

Susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca

Geomorphological Susceptibility to Gravitational Processes in Secondary Streams in Southern La Ciénega watershed, Nevado de Toluca volcano

Sandra García Reyes,* Gabriel Legorreta Paulín** y Fernando Aceves Quesada***

Recibido: 25/12/2017. Aprobado: 19/01/2018. Publicado en línea: 00/06/2018.

Resumen. Los procesos gravitacionales son fenómenos geomorfológicos resultado de la dinámica y transformación del planeta Tierra. Tales fenómenos han desencadenado una serie de grandes desastres económicos y sociales que han aumentado en las últimas décadas. Para mitigar estos problemas, es necesario establecer las causas, los patrones espaciales y los factores que los producen.

En México se han presentado gran cantidad de procesos gravitacionales en los años recientes, muchos de ellos en el Eje Volcánico Transmexicano (EVT). Estos fenómenos han sido abordados mediante la compilación de inventarios históricos o multitemporales, con el uso de la integración de diversos métodos heurísticos, estadísticos y determinísticos para producir mapas de susceptibilidad a procesos gravitacionales. Sin embargo, hay pocos estudios geomorfológicos que relacionan el área y la frecuencia de estos procesos, así como su afectación en las geoformas.

La presente investigación se basa en estudios del sistema de arroyos de la cuenca La Ciénega en el flanco oriental del volcán Nevado de Toluca, México. Las condiciones climáticas, topográficas y geológicas predisponen el área de estudio a procesos gravitacionales y flujos de escombros que crean una situación peligrosa para las personas que viven a lo largo de las márgenes de los arroyos. Por ejemplo, en

1940, las precipitaciones inusuales provocaron procesos gravitacionales en la cuenca La Ciénega. Los sedimentos de los procesos aumentaron el poder destructivo de un flujo de escombros que causó pérdidas de vidas y bienes en el pueblo de Santa Cruz, perteneciente al municipio de Tenango del Valle, Estado de México. Como resultado de este evento, los habitantes reconstruyeron el pueblo que actualmente se llama Santa Cruz Pueblo Nuevo, sin embargo, esta reubicación se llevó a cabo en la parte baja de la cuenca sobre un abanico aluvial, sin una adecuada planificación, lo que hace a esta zona propensa a nuevos y futuros procesos gravitacionales y flujos de escombros. A pesar de su importancia, existe una carencia de inventarios que ayuden a evaluar la susceptibilidad a procesos gravitacionales en la cuenca.

Los dos arroyos secundarios se localizan en la porción sur de la cuenca La Ciénega. Estos arroyos se denominan La Cieneguilla 1 (ASC1) y La Cieneguilla 2 (ASC2). En ambos afluentes del arroyo principal La Ciénega se realizó un inventario detallado de procesos gravitacionales y un mapa geomorfológico para determinar la susceptibilidad en las formas del relieve.

La metodología abarca cuatro etapas principales de análisis para evaluar la susceptibilidad a procesos gravitacionales. Durante la primera etapa se recogió información de antecede-

* Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México. Email: garcigeograf@gmail.com

** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México. Email: legorretag@hotmail.com

*** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México. Email: acevesquesada.fernando@gmail.com

dentos para proporcionar una caracterización generalizada de los procesos dentro de la cuenca. En la segunda se creó un único mapa histórico del inventario, esto fue con ayuda de imágenes de satélite de diferentes tiempos y trabajo de campo. Para la clasificación de los procesos gravitacionales se utilizó el Protocolo de Zonificación de Peligro por Procesos Gravitacionales (LHZ, por sus siglas en inglés), realizado por el Washington State Department of Natural Resources (DNR) de Estados Unidos de América en 2006, en donde se identificaron seis tipos de procesos. Fueron cartografiados y documentados en el SIG 179 procesos gravitacionales. En la tercera etapa se obtuvo un mapa geomorfológico por interpretación de un Modelo Digital de Elevación (MDE), datos geológicos y mapas morfométricos, con el fin de obtener las geoformas relevantes de la cuenca. Además, se estableció la frecuencia y el área de procesos para las geoformas. En la cuarta etapa se obtuvo la susceptibilidad a procesos gravitacionales por geoforma mediante el uso de la frecuencia y el área del proceso. Este método sigue y adapta el Protocolo de Riesgo por Procesos Gravitacionales del citado DNR.

Abstract. Landslides are geomorphological processes that occur in the earth's relief all the time and are caused by natural and man-made factors. Such phenomena have unleashed a series of major economic and social disasters. To mitigate these problems, it is necessary to establish the causes, the spatial patterns, and the factors that produce this gravitational phenomenon.

In Mexico, a large number of landslides have occurred in recent years, many of them in the Trans-Mexican Volcanic Belt. This gravitational phenomenon has been addressed through the compilation of historical or multitemporal landslide inventories and by using the integration of diverse heuristic, statistical, and deterministic methods to produce landslide susceptibility maps. However, there are few geomorphological studies that relate the area and the frequency with which landslides affect the susceptibility of landforms.

The present research is based on studies of the stream system of the Río La Ciénega watershed on the eastern flank of Nevado de Toluca volcano, Mexico. The climatic, topographic, and geological conditions predispose the study area to episodic landslides and debris flows that creates a hazardous situation for people living along the stream system. For example, in 1940 rainfalls triggered landslides on the up-stream of La Ciénega watershed. The landslide sediments increased the destructive power of a debris flow that caused loss of life and property at the town of Santa Cruz belonging to the municipality of Tenango del Valle, State of Mexico. As a result of this event the inhabitants rebuilt the village that is currently called Santa Cruz Pueblo Nuevo, however this relocation was made without an adequate planning in the lower part of the watershed on an alluvial fan, which is prone to new and future landslides and debris flows. Despite of its importance, there is a lack of landslide inventories that aid the assessment of landslide susceptibility in the watershed. Our work is focus in two secondary rivers located

Los resultados muestran que existe un dominio de formas del relieve de tipo lomeríos en los arroyos secundarios ASC1 y ASC2, y se diferencian por sus características morfométricas y geológicas. La geoforma que representa una mayor densidad de fenómenos gravitacionales es lomeríos de pómez y depósitos de caída, ya que tiene 91 de los 179 procesos cartografiados en ambos arroyos.

Además, se encontró que los procesos del tipo escombros son los más frecuentes a lo largo de los dos arroyos y tienen el potencial de dañar la localidad de Santa Cruz Pueblo Nuevo y otras áreas. El arroyo que presenta mayor susceptibilidad a procesos gravitacionales es el ASC2. Los factores como pendientes de 6° a 30°, las distintas características litológicas que componen las geoformas, la morfología de laderas del tipo cóncava y, en algunos casos, la altitud, influyen en la abundancia y distribución de los procesos gravitacionales.

Palabras clave: Procesos gravitacionales, inventario, frecuencia, susceptibilidad, volcán Nevado de Toluca.

in the southern portion of the La Ciénega watershed. These secondary rivers are referred as La Cieneguilla 1 (ASC1) and La Cieneguilla 2 (ASC2). In both tributaries, a detailed landslide inventory and a geomorphological map were carried out in order to determine the landslide susceptibility by landforms. The methodology encompasses four main stages of analysis to assess landslide susceptibility. During the first stage, background information was collected to provide a generalized characterization of landslides processes within the watershed. Background information includes geology, land use, climate and hydrology, preexisting landslide maps and reports, etc. In the second stage, a single historic landslide inventory map was created with sets of satellite images from different time and fieldwork. One hundred seventy-nine landslides were mapped and documented in the GIS. During the third stage a geomorphological map was obtained by interpretation of aerial photographs, a digital elevation model (MDE), geology, and morphometric maps. The geomorphological map allowed to highlight the relevant landforms in the watershed. The fourth stage establish the landslide susceptibility per landform by using the landslide frequency and the landslide area. This method follows and adapt the Washington State, Department of Natural Resources Landslide Hazard Protocol.

The results show that debris slides are the most frequent processes along the two secondary rivers and have the potential to damages the town of Santa Cruz Pueblo Nuevo and other rural areas. Along the two secondary rivers, three landforms out of fourteen have the highest landslide susceptibility. In these landforms, factors such as steep slopes, geological faults, and slope morphology influence the abundance and distribution of landslides.

Keywords: Landslides, inventory, frequency, susceptibility, Nevado de Toluca volcano.

INTRODUCCIÓN

En México se han presentado gran cantidad de procesos gravitacionales en los años recientes, muchos de ellos en el EVT, tales como los ocurridos en el volcán Pico de Orizaba (Legorreta *et al.*, 2014), en el volcán Nevado de Toluca (Aceves *et al.*, 2014), en las montañas de Puebla (Lugo *et al.*, 2005), en las sierras costeras de Guerrero, Chiapas y Oaxaca (Cenapred, 2014) y en la ciudad de Tijuana, Baja California (Cenapred, 2002). Estos fenómenos se han abordado mediante la compilación de inventarios históricos o multitemporales de procesos gravitacionales y su modelación. El inventario y modelado de la susceptibilidad se lleva a cabo a escala local o regional con el uso de la integración de diversos métodos heurísticos, estadísticos y determinísticos, cada uno de los cuales tiene sus propias ventajas y limitaciones (Legorreta *et al.*, 2014).

En la cuenca La Ciénega, perteneciente al volcán Nevado de Toluca, las características geomorfológicas y geológicas crean condiciones que la hacen susceptible a procesos gravitacionales. Este tipo de procesos ponen en peligro a la población de Santa Cruz Pueblo Nuevo, que tiene 1 634 habitantes (Inegi, 2010) y está asentada en la parte baja de la cuenca, pues al presentarse lluvias extraordinarias, los arroyos secundarios como ASC1 y ASC2 llevan grandes cantidades de sedimentos obtenidos de los materiales removidos por los procesos gravitacionales.

En la cuenca se han realizado estudios que han permitido obtener un mapa geomorfológico, un inventario de procesos gravitacionales y la relación con el cambio de uso de suelo (Álvarez, 2014; Aceves *et al.*, 2014). A pesar del esfuerzo realizado en esta zona, no hay trabajos enfocados a una cartografía geomorfológica a detalle respaldada con métodos estadísticos que permitan establecer áreas de susceptibilidad a procesos gravitacionales.

Es por eso que el objetivo de este estudio es determinar las formas del relieve y su susceptibilidad a procesos gravitacionales en dos arroyos secundarios: ASC1 y ASC2 (que se encuentran en la porción sur de la cuenca La Ciénega, en el volcán Nevado de Toluca), respaldado por un método estadístico. Para ello, se elaboró un inventario actualizado de

procesos gravitacionales con base en imágenes de satélite SPOT-6 y Google Earth, ambas de 2015, y con el empleo de la clasificación del ya mencionado Protocolo de Zonificación de Peligro por Deslizamiento (LHZ) realizado por el DNR.

Con el inventario se determinaron 179 procesos gravitacionales y se identificaron 23 formas del relieve a detalle basadas en la clasificación de Lugo (1988), la cual sirvió de apoyo para la elaboración de cartografía geomorfológica a una escala grande (1:30 000). Esta cartografía es respaldada por un método estadístico, el cual consiste en analizar la frecuencia de los procesos gravitacionales por geoforma y por área.

Finalmente, para obtener la susceptibilidad a procesos gravitacionales, se utilizó una adaptación del citado Protocolo, a partir del Rango de Valoración por Área (RVDA) y del Rango de Valoración de Procesos Gravitacionales por Frecuencia (RVDF) de cada una de las geoformas. Los resultados obtenidos en el estudio revelan que la cuenca La Ciénega presenta una susceptibilidad alta y el arroyo con más susceptibilidad a los procesos gravitacionales es el ASC2.

ANTECEDENTES

Las geoformas están expuestas a procesos gravitacionales, los cuales son fenómenos naturales dinámicos. Esta exposición se acelera por las actividades antrópicas, pues en las últimas décadas el vínculo y los efectos que tienen los seres humanos sobre las formas del relieve se han estrechado y desencadenado desastres. En este sentido, los estudios geomorfológicos han sido la base para determinar cualitativa y cuantitativamente las características donde se desarrollan los procesos gravitacionales (Tricart, 1969; Hooke, 1994).

A nivel mundial, los estudios de frecuencia y densidad de procesos gravitacionales mencionan que para entender la distribución y los patrones espaciales de dichos procesos es importante realizar la búsqueda, recopilación y descripción de información existente, combinada con el análisis de datos obtenidos en campo (DNR, 2006; Hervás y Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010). Este

análisis es reforzado, generalmente, con métodos estadísticos que permiten evaluar cuantitativamente la distribución y la susceptibilidad de la zona (Borgomeo *et al.*, 2014; Guns y Vanacker, 2014).

Algunos de los métodos estadísticos más usados para analizar la ocurrencia de los procesos gravitacionales se refieren, de manera general, al cálculo de frecuencia y al área de dichos procesos que afectan cada unidad geomorfológica (Chang y Slaymaker, 2002; Guthrie, 2002; Suárez, 2009; Borgomeo *et al.*, 2014; Guns y Vanacker 2014; Legorreta *et al.*, 2015).

Por su parte, la descripción y comprensión de la distribución espacial de los procesos gravitacionales y sus factores determinantes son importantes para los estudios geomorfológicos y para determinar la susceptibilidad a estos fenómenos, ya que son parte de la evolución del paisaje (Borgomeo *et al.*, 2014; Legorreta *et al.*, 2015). Por ejemplo, desde la década de los noventa, el DNR ha realizado investigaciones para la identificación de laderas inestables con el fin de ayudar a mitigar los riesgos por procesos gravitacionales a partir de la comparación de cuencas hidrográficas en el estado de Washington. Su método semicuantitativo usa la frecuencia y el área de procesos gravitacionales que afectan las geoformas del terreno para establecer el peligro.

En México, la evaluación de procesos gravitacionales se ha abordado mediante la elaboración cartográfica de inventarios y su modelación a través de los SIG (Pérez, 2007; Oliva *et al.*, 2012). Estos estudios se enfocan, en su mayoría, a terrenos montañosos, los cuales, generalmente, están compuestos por materiales poco consolidados que los hacen susceptibles a los procesos de laderas y que impactan a la población directa o indirectamente a través de sus depósitos. Tal es el caso del volcán Nevado de Toluca, la cuarta montaña más alta de México (4 680 m s. n. m.), el cual tiene un gran potencial para producir procesos gravitacionales debido a la existencia de depósitos piroclásticos, de caída y de rocas altamente intemperizadas que están sujetas a condiciones de alta precipitación estacional. Tales condiciones predisponen a este estratovolcán a la generación episódica de flujos de escombros. Por ejemplo, en 1940 un flujo de escombros alimentado por los depósitos de procesos

gravitacionales destruyó el pueblo de Santa Cruz en la ladera este del volcán (Peña, 2006; Toscana y Valdez, 2013; Aceves *et al.*, 2014).

En esta área del volcán se han hecho investigaciones de diferentes aspectos físicos, por ejemplo, existen trabajos que están dedicados a aspectos geomorfológicos (Aceves *et al.*, 2014; Espinosa, 2003; Norini *et al.*, 2004; Espinosa *et al.*, 2014; Aceves *et al.*, 2014). Además, se ha establecido la relación entre el cambio de uso de suelo y los deslizamientos en la cuenca La Ciénega (Álvarez, 2014). También se han realizado trabajos de peligros volcánicos (Capra *et al.*, 2008; Aceves *et al.*, 2006), inundaciones y aspectos sociales (Peña, 2006; Tosacana y Valdez, 2013), sin embargo, no existen trabajos semicuantitativos. Para complementar esta situación, este trabajo ha adaptado el método del DNR para calcular la susceptibilidad tomando en cuenta el periodo de tiempo de los datos del inventario y de las imágenes de satélite utilizadas, así como el área de cada una de las geoformas y el número y área de los procesos gravitacionales.

ÁREA DE ESTUDIO

Los arroyos secundarios La Cieneguilla 1 y La Cieneguilla 2 que se estudiaron en este trabajo se localizan en la parte central y sur de la cuenca endorreica La Ciénega. Ésta se localiza en la ladera oriental del volcán Nevado de Toluca y comprende las coordenadas 19°07', 19°04' N y 99°44', 99°37' W (Figura 1).

El volcán Nevado de Toluca pertenece al Eje Volcánico Transmexicano, es un estratovolcán formado por material andesítico-dacítico y es la cuarta elevación más importante de México, con una altitud aproximada de 4 680 m s. n. m. (Macías, 2005).

La cuenca La Ciénega se delimita geomorfológicamente al oeste por el borde oriental del cráter del volcán Nevado de Toluca, al NO y SO por valles y circos glaciares, y al NE y SE por laderas bajas acumulativas (Espinosa *et al.*, 2014). Es aquí, en las partes bajas acumulativas, donde la desembocadura del arroyo principal La Ciénega se encuentra obstaculizada por el derrame andesítico tenango o

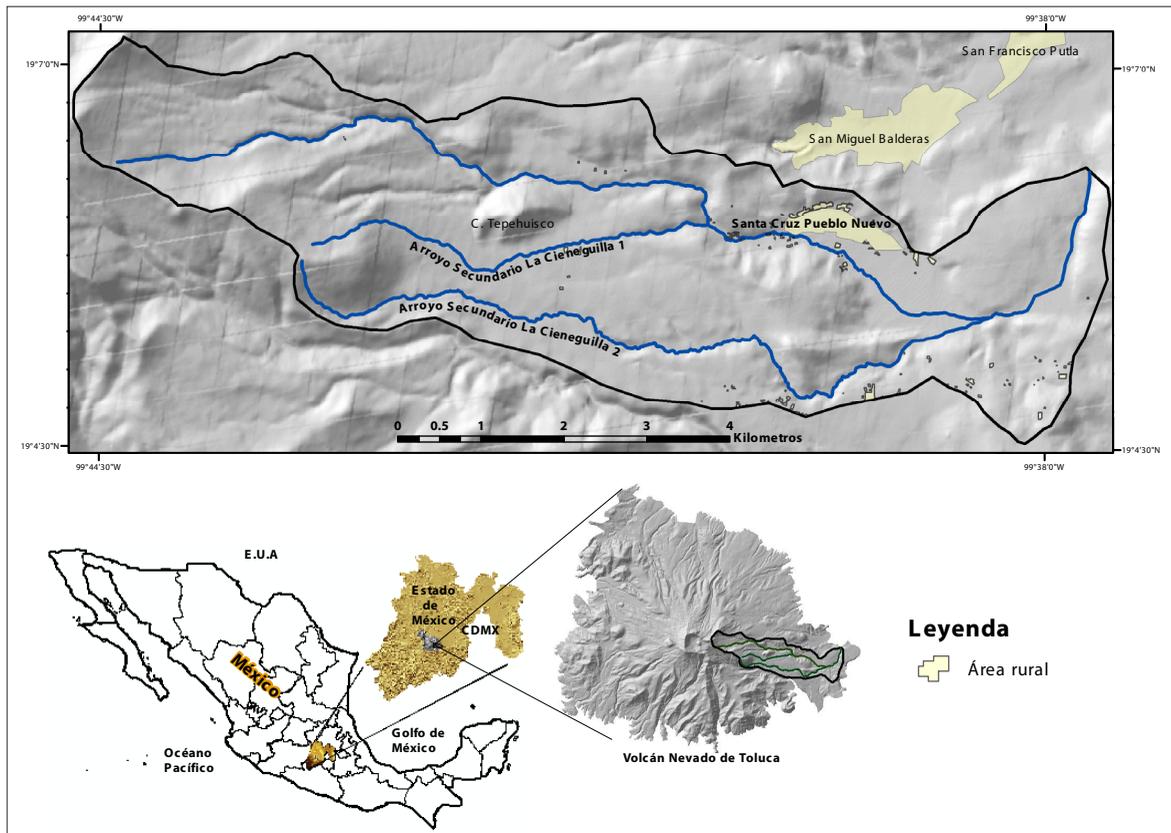


Figura 1. Localización e inventario de procesos gravitacionales del área de estudio. Elaboración: Sandra García Reyes, con base en INEGI (2013).

tépetl. Esta cuenca comprende un área de 28 km², tiene una forma alargada con una orientación E-O. Su longitud es de 13 km y su ancho es de 2.5 km aproximadamente (Aceves *et al.*, 2014).

El clima en la cuenca La Ciénega se clasifica en dos tipos: el primero se delimita de 2 893 a 4 000 m s. n. m. y se caracteriza por ser templado con un verano fresco largo, tiene un alto grado de humedad y presenta poca oscilación térmica. A partir de los 4 000 m s. n. m. se presenta un clima frío, el cual tiene un alto grado de humedad y es isotermal (García, 2004). La mayor precipitación se origina de junio a septiembre. Debido a estos dos tipos de climas, se ha observado una variación entre periodos de estiaje y precipitaciones intensas, lo que favorece grandes torrentes que han llegado a impactar en la población (Espinosa, 2001; Toscana y Valdez, 2013).

En respuesta a la litología, los arroyos secundarios ASC1 y ASC2 presentan un modelo de drenaje del tipo dendrítico con rasgos subparalelos. El arroyo La Ciénega es de cuarto orden, mientras que los arroyos ASC1 y ASC2 son de tercer orden.

Los arroyos secundarios ASC1 Y ASC2 se han desarrollado sobre una ladera compuesta por materiales piroclásticos, como flujos de pómez, avalanchas de escombros, materiales de oleadas piroclásticas, depósitos de flujos de bloques y ceniza, lahares y depósitos de caída, los cuales son materiales susceptibles a la erosión, ya que suelen ser poco cohesivos (Capra *et al.*, 2008; Aceves *et al.*, 2014). Al NE de la cuenca se encuentra la población de Santa Cruz Pueblo Nuevo, que está asentada sobre un abanico activo compuesto por depósitos aluviales y flujos de escombros (Aceves *et al.*, 2006).

METODOLOGÍA

La susceptibilidad a procesos gravitacionales consta de cuatro etapas generales: la recopilación de información, el inventario de procesos gravitacionales, la cartografía geomorfológica y la susceptibilidad

geomorfológica. Cada una de ellas engloba métodos particulares, los cuales se conceptualizan en la Figura 2.

Durante la primera etapa se recopiló información bibliográfica del área de estudio, así como trabajos previos de geografía, geología, geomorfo-

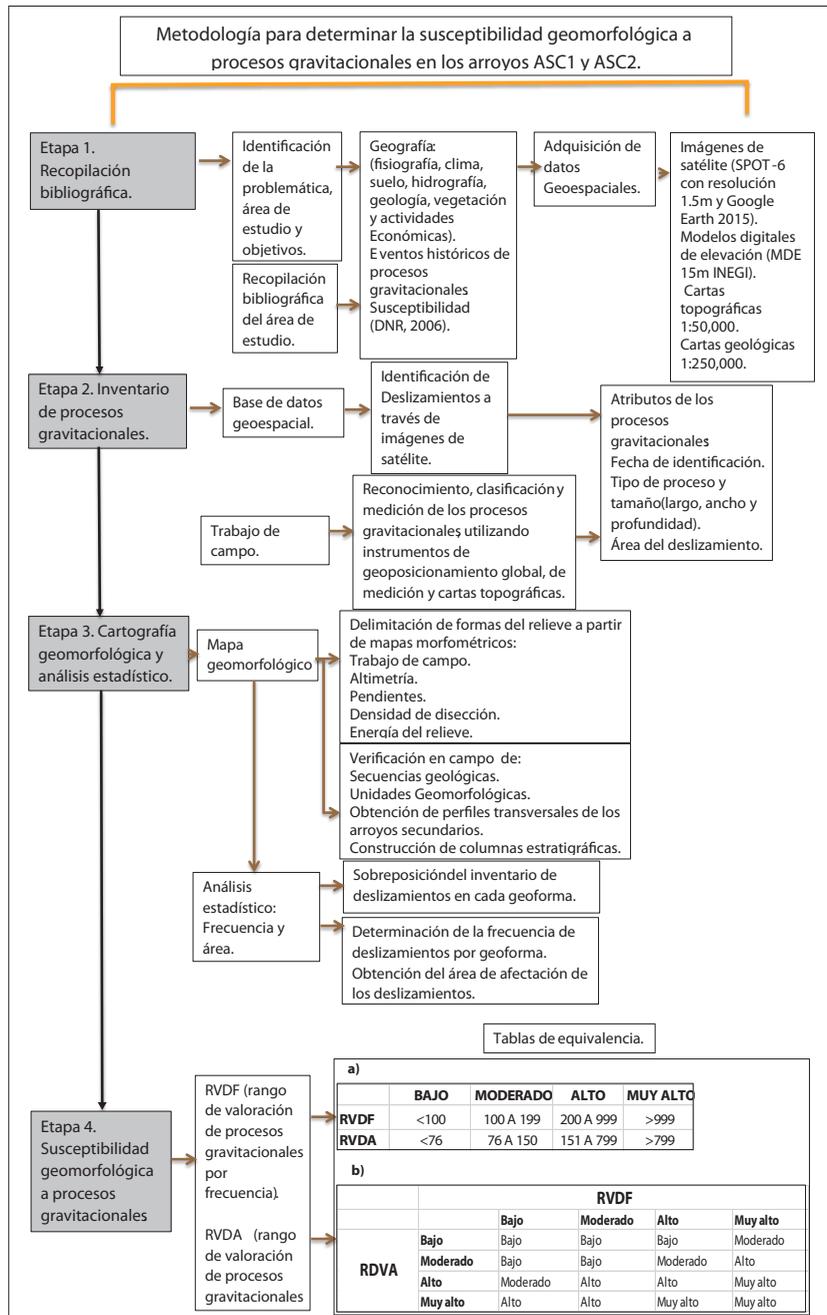


Figura 2. Proceso de elaboración para la obtención de la susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales y tablas de equivalencia para obtener la susceptibilidad (a) y (b).

logía, información particular de eventos históricos de procesos gravitacionales, etc. Por otro lado, se compiló cartografía temática como cartas topográficas con escala 1:50 000 (Inegi, 2013), cartas geológicas 1:250 000 (SGM, 2002), imágenes de satélite SPOT-6 con resolución 1.5 m, imágenes de Google Earth de 2015 y un modelo digital de elevación de 15 m.

En la segunda etapa se construyó el inventario de procesos gravitacionales. Algunos de estos procesos se tomaron de la base de datos de Álvarez (2014). También se realizaron dos sesiones de trabajo de campo, esto permitió verificar la información obtenida a partir de la interpretación de las imágenes de satélite. Para la clasificación de los procesos gravitacionales, se utilizó el citado Protocolo, en donde se identificaron seis tipos de procesos gravitacionales: superficial, de escombros, flujos de escombros, caídas y desprendimientos, por incidencia de meandro y de asentamiento profundo. También se hizo la medición de los procesos gravitacionales y se obtuvo el largo, el ancho y la profundidad.

Posteriormente, en gabinete se efectuó la interpretación de los procesos en los arroyos secundarios ASC1 y ASC2. Esta interpretación consistió en identificar y digitalizar los procesos gravitacionales con base en dos imágenes de satélite SPOT-6 y Google Earth de 2015. Para ello se utilizaron criterios de tono, color, textura, forma y patrón (Chuvieco, 1996; Verstaapen, 1977).

En la tercera etapa se elaboró el mapa geomorfológico, para ello se compilaron y derivaron mapas temáticos. Por ejemplo, el mapa geológico se compiló de distintas fuentes (Capra *et al.*, 2008; Torres, 2011; Aceves *et al.*, 2014), el mapa geomorfológico fue derivado de los mapas altimétrico, de pendiente, de densidad de disección, de profundidad de disección y de morfología de laderas, así como de la interpretación de éstos y del análisis del relieve. Los valores obtenidos de estos mapas facilitaron la delimitación de geoformas.

Para la clasificación de las geoformas se utilizó la propuesta por Lugo (1988), basada en Chemekov (1972) y Bashenina *et al.* (1975). Además, se empleó parte de la información geomorfológica de Aceves *et al.* (2014), esto con el fin de obtener una cartografía a mayor detalle.

En la cuarta etapa se obtuvo la susceptibilidad a procesos gravitacionales de cada una de las geoformas y de la cuenca La Ciénega, la cual, de acuerdo a la metodología semicuantitativa del DRN, se basó en la cuantificación del número de procesos gravitacionales por área y por frecuencia.

La asignación de la susceptibilidad de cada geoforma se determinó del RVDA y del RVDF (Figura 2a). El RVDF refleja el número de procesos gravitacionales y el área de la geoforma (ha), los cuales son normalizados para un periodo de 34 años de acuerdo con los datos del inventario. El resultado, que suele ser un valor pequeño, se multiplica por 1 millón con el fin de obtener números enteros.

El RVDA es el área de la cabecera de los procesos gravitacionales (ha) y el área de las geoformas (ha), los cuales son normalizados para un periodo de 34 años de acuerdo con el inventario. El resultado obtenido se multiplica por 1 millón.

Con el fin de obtener valores cualitativos, se utilizó la tabla (Figura 2b) para determinar la clasificación de la susceptibilidad de cada geoforma. Con los valores del RVDA y RVDF las formas del relieve recibieron una asignación de susceptibilidad baja, moderada, alta o muy alta.

RESULTADOS

Inventario de procesos gravitacionales

A lo largo de los arroyos secundarios ASC1 y ASC2 se identificaron 179 procesos gravitacionales que cubren un área de 0.04% de la cuenca. De los procesos registrados, 155 fueron de escombros, que representan 86.59% del total de los procesos gravitacionales, es decir, son los procesos gravitacionales predominantes en ambos arroyos. En menor proporción se encuentran los de asentamiento profundo (8), que representan 4.46% del total de procesos gravitacionales. Le siguen los superficiales (5) y los flujos de escombros (5), cada uno de ellos representa 3.7% del total de procesos gravitacionales. También se identificaron 4 por incidencia de meandro, que son 3.14% del total y 2 del tipo caídas y desprendimientos, que representan 2.11% (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen del tipo, número de procesos gravitacionales, su área de afectación, el RVDA y el RVDF de cada una de las geoformas que presentan procesos gravitacionales.

Geoforma	Área %	Núm. de deslizamientos	% De área afectada de la geoforma	RVDF	RVDA
Lomeríos de pómez y depósitos de caída	17.88	92	0.15%	5 348.19	44.34
Lomeríos de piroclastos	8.67	25	0.21%	2 994.72	62.90
Ladera inferior	3.53	19	0.31%	5 587.61	93.43
Domo parcialmente sepultado	2.51	14	0.42%	5 377.30	125.91
Coladas de lava cubiertas por flujos de pómez y ceniza	4.72	7	0.14%	1 538.86	41.68
Lomeríos de avalanchas de escombros cubiertos de piroclastos	2.21	6	0.28%	2 813.05	84.63
Lomeríos de pómez, bloques y cenizas	3.47	4	0.02%	1 197.56	6.50
Colada de lava parcialmente cubierta por piroclastos	11.88	4	0.07%	297.09	25.97
Lomeríos de pómez de caída y flujos piroclásticos	0.32	3	0.11%	6 380.56	32.54
Abanico aluvial	2.99	3	0.01%	1 048.09	0.94
Lomeríos de lava cubiertos por piroclastos	8.96	2	0.001%	231.92	0.26
Domo 3	2.29	1	2.16%	453.71	635.20
Lomeríos de lava cubiertos de pómez y ceniza	5.90	1	0.02%	176.04	8.47

Mapa geomorfológico

En la cuenca La Ciénega se cartografiaron 23 geoformas (Figura 3) de los siguientes tipos.

Domos

Se identificaron cinco estructuras, las cuales presentan laderas pronunciadas y se encuentran fuertemente fracturadas, cuatro de ellas son de composición dacítica y se localizan al NO de los arroyos ASC1 y ASC2. El quinto domo de composición basáltica se caracteriza por estar parcialmente sepultado y se localiza al SE de los arroyos secundarios. Los cinco domos se encuentran en un rango de altitud que va de los 2 829 a los 4 423 m s. n. m. La orientación de sus vertientes tiene una preferencia al NE y SE, y las máximas pendientes de sus laderas van de los 30° hasta los 46°. Estas geoformas son asimétricas.

Laderas

Se cartografiaron dos unidades con morfología recta e inclinada que fueron originadas por avalanchas de escombros, depósitos de caída y flujos de bloques y cenizas, las cuales se localizan al NO y O de los arroyos secundarios. Estas laderas se encuentran en un rango de altitud de 3 226 a 4 123 m s. n. m. y se orientan al NO y NE. Los valores máximos de las pendientes que componen estas geoformas llegan hasta los 30° y la profundidad de sus valles va de 15 a 35 m.

Lomeríos

Existen siete geoformas del tipo lomeríos con superficies inclinadas y de poca altitud, las cuales se clasificaron en cuatro grupos: 1) lomeríos de lava; 2) lomeríos de avalanchas de escombros; 3) lomeríos de pómez, bloques y cenizas; y 4) lome-

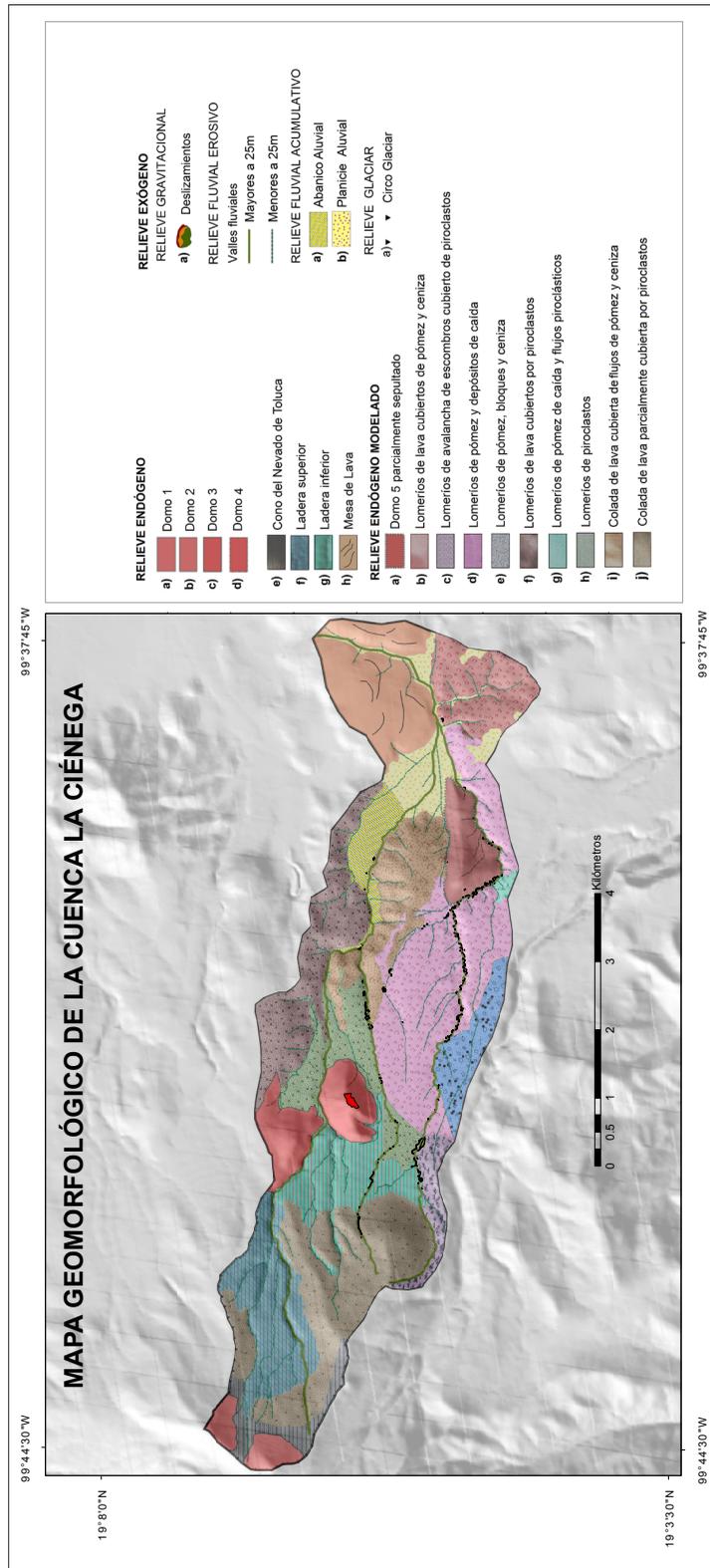


Figura 3. Mapa geomorfológico de la cuenca La Ciénega. Elaboración: Sandra García Reyes, con base en Capra (2008); Torres (2011); Aceves (2014).

ríos de piroclastos. Esto se realizó de acuerdo a sus características comunes.

Los grupos 1 y 2 fueron cubiertos por material piroclástico como pómez, cenizas y depósitos de caída, en cambio, el grupo 3 se constituye de flujos de pómez, depósitos de bloques y cenizas. El grupo 4 se compone de materiales de diversos eventos volcánicos como flujos de pómez, depósitos de caída, pómez y cenizas.

Los lomeríos se localizan en la parte central y SE de la cuenca La Ciénega, además, todos ellos son modelados por los arroyos ASC1 y ASC2. Estas unidades del relieve se encuentran en un rango de altitud de 2 838 a 3 323 m s. n. m y presentan pendientes de 10° a 30°.

Coladas de lava

Se identificaron dos geoformas que fluyen al E y están cubiertas por flujos de pómez, cenizas y depósitos de caída. Se localizan en la parte NO, SO y NE de los arroyos secundarios. Estas unidades del relieve se encuentran en un rango de altitud de 2 867 a 4 135 m s. n. m y presentan pendientes de hasta 30°.

Valles fluviales

Estas geoformas se originan a partir de la red fluvial de la cuenca La Ciénega. El arroyo principal, nombrado de la misma manera que la cuenca, presenta hacia la parte oeste y central valles profundos mayores a 25 m. Los arroyos secundarios ASC1 y ASC2 tienen valles mayores a 25 m, que van reduciendo su profundidad conforme desembocan en la planicie aluvial.

Abanico aluvial

Esta geoforma se origina a partir del depósito de sedimentos en la desembocadura del arroyo principal La Ciénega. Se localiza al NE de los arroyos ASC1 y ASC2, se encuentra en un rango de altitud de 2 840 a 3 037 m s. n. m y presenta pendientes de 0° a 10°.

Planicie aluvial

Esta unidad del relieve es amplia y se origina por procesos acumulativos de las corrientes fluviales de la cuenca. Se localiza en la porción E sobre la

desembocadura de los arroyos ASC1 y ASC2, y tiene un rango de altitud que va de los 2 797 a los 2 840 m s. n. m. Presenta pendientes de 0° a 6°.

Circo glaciar

Esta unidad tiene una forma más o menos semi-circular con una abertura hacia el E y se originó a partir del colapso de la ladera oriental del volcán Nevado de Toluca, que posteriormente fue modelado por los glaciares. Se localiza al NO de los arroyos ASC1 y ASC2 y se presenta en un rango de altitud que va de los 3 690 a los 4 423 m s. n. m. con pendientes de hasta 35°.

Mesas de lava

Es una geoforma plana y aislada, limitada por bordes escarpados, compuesta de lavas andesíticas. Se localiza al oriente de los arroyos ASC1 y ASC2, justo en la desembocadura. Esta unidad tiene un rango de altitud que va de los 2768 a los 2904 m s.n.m. y tiene pendientes de hasta 6° en los bordes. Presenta crestas de comprensión que marcan la dirección del flujo de lava hacia el SO.

Susceptibilidad a procesos gravitacionales

De acuerdo a los resultados del RVDF y el RVDA obtenidos de cada una de las geoformas (Tabla 1), éstas se agruparon a partir de una susceptibilidad baja, moderada y alta.

De las 23 geoformas cartografiadas en la cuenca La Ciénega, sólo 14 se utilizaron en este estudio, ya que son modeladas por los arroyos ASC1 y ASC2 que se estudian en este trabajo, y en sólo 13 geoformas se tiene registro de incidencia por procesos gravitacionales (Tabla 1), pues en la geoforma mesa de lava no se encontraron este tipo de procesos.

El área total de afectación por estos deslizamientos es de 4 ha (0.04 km²) en un periodo de tiempo de estudio de 34 años, de acuerdo a los datos del inventario.

Susceptibilidad baja

Los valores de susceptibilidad baja se explican a partir de la nula o poca frecuencia de los procesos gravitacionales, de la baja o moderada densidad de la red fluvial y de las características litológicas de las geoformas; es decir que los materiales que

constituyen las formas del relieve suelen ser estables, resistentes a la erosión fluvial y a los procesos gravitacionales (Tabla 2).

Susceptibilidad moderada y alta

Los valores de susceptibilidad moderada y alta se deben a la discontinuidad de los estratos litológicos, la poca consolidación entre los distintos materiales y la altitud en donde se encontraron los deslizamientos y la pendiente, ya que los procesos gravitacionales ocurren, de manera general, en pendientes de 6° a 30°, y a que 80% de dichos procesos se presentaron en laderas con una morfología cóncava (Tabla 2).

CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó la susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en los arroyos secundarios ASC1 y ASC2 (Figura 4) localizados en la porción sur de la cuenca La Ciénega. A partir de la elaboración de un inventario detallado de procesos gravitacionales (Figura 1) y del mapa geomorfológico (Figura 3), se elaboró el mapa de susceptibilidad por geoformas mediante un análisis estadístico por frecuencia y área de afectación.

La compilación de información histórica y actual de los procesos gravitacionales evidencia su existencia en la zona de estudio, en donde se encon-

Tabla 2. Susceptibilidad de las geoformas en las que se desarrollan y atraviesan los arroyos ASC1 y ASC2.

GEOFORMAS DEL ARROYO ASC1	SUSCEPTIBILIDAD
Colada de lava parcialmente cubierta de piroclastos	Bajo
Lomeríos de lava cubiertos de piroclastos	Bajo
Planicie aluvial	Bajo
Mesa de lava	Bajo
Lomeríos de lava cubiertos por pómez y cenizas	Bajo
Lomeríos de piroclastos	Moderado
Lomeríos de pómez y depósitos de caída	Moderado
Colada de lava cubierta de pómez y cenizas	Moderado
Abanico aluvial	Moderado
Ladera inferior	Alto
GEOFORMAS DEL ARROYO ASC2	SUSCEPTIBILIDAD
Colada de lava parcialmente cubierta de piroclastos	Bajo
Planicie aluvial	Bajo
Lomeríos de lava cubiertos por pómez y cenizas	Bajo
Mesa de lava	Bajo
Lomeríos de piroclastos	Moderado
Lomeríos de pómez y depósitos de caída	Moderado
Lomeríos de pómez, bloques y cenizas	Moderado
Lomeríos de pómez de caída y flujos piroclásticos	Moderado
Lomeríos de avalanchas de escombros cubierto de piroclastos	Alto
Ladera inferior	Alto
Domo 5 parcialmente sepultado	Alto

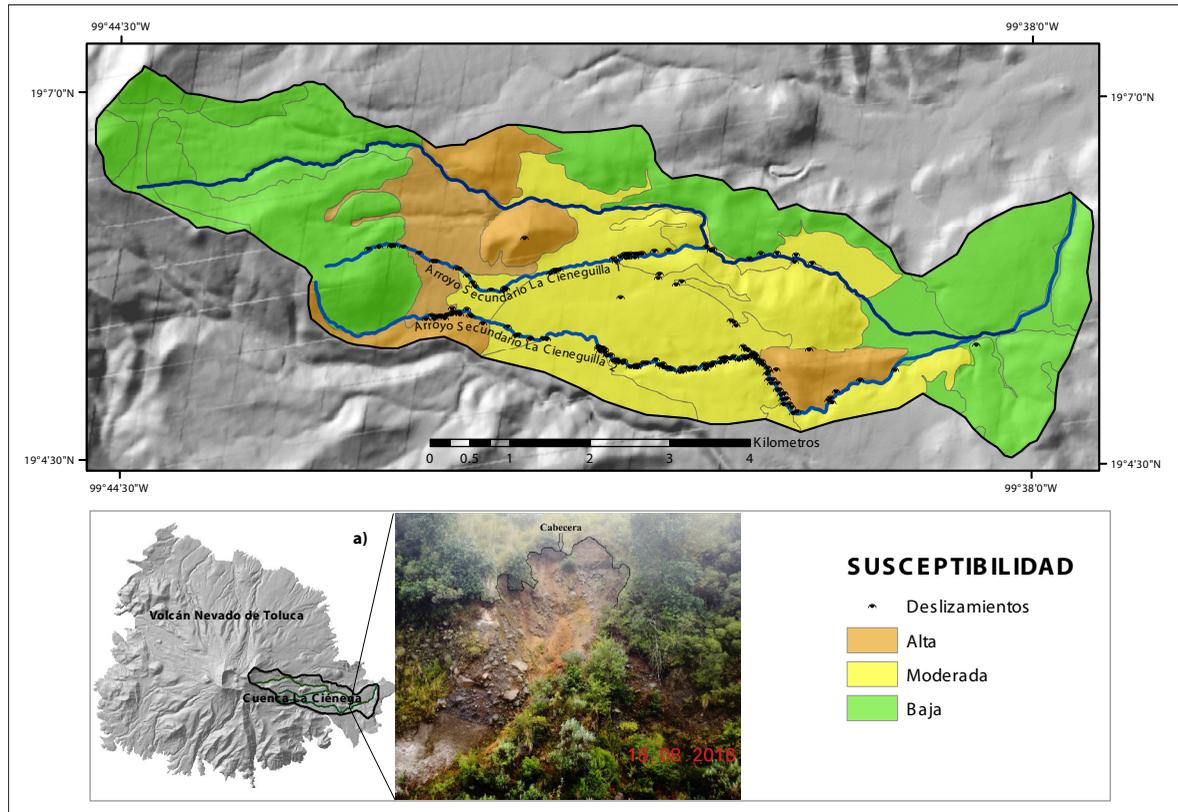


Figura 4. Mapa de susceptibilidad en los arroyos ASC1 y ASC2. Proceso gravitacional del tipo escombros (a). 58.59% del arroyo ASC1 se desarrolla sobre geoformas con una moderada y alta susceptibilidad a los deslizamientos; 84.35 % del arroyo ASC2 se desarrolla sobre geoformas con una moderada y alta susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración: Sandra García Reyes, con base en INEGI (2013).

tró que los procesos gravitacionales de escombros son los más frecuentes en ambos arroyos y los de mayor peligro para la población, de acuerdo a su cercanía con las áreas rurales y la localidad de Santa Cruz Pueblo Nuevo.

Se identificó el dominio de formas del relieve del tipo lomeríos en los arroyos secundarios ASC1 y ASC2, sin embargo, las geoformas más susceptibles a los deslizamientos en estos arroyos son ladera inferior, lomeríos de avalanchas de escombros cubiertos por piroclastos y lomeríos de pómez y depósitos de caída y domo 5 parcialmente sepultado.

Además, se obtuvo como resultado del análisis geomorfológico que los factores que inciden en el desarrollo de los procesos gravitacionales en los arroyos ASC1 y ASC2 son la pendiente con inclinaciones de 6° hasta 30°, la morfología de laderas del

tipo cóncavas, la litología (depósitos piroclásticos, bloques procedentes de avalanchas de escombros y de colapsos de domos) y, en algunos casos, la altitud es el factor que incide en el desarrollo de estos fenómenos.

La adaptación de método semicuantitativo del DNR en terrenos volcánicos, como en el caso de esta investigación, permitió integrar los datos de frecuencia y área con los factores que inciden en el desarrollo de procesos gravitacionales, con el fin de conocer la susceptibilidad a las geoformas en los arroyos secundarios.

Es fundamental mencionar que el empleo de la metodología realizada por el DNR puede presentar limitaciones, ya que en este trabajo se observó la importancia del tamaño de la geoforma con respecto al número de procesos gravitacionales y el área de

su afectación, pues repercute de manera significativa en la asignación de la susceptibilidad; es decir, cuando las geoformas con áreas pequeñas presentan un menor número de procesos gravitacionales en comparación con geoformas más grandes que tienen mayor número de procesos gravitacionales, obtienen una susceptibilidad moderada o alta. Sin embargo, se entiende que estos resultados son correctos, ya que el área de afectación de los procesos gravitacionales es más relevante en extensión con respecto al área total de la geoforma.

También se encontró que este método disminuye el grado de susceptibilidad conforme se incrementa el periodo de tiempo del estudio.

La implementación de una cartografía geomorfológica respaldada con un análisis estadístico permite conocer de manera integral las características de las formas del relieve que las hacen susceptibles a los procesos gravitacionales. Asimismo, los datos obtenidos permitirán implementar a futuro una estrategia de planeación y evaluación de procesos gravitacionales que apoye a las autoridades en la toma de decisiones y se eviten sucesos como los ocurridos en 1940 en el pueblo de Santa Cruz.

AGRADECIMIENTOS

A los programas PAPIIT # IN102115 y Ciencia Básica SEP-CONACYT Grant No. 281119, por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Aceves, Q. J. F. (2007). *Mapas de riesgo volcánico basados en Sistemas de Información Geográfica: volcán Nevado de Toluca*. Tesis de doctorado en Ciencias de la Tierra. Geología, UNAM, México.
- Aceves, Q. J. F., Legorreta, P. G. y Álvarez, R. Y. (2014). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 329-342.
- Aceves, Q. J. F., Legorreta, P. G., Lugo, J. H., Umaña, J. R. y Legorreta, H. A. C. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca de río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 91, 43-55.
- Aceves, Q. J. F., López, B. J. y Martín, P. A. (2006). Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2), 113-124.
- Álvarez, Y. R. (2014). *Relación entre el cambio de cobertura-uso de suelo y los deslizamientos, año 1983 y 2014, en la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca*. México: Facultad de Ciencias, UNAM.
- Bashenina, N. V., Gellert, J. E., Joly, F. y Klimaszewski, E. (1975). Leyenda unificada para cartas geomorfológicas de detalle. En *La cartografía geomorfológica en escalas grandes*. Moscú: Editorial MGU.
- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S. y Jaboyedoff, M. (2010). Debris Flow Hazard Modelling on Medium Scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(11), 2379-2390.
- Borgomeo, E., Hebditch, K. V., Whittaker, A. C. y Lonergan, L. (2014). Characterising the Spatial Distribution, Frequency and Geomorphic Controls on Landslide Occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, 226, 148-161.
- Capra, L., Norini, G., Gropelli, G., Macías, J. L. y Arce, J. L. (2008). Volcanic Hazard Zonation of the Nevado de Toluca Volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 469-484.
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2002). *Deslizamientos de tierras en las laderas de la Colonia Defensores de Baja California, Tijuana, B. C.* (Dictamen técnico). México: Cenapred, Coordinación de Investigación, Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia.
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2014). *Informe sobre la inestabilidad de laderas ocasionada por el huracán Ingrid y la tormenta tropical Manuel en Guerrero, Veracruz y Oaxaca en 2013*. México: Cenapred, Dirección de investigación, Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales, Subdirección de Riesgos Geológicos.
- Chang, J. C. y Slaymaker, O. (2002). Frequency and Spatial Distribution of Landslides in a Mountainous Drainage Basin: Western Foothills, Taiwan. *Catena*, 46(4), 285-307.
- Chemekov, Y. F. (1972). *Manual de investigaciones geomorfológicas*. Leningrado: Editorial Niedra.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp.

- Espinosa, R. L. M. (2001). *Geomorfología del noreste del Nevado de Toluca, México*. Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Espinosa, R. L. M. (2003). Elementos geomorfológico-cuantitativos del piedemonte nororiental del volcán Nevado de Toluca. *Ciencia Ergo Sum*, 10(2).
- Espinosa, R. L., Balderas, M. A. y Cabadas, H. V. (2014). Caracterización geomorfológica del área natural protegida Nevado de Toluca: complejo de volcanes Nevado de Toluca y San Antonio. *Ciencia UAT*, 9(1): 6-14.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Guns, M. y Vanacker, V. (2014). Shifts in Landslide Frequency-Area Distribution After Forest Conversion in the Tropical Andes. *Anthropocene*, 6, 75-85.
- Guthrie, R. H. (2002). The Effects of Logging on Frequency and Distribution of Landslides in Three Watersheds on Vancouver Island, British Columbia. *Geomorphology*, 43(3), 273-292.
- Hervás, J. y Bobrowsky, P. (2009). Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. En *Landslides Disaster Risk Reduction* (pp. 321-349). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hooke, R. L. B. (1994). On the Efficacy of Humans as Geomorphic Agents. *GSA Today*, 4, 217-225.
- Inegi. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad (ITER)*. México: Inegi.
- Legorreta, G. P., Bursik, M. I., Orózcó, J. J. Z. y García, J. E. F. (2015). Landslide Susceptibility of Volcanic Landforms in the Río El Estado Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico. *Natural Hazards*, 77(2), 559-574.
- Legorreta, G. P., Bursik, M., Solene, P., Hubp, J. L., Paredes, M. L. M. y Aceves, Q. F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66(2), 343-354.
- Lugo, H. J. I. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada: métodos cartográficos*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Lugo, H. J., Zamorano, O. J. J., Capra, L., Inbar, M. y Alcántara, A. I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 212-228.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana (Tomo LVII)*, 3, 379-424.
- Norini, G., Groppe, G., Capra, L. y De Benid, E. (2004). Morphological Analysis of Nevado de Toluca Volcano (Mexico): New Insights into the Structure and Evolution of an Andesitic to Dacitic Stratovolcano. *Geomorphology*, 62, 47-61.
- Oliva, A. O. G., Navarro, A. R., Salgado, R. M., Nicieza, C. G. y Fernández, M. I. A. (2012). Urban Development and Human Activity as Factors in Terrain Instability in Tijuana. *Engineering Failure Analysis*, 19, 51-62.
- Peña, V. E. (2006). *Análisis de la vulnerabilidad social e inundaciones en la cuenca de La Ciénega, parte alta de la cuenca del Río Lerma: México, D. F.* Tesis de maestría. UNAM, México.
- Pérez, G. R. (2007). Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuitlapa, Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 171-181.
- Sassa, K., Rouhban, B., Briceño, S., Mc Saveney, M. y He, B. (2012). *Landslides: Global Risk Preparedness*. Luxemburgo: Springer Science y Business Media.
- Suárez, J. (2009). *Análisis geotécnico. Deslizamientos* (vol. 1). Recuperado de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html> el 17 de mayo de 2016.
- Szabó, J., Dávid, L. y Lóczy, D. (2010). *Anthropogenic Geomorphology: a Guide to Man-Made Landforms*. Luxemburgo: Springer Science y Business Media.
- Torres, R. O. (2011). *Volcanismo efusivo en el área del Nevado de Toluca: Distribución y génesis de magmas*. Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM, México.
- Toscana, A. A. y Valdez, V. P. (2013). Representaciones sociales del desastre de 1940 en Santa Cruz Pueblo Nuevo, Estado de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 83, 88-101.
- Tricart, J. (1969). *La epidermis de la Tierra*. Barcelona: Editorial Labor.
- Verstappen, H. (1977). *The Use of Aerial Photographs in Geomorphological Mapping* (ITC Text Book VII-5). Países Bajos: Enschede.
- Washington State Department of Natural Resources (DNR) (2006). *Landslide Hazard Zonation (LHZ), Mapping Protocol, Version 2.1*. DNR, Forest Practices Division. Recuperado de <http://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/forest-practices> el 14 de febrero de 2015.
- Werner, E. y Hugh, F. (2010). *Landslides: Causes, Types and Effects*. Nueva York: Nova Science Publishers, inc.