; Nandi y Shakoor, 2010; Günther *et al.,* 2014).

RESULTADOS

Durante la evaluación de la cuenca del río La Carbonera (Figura 3a) se realizó un inventario de una muestra representativa de 236 deslizamientos superficiales que cubren 0.094 km^2. 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 está en rocas sedimentarias y depósitos. El inventario también muestra que los deslizamientos superficiales (incluyendo deslizamientos de escombros y flujos de escombros) son el tipo predominante (95%), seguido de deslizamientos de asentamiento profundo (3%) y caídas de roca (2%). Los deslizamientos superficiales no son frecuentes en la parte alta de la cuenca debido a la presencia de flujos de lava. En la parte media y baja de la cuenca los deslizamientos superficiales y los de asentamiento profundo son los procesos predominantes a lo largo de los valles. Estos deslizamientos superficiales se presentan de manera episódica pero continua en la cuenca. Una vez deslizado el material (cuyos volúmenes van de 10 m^3 a 2000 m^3), el deslizamiento tiende en algunos casos a estabilizarse temporalmente y a ser rellenado nuevamente con coluvión.

Con el inventario de deslizamientos como marco de referencia, los mapas de susceptibilidad fueron validados. Cualitativamente, los modelos muestran una alta inestabilidad a lo largo de las zonas montañosas volcánicas y a lo largo de las paredes del valle donde existen fuertes pendientes (Figura 3b y 3c). La coincidencia entre el inventario de deslizamientos y la predicción de los modelos no es perfecta, y claramente existen predicciones excesivas en ambos modelos. Sin embargo, el modelo con datos geotécnicos calibrados sobre-predice un poco mejor las áreas que tienen el potencial a deslizarse, como se observó durante el trabajo de campo.

Cuantitativamente, las técnicas de comparación permitieron evaluar la predicción y eficiencia del modelo cartográfico-hidrológico (Tabla 4). El COR indica una mayor capacidad predictiva para SINMAP con datos de calibración geotécnica (70.8%) y una pobre capacidad de predicción mediante el uso de parámetros predefinidos por el sistema (34.4 %). La alta precisión global de SINMAP$_{CarfDef}$ (72.26%) en comparación con SINMAP$_{CarbGeoPar}$ (42.26%) se explica por el hecho de que la precisión global pondera más la categoría más predominante, en este caso la clase de "sin-deslizamientos". Lo mismo ocurre con las razones de momios, quienes son fuertemente influenciadas por la clase más predominante. Por

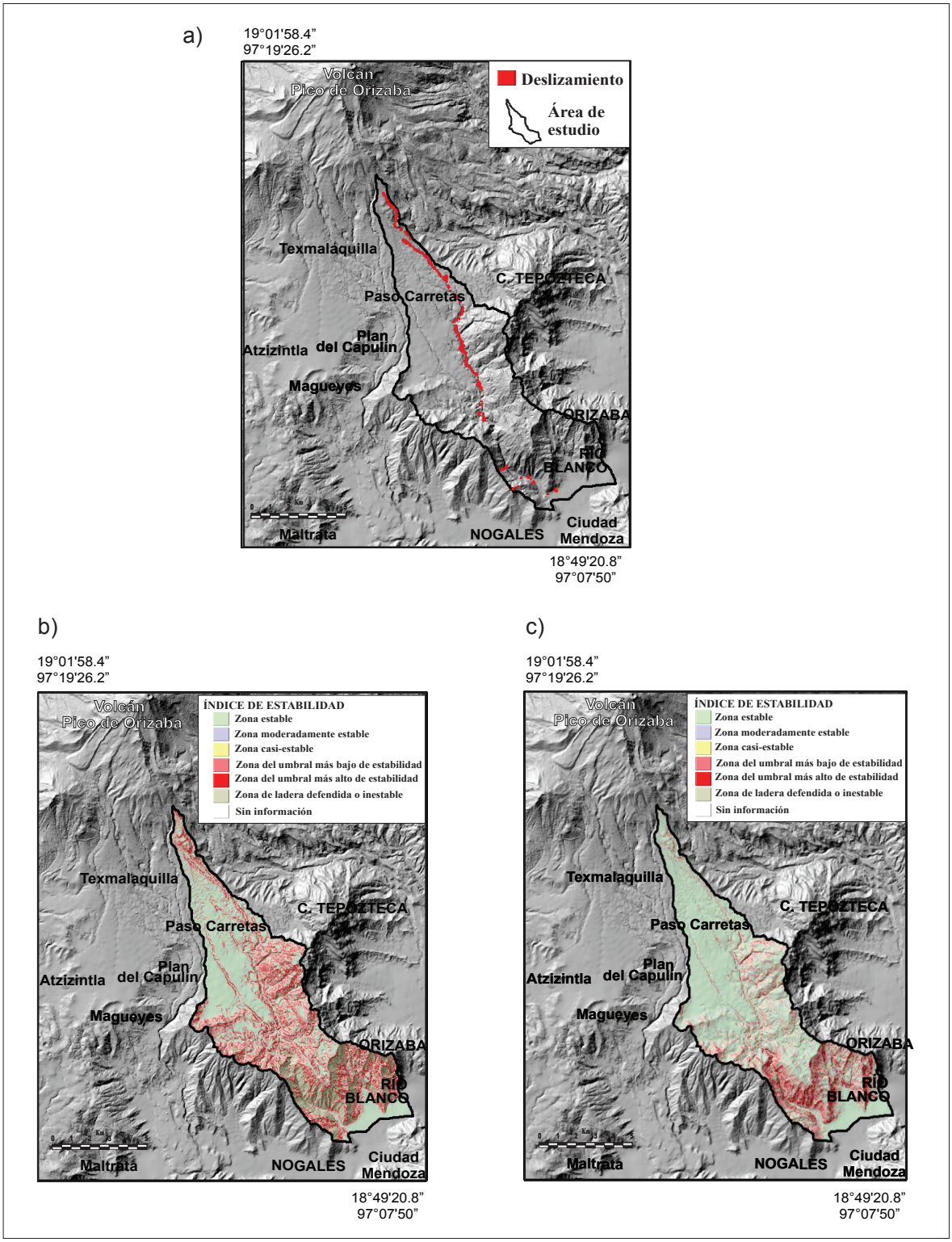

Figure 3. a) Inventario de deslizamientos, b) $SINMAP_{CarbDef}$, c) $SINMAP_{CarbGeoPar}$.

Tabla 4. Estadísticas de comparación entre modelos.

	$SINMAP_{CarfDef}$	$SINMAP_{CarbGeoPar}$
Área bajo la curva COR	34.4%	70.8%
Precisión global	72.26%	42.26%
	Landslide area	Landslide area
Precisión del producto	38.46%	67.26%
Precisión del usuario	0.19%	0.16%
Eficiencia del modelo	-206.25	-403.37
Razón de momios	1.6	1.5
Razón de momios con habilidad de puntaje	0.24	0.20

su parte, la precisión del producto muestra que la predicción de $SINMAP_{CarbGeoPar}$ tiene una mejor coincidencia (67.26%) con el mapa de inventario a deslizamientos en comparación con $SINMAP_{CarfDef}$ (38.46%). En otras palabras, si supiera que un área en particular está afectada por deslizamientos (y se ha verificado en campo), la probabilidad de que el modelo identifique correctamente ese pixel como deslizamientos sería del 67.26% y del 38.46% usando $SINMAP_{CarbGeoPar}$ y $SINMAP_{CarfDef}$, respectivamente. Esta "buena concordancia" de SINMAP con el modelo de inventario de datos geotécnicos se debe a una mayor sobre-predicción. La sobre-predicción conduce a que más áreas "sin-deslizamientos" se clasifiquen incorrectamente como deslizamientos superficiales en el modelo. Ambos modelos sobre-predicen, como se muestra por su bajo porcentaje de precisión del usuario y valores negativos en la eficiencia del modelo.

CONCLUSIONES

Los deslizamientos a lo largo de las zonas volcánicas son uno de los mayores riesgos en México; sin embargo, la falta de inventarios de deslizamientos limita tanto su modelado como la posibilidad de evaluación sus ventajas y limitaciones. En este artículo se presentan algunas de las técnicas más comunes para la evaluación de la eficiencia de modelos de susceptibilidad. En la comparación se usó el modelo cartográfico-hidrológico SINMAP utilizando datos geotécnicos predefinidos por el sistema y datos geotécnicos específicos de la zona de estudio. Las ventajas y limitaciones fueron evaluadas a través de la comparación visual de deslizamientos existentes y en términos de estadísticas de precisiones, momios y curvas COR. Tanto la precisión global como los momios deben ser evaluadas en paralelo con otras precisiones a lo largo de las áreas de deslizamiento, porque sus valores están fuertemente influenciados por la clase más común, usualmente los pixeles que representan las "zonas estables". La limitación de estas técnicas se verá generalmente reflejada siempre en la evaluación de modelos de susceptibilidad pues el inventario de deslizamientos siempre tendrá un área cartográfica más pequeña de deslizamientos en relación con toda el área de estudio. Por su parte la curva COR es una mejor técnica para usarse en la evaluación global de los modelos e incluso puede usarse para definir puntos precisos y no subjetivos de corte para clasificar los mapas en áreas estables e inestables. Esto se logra a través de los pares de sensibilidad y especificidad que cubran una mayor área dentro de la curva. Sin embargo, la curva COR no permite concluir si un modelo tiende a sobre-predecir o sub-predecir. Para esto se usan la precisión del producto y del usuario así como la eficiencia del modelo. Así, por ejemplo, usar el modelo con datos geotécnicos calibrados permite tener una probabilidad de predicción del 67.26%, como lo indica la precisión del producto. Sin embargo, el modelo tiende a sobre-predecir, como lo muestra el bajo porcentaje de precisión del usuario, pues tan sólo se tendría 16% de probabilidad de que si se seleccionara un pixel del modelo que representa un área inestable dicha área resulte realmente un deslizamiento. La sobre-predicción en el modelo calibrado no significa que funcione de manera incorrecta. El exceso de predicción de las zonas de deslizamientos se puede justificar porque los

modelos son, de hecho, solo una guía para evaluar las áreas con alta susceptibilidad a deslizarse. Estos resultados están en concordancia con evaluaciones similares de SINMAP en la literatura. En esta investigación la sobre-predicción se prefiere porque representa áreas potenciales de deslizamiento futuros. A futuro la investigación considerará la evaluación de modelos no físicos, sino estadísticos y heurísticos para la inclusión de otras variables temáticas y de técnicas de comparación, así como el modelado de otros tipos de deslizamientos. Este estudio es un prototipo para desarrollar una metodología de comparación sistemática de la eficiencia de los modelos de deslizamiento. Por lo tanto, está sujeto a adaptación, modificación y mejora con una mayor validación de campo y una mejor cartografía. A pesar de sus limitaciones, la comparación permite destacar las ventajas y / o limitaciones tanto de los modelos como de las técnicas.

AGRADECIMIENTOS

This research was supported by the program PAPIIT # IN102115, and the International Programme on Landslides (IPL project # 187).

REFERENCIAS

Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides, 9*(1), 93-106.

Angeli, M. G., Pasuto, A. y Silvano, S. (2000). A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology, 55*(3), 133-147.

Blahut, J., van Westen, C. J. y Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, *119*(1), 36-51.

Beven, K. J. y Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/ Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal, 24*(1), 43-69.

Borja Baeza, R. C. y Alcántara Ayala, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones geográficas, 53*, 7-26.

Bui, D. T., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B. y Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides, 13*(2), 361-378.

Can, T., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. y Duman, T. Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology, 72*(1), 250-271.

Carrasco-Núñez, G., Vallance, J. W. y Rose, W. I. (1993). A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 59*(1-2), 35-46.

Carrasco-Núñez, G. y Rose, W. I. (1995). Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5–9.0 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 69*(3-4), 197-215.

CLICOM. 2014. Base de datos climatológica nacional. Recuperado e http://clicom-mex.cicese.mx/

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 43*(1), 27-29.

Cruden, D. M. y Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. En A. K Turnery y R. L. Schuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75), Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council.

Dai, F. C., Lee, C. F. y Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology, 64*(1), 65-87.

De la Cruz-Reyna, S. y Carrasco-Núñez, G. (2002). Probabilistic hazard analysis of Citlaltepetl (Pico de Orizaba) volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 113*(1), 307-318.

Deb, S. K. y El-Kadi, A. I. (2009). Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events. *Geomorphology, 108*(3), 219-233.

De Sy, V., Schoorl, J. M., Keesstra, S. D., Jones, K. E. y Claessens, L. (2013). Landslide model performance in a high resolution small-scale landscape. *Geomorphology, 190*, 73-81.

Elizarrarás, S. R. R. (Coord.). (2011). *Peligros geológicos más frecuentes en el Estado de Veracruz*. Veracruz: Universidad Veracruzana.

Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters, 27*, 861–874.

Frattini, P., Crosta, G. y Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology, 111*(1), 62-72.

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climatic de Köppen*. Serie Libros #6. México: Instituto de Geografía, UNAM.

González, A. O. O., Jiménez, D. M., Garcia, I. N. A., Nicieza, C. G. y Vigil, A. E. Á. (2014). Hillside instability in the Tijuana metropolitan area. Analysis of landslide-provoked building collapse. *Engineering Failure Analysis, 46*, 166-178.

Günther, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J. P., Reichenbach P. y Hervás, J. (2014). Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. *Geomorphology 224*, 69-85.

Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. y Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews, 112*(1), 42-66.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S. y Swetik, P. (1992). Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0. General technical report INT; 285.

Hervás, J. y Bobrowsky, P. (2009). Mapping: inventories, susceptibility, hazard and risk. In *Landslides–Disaster Risk Reduction* (pp. 321-349). Springer Berlin Heidelberg.

Hubbard, B. E. (2001). *Volcanic hazards mapping using aircraft, satellite, and digital topographic data: Pico de Orizaba (Citlaltépetl). Mexico*. Tesis de doctorado. Buffalo: State University of New York (SUNY).

Hubbard, B. E., Sheridan, M. F., Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R. y Rodríguez, S. R. (2007). Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 digital topographic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 160*(1), 99-124.

Hungr, O. (2005). Classification and terminology. En *Debris-flow hazards and related phenomena* (pp. 9-23). Springer Berlin Heidelberg.

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides, 11*(2), 167-194.

Lan, H. X., Zhou, C. H., Wang, L. J., Zhang, H. Y. y Li, R. H. (2004). Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology, 76*(1), 109-128.

Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing, 26*(7), 1477-1491.

Legorreta, P. G. y Bursik, M. (2009). Logisnet: A tool for multimethod, multiple soil layers slope stability analysis. *Computers & Geosciences, 35*(5), 1007-1016.

Legorreta, P. G., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M. T., Contreras, T., Polenz, M., Hubp, J. L. y Salinas, L. A. (2013). Landslide inventory mapping and landslide susceptibility modeling assessment on the SW flank of Pico de Orizaba volcano, Puebla-Veracruz, Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie, 57*(3), 371-385.

Legorreta, P. G., Pouget, S., Bursik, M., Quesada, F. A. y Contreras, T. (2016). Comparing landslide susceptibility models in the Río El Estado watershed on the SW flank of Pico de Orizaba volcano, Mexico. *Natural Hazards, 80*(1), 127-139.

Lillesand, T., Kiefer, R. W. y Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.

Lugo-Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57*(3), 379-424.

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

Morrissey, M. M., Wieczorek, G. F. y Morgan, B. A. (2001). A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in Madison County, Virginia. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Nandi, A. y Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology, 110*(1), 11-20.

O'Loughlin, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research, 22*(5), 794-804.

Pack, R. T., Tarboton, D. G. y Goodwin, C. N. (1998, September). The SINMAP approach to terrain stability mapping. En *8th congress of the international association of engineering geology*. Vancouver, Columbia Británica, Canadá.

Pack, R. T., Tarboton, D. G. y Goodwin, C. N. (2001). Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP. En *15th annual GIS conference*, *GIS 2001*.

Palacios, D., Parrilla, G. y Zamorano, J. J. (1999). Paraglacial and postglacial debris flows on a Little Ice Age terminal moraine: Jamapa Glacier, Pico de Orizaba (Mexico). *Geomorphology, 28*(1), 95-118.

Pérez-Gutiérrez, R. (2007). Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuitlapa, Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59*(2), 171-181.

Raghuvanshi, T. K., Negassa, L. y Kala, P. M. (2015). GIS based Grid overlay method versus modeling approach–A comparative study for landslide hazard zonation (LHZ) in Meta Robi District of West Showa Zone in Ethiopia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 18*(2), 235-250.

Secretaría de Protección Civil. (2010). Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz. Ignacio Mora González; Wendy Morales Barrera, Sergio Rodríguez Elizarrarás (Comps.). Xalapa: Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz, Universidad Veracruzana.

Sedesol. (2011). *Atlas de Riesgos (o peligros) Naturales del Municipio de Nogales, Veracruz 2011*. Municipio de Nogales, Veracruz.

Stephenson, D. B. (2000). Use of the "odds ratio" for diagnosing forecast skill. *Weather and Forecasting, 15*(2), 221-232.

Sheridan, M. F., Carrasco-Nuñez, G., Hubbard, B. E., Siebe, C. y Rodríguez, S. (2001). Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba), 1(250,000). México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Takahashi, T. (2014). *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*. CRC Press.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Moeyersons, J., Nyssen, J. y Van Beek, L. P. H. (2005). The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides. *Geomorphology, 67*(3), 351-363.

Wawer, R. y Nowocień, E. (2003). Application of SINMAP terrain stability model in Grodarz stream watershed. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 6*(1).

Washington State, Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division. (2006). Landslide Hazard Zonation (LHZ), Mapping Protocol, version 2.1. http://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/forest-practices.

Wieczorek, G. F. (1984). Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 21*, 337–342.

Witt, A. C. (2004). Using a geographic information system (GIS) to model slope instability and debris flow hazards in the French Broad River Watershed, North Carolina. En *Geological Society of America Abstracts with Programs, 36*(2), 119.

Yesilnacar, E. y Topal, T. (2005). Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology, 79*(3-4), 251-266.

Yule, G. U. (1900). On the association of attributes in statistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London 194A*, 257–319.

Zaitchik, B. F., van Es, H. M. y Sullivan, P. J. (2003). Modeling Slope Stability in Honduras. *Soil Science Society of America Journal, 67*(1), 268-278.

Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M., & Mori, J. (2003). Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology, 68*(3), 373-386.