

Cartografía y modelado de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la cuenca del río Xopanac, Puebla, México, utilizando regresión logística múltiple

Mapping and modeling of susceptibility to landslide processes in the Xopanac river basin, Puebla, Mexico, using multiple logistic regression

Gabriel Legorreta Paulín,* Lilia Arana Salinas,** Fernando Aceves Quesada,*** Rutilio Castro Miguel§

Recibido: 10/03/2025. Aceptado: 18/06/2025. Publicado: 30/06/2025.

Resumen. Los procesos de remoción en masa (PRM) constituyen un peligro natural importante para los asentamientos humanos y sus actividades productivas, especialmente en zonas montañosas donde el relieve abrupto, las precipitaciones o los sismos facilitan la caída o el deslizamiento de materiales. En México estas zonas son en general de difícil acceso y cuentan con escasa información cartográfica y geomorfológica. Tal es el caso del volcán Iztaccíhuatl, donde los PRM ocurren comúnmente a lo largo de sus laderas abruptas y depósitos poco consolidados que son cortados por valles profundos y estrechos. Este estudio tuvo como objetivo cartografiar PRM y evaluar la susceptibilidad en la cuenca hidrográfica del río Xopanac, localizada en el flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl, en el estado de Puebla. Para ello se elaboró un inventario de PRM a partir de fotointerpretación

y trabajo de campo y se modeló la susceptibilidad mediante regresión logística múltiple (RLM). Como factores condicionantes se utilizaron la elevación, el ángulo de la pendiente, la densidad de disección, la erosión vertical y el uso del suelo. La validación del mapa de susceptibilidad resultante se realizó mediante el área bajo la curva de la característica operativa del receptor. La validación muestra que el modelo de RLM presentar un área bajo la curva de 80.2 y tiene una alta capacidad predictiva con el uso de pocas variables significativas: dos topográficas, dos morfométricas y una variable ambiental, mismas que son relativamente fácil de obtener, lo cual las hace conveniente para su uso en la modelación en áreas volcánicas con escasa información.

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7830-400X>. Email: legorretag@hotmail.com. Autor de correspondencia.

** Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, Academia de la Licenciatura Protección Civil y Gestión de Riesgos, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7363-1522>. Email: lilia.ar@gmail.com.

*** Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-7381>. Email: acevesquesada.fernando@gmail.com.

§ Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica s/n, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6454-091X>. Email: rutilio.castro@encit.unam.mx.

Palabras clave: Inventario de PRM, Modelado estadístico de susceptibilidad, volcán Iztaccíhuatl.

Abstract. Massive landslide processes (MSLPs) constitute an important natural hazard for human settlements and their productive activities, especially in mountainous areas where abrupt relief, precipitation and/or earthquakes facilitate the fall or landslide of materials. In Mexico, these areas are generally difficult to access and have scarce cartographic and geomorphological information. Such is the case of the Iztaccíhuatl volcano, where DRPs commonly occur along its steep slopes and poorly consolidated deposits that are cut by deep and narrow valleys. This study aimed to map DRPs and assess susceptibility in the Xopanac river watershed located on the eastern flank of the Iztaccíhuatl volcano, in

the state of Puebla. For this purpose, an inventory of PRM was elaborated based on photointerpretation and field work, and susceptibility was modeled by means of multiple logistic regression (MLR). Elevation, slope angle, dissection density, vertical erosion and land use were used as conditioning factors. Validation of the resulting susceptibility map was performed using the area under the receiver operating characteristic curve. The validation shows that the RLM model presents an area under the curve of 80.2 and has a high predictive capacity with the use of few significant variables: two topographic, two morphometric and one environmental variable, which are related to the area under the curve.

Keywords: Massive landslide processes inventory, Statistical susceptibility modeling, Iztaccíhuatl volcano.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los procesos de remoción en masa (PRM) provocaron grandes afectaciones socioeconómicas que se han incrementado por el crecimiento poblacional y el cambio de uso del suelo que se extiende hacia zonas de laderas inestables (Aristizábal y Gómez, 2007). En los paisajes volcánicos, como estratovolcanes inactivos y campos monogenéticos, los PRM actúan sobre el piedemonte y laderas de los valles e incrementan la actividad destructiva de flujos de detritos y lodos a lo largo de los sistemas fluviales (Aceves-Quesada *et al.*, 2013; Alcántara-Ayala y Garnica-Peña, 2016). Tal es el caso del volcán Iztaccíhuatl, la tercera montaña más alta de México (5215.128 m s.n.m.), conformado por al menos cinco estratovolcanes inactivos (García-Tenorio, 2002) de edad Plio-Cuaternaria, ubicados en la porción central de la Sierra Nevada. Este complejo volcánico forma parte del parteaguas que divide las cuencas de México y de Puebla (Sánchez-García, 2018), y se alinea, de acuerdo con su antigüedad, del más viejo al N hasta el más joven en dirección S (Sánchez-García, 2018).

El volcán más joven del complejo Iztaccíhuatl, llamado volcán Amacuilécatl, presenta un cráter colapsado en forma de herradura, abierto al SE, que forma un gran piedemonte compuesto por abanicos coalescentes de materiales piroclásticos y depósitos de PRM interestratificados con sedimentos aluviales (García-Tenorio, 2002; Sánchez-García, 2018). En estos depósitos se forman interfluvios que dan

origen a grandes y profundas barrancas, donde se asientan las poblaciones de Santa María Nepoalco y Santa María Tianguistenco (Puebla). El área a lo largo del piedemonte es propensa a PRM debido a fenómenos geológicos e hidrometeorológicos, como sismos, altas precipitaciones durante la estación húmeda, presencia de depósitos de caída y otros depósitos piroclásticos poco consolidados e intemperizados, pendientes pronunciadas y cambios en el uso del suelo (SEDATU, 2016; SMADSOT, 2024).

En el volcán Iztaccíhuatl la mayor parte de los estudios se centran en la historia de los depósitos volcánicos para establecer la morfología actual y su edad (Nixon, 1989; Siebe *et al.*, 1995; García-Tenorio, 2002). Además, se han hecho estudios cartográficos-geomorfológicos donde se ha definido que está compuesto por 42 formas geomorfológicas, según su génesis endógena o exógena (Sánchez-García, 2018). Por otro lado, el atlas de riesgos naturales del municipio de Huejotzingo incluye PRM de flujos y deslizamientos de detritos, concentrados en las faldas con las mayores elevaciones y pendientes del volcán Iztaccíhuatl, donde los depósitos volcánicos poco consolidados y meteorizados ofrece poca resistencia a la lluvia y a los terremotos (SEDATU, 2016).

En la actualidad no existe un inventario cartográfico de los PRM que contenga datos geográficos o bases de datos geoespaciales, y mucho menos mapas de susceptibilidad de estos procesos que ocurren en las laderas del volcán Iztaccíhuatl. Por esta razón, este artículo aborda el problema de

la cartografía y el modelado de los PRM a través de un inventario multitemporal y modelado de inestabilidad de PRM mediante el uso de regresión logística múltiple (RLM).

La cuenca del río Xopanac, en el flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl, se seleccionó como área de estudio por ser susceptible a los PRM que afectan los asentamientos humanos y sus actividades productivas. La cartografía multitemporal de estos procesos permitió evaluar y describir la distribución de más de treientos PRM de acuerdo con los lineamientos del protocolo de zonificación cartográfica del peligro de deslizamientos de la Washington State Department of Natural Resources (DNR) (Forest Practices Division, 2006). Estos lineamientos tienen un enfoque práctico y han sido probados con éxito en otras áreas (Cashman y Brunengo, 2006). En el caso de la RLM, la evaluación del modelo ha demostrado en otras investigaciones a nivel mundial ser exitosa para analizar y cartografiar la presencia o ausencia de estos procesos si se utilizan variables predictoras fuertemente relacionadas (por ejemplo, litología, sismicidad, etc.) con los PRM (Ohlmacher y Davis 2003; Can *et al.*, 2005; Sujatha y Sridhar, 2021; Cemiloglu *et al.*, 2023). Sin embargo, en zonas remotas de México no siempre es posible la obtención de variables que contribuyan al modelo en la predicción de áreas susceptibles (Legorreta *et al.*, 2010; Legorreta *et al.*, 2013). En este estudio, el análisis de susceptibilidad con RLM se basó en el uso de cinco variables temáticas predictoras (dos topográficas, dos geomorfológicas y una ambiental) de fácil obtención que pueden ser obtenidas o derivadas en zonas remotas de México. El modelo resultante es estadísticamente válido, al

demonstran su efectividad con más del 80% de los deslizamientos pronosticados correctamente por el modelo. Se presenta y discute la técnica y su implementación ejecutada en un SIG.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Xopanac se encuentra en el flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl, en la parte central de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y dentro del estado de Puebla, México (Figura 1). El volcán Iztaccíhuatl es el tercer estratovolcán más alto de México y pertenece a la Sierra Nevada, la cual divide la Cuenca de México al oeste de la cuenca Puebla-Tlaxcala al este. Sus laderas y sistema fluvial radial y paralelo presentan una gran amenaza potencial por la formación de los PRM provocados, además de por lluvias y sismos, por la actividad antrópica acelerada (SEDATU, 2016; SMADSOT, 2024).

La cuenca hidrográfica del río Xopanac se ubica entre los 19°08'05"-19°09'06" de latitud N y 98°32'02"-98°26'03" de longitud O, cubriendo un área total de aproximadamente 6.6 km². La elevación del área de estudio oscila entre 2304 y los 2880 m s.n.m. Las laderas presentan fuertes pendientes y valles profundamente disectados con pendientes > 66°, lo que provee escenarios favorables para el desarrollo de los PRM.

Las partes relativamente planas de los valles y las partes cumbres-residuales no disecados y de topografía relativamente plana presentan una pendiente < 5°. La litología expuesta a lo largo del

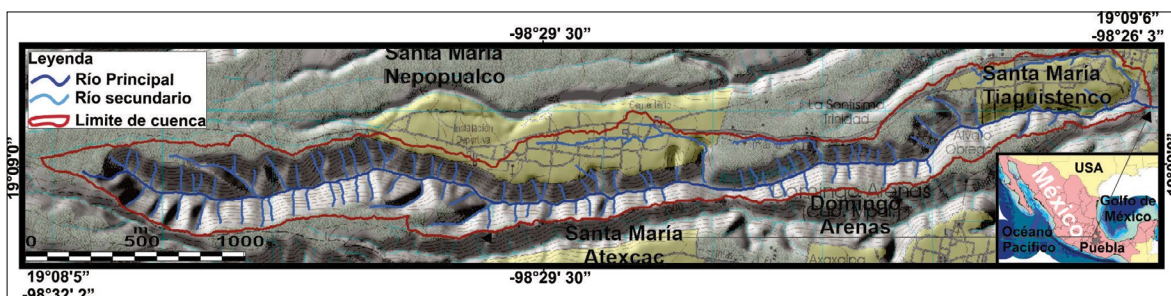


Figura 1. Área de estudio, cuenca del río Xopanac, Estado de Puebla, México. Fuente: elaboración propia.

río Xopanac consiste en depósitos de avalanchas volcánicas del Pleistoceno (Macías *et al.*, 2012) y flujos piroclásticos con matriz de ceniza que sostiene clastos angulosos en tamaños de bloques y fragmentos de roca andesítica y pómez pertenecientes al colapso de un posible domo. El depósito de avalanchas está coronado por secuencias cuaternarias de flujos piroclásticos, flujos de pómez y ceniza, depósitos de caída, oleadas piroclásticas y varias terrazas de lahares (García-Tenorio, 2008; Macías *et al.*, 2012). Dicho río es un afluente de tercer orden del río Atoyac, que desemboca en el océano Pacífico. El clima se clasifica en subtropical semifrío (C(E)(w2)) a 2300-2750 m s.n.m., y subtropical templado, subhúmedo (C(w2)) a > 2750 m s.n.m. (INEGI, 2008). La precipitación media anual de la zona ronda los 1055 mm (Gobierno de México, 2024). La mayor cantidad de lluvias se produce durante las tormentas estacionales entre mayo y noviembre. El área de estudio es proclive a los PRM debido a la interacción de varios factores: pendientes pronunciadas y abruptas, lluvias intensas, terremotos tecto-volcánicos, sismos locales por la vecindad del muy activo volcán Popocatepetl y actividad antrópica (SEDATU, 2016; SMADSOT, 2024).

MÉTODO

El método seguido en este estudio consta de tres etapas principales: a) preparación de datos, b) modelado de susceptibilidad a PRM y c) evaluación del modelo de susceptibilidad.

En la primera etapa se creó un mapa inventario de PRM. Se recolectó y analizó la información existente para brindar contexto a los procesos gravitacionales y la posible causa natural o antrópica que permitió su desarrollo, así como para definir y caracterizar los PRM a lo largo de la cuenca. Las fuentes de datos incluyen materiales analógicos y digitales. La información incluyó informes; mapas de clima a escala 1:250,000 (INEGI, 1985); uso del suelo a escala 1:100.000 (CONABIO, 2015); geología, y topografía a escala 1:50 000 (INEGI, 1983, 2018), todos ellos con proyección UTM y datum ITRF-2008. Cada uno de los mapas se

transformaron a un formato ráster de 5 m de resolución, se georreferenciaron y se incorporaron como capas SIG en ArcMap. Se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) LiDAR de 5 m de resolución (INEGI 2016 a,b,c). Con este modelo se elaboraron los mapas de pendiente, densidad de disección y de erosión vertical. El mapa de pendiente se calculó en grados con el SIG, utilizando un núcleo de vecindad de 3 por 3 celdas para obtener la tasa máxima del cambio del valor de la pendiente de una celda con relación a sus celdas aledañas, en el módulo de pendiente del ArcMap (ESRI, 2004). El mapa de densidad de drenaje, definido como la longitud total de cauces (*talwegs*) por unidad de área (Lugo, 1988), se calculó dividiendo el área de estudio en una cuadrícula de celdas de 1 km², y en cada una de estas cuadrículas se obtuvo la longitud de total de corrientes. Los valores obtenidos fueron interpolados mediante kriging (Tucker *et al.*, 2001; Pourghasemi y Rahmati, 2018; García *et al.*, 2018). El mapa de erosión vertical o profundidad de la disección expresa la máxima altura vertical entre el parteaguas y la parte más baja de un río (*talweg*) por área que, igual que en el mapa de densidad de disección, se propuso utilizar un superficie de 1 km², acorde con la escala, y en cada una de ellas se obtuvo la distancia vertical máxima. Los valores obtenidos fueron interpolados mediante kriging (Tucker *et al.*, 2001; Aceves-Quesada *et al.*, 2013; Pourghasemi y Rahmati, 2018; García *et al.*, 2018). El método de la profundidad de la disección, junto al método de la densidad de drenaje, nos permite evaluar la intensidad con que los procesos fluviales han cortado el relieve (Lugo, 1988). Cuanto más altos sean sus valores, más susceptibles a los PRM. Se utilizaron dos conjuntos de fotografías aéreas digitales: de 1993 y 1995 a escala 1:20.000, así como una imagen de Google Earth de 2001 y Planet de 2022 (Equipo Planeta, 2017). Las capas digitales se utilizaron para crear un mapa base en ArcGIS y ayudar durante la interpretación y cartografía de los PRM. Los procesos se cartografiaron siguiendo los lineamientos de zonificación cartográfica del peligro de deslizamientos de la División de Prácticas Forestales del Departamento de Recursos Naturales del estado de Washington (Forest Practices Division, 2006), quien, a su vez,

compila y toma los criterios de Cruden y Varnes (1996) y Wieczorek (1984).

Los PRM fueron inventariados y catalogados como sigue: deslizamientos superficiales no diferenciados (generalmente de menos de 3 m de profundidad), flujos de detritos, deslizamientos de detritos, deslizamientos profundos (>3 m), flujos de tierra y caídas de rocas. Se cartografió en el SIG, cuando fue posible, el escarpe principal del proceso gravitacional, el cuerpo principal y su depósito (estos dos últimos no siempre fueron visibles tanto en campo como en gabinete). La interpretación de las capas digitales para la cartografía de los PRM contó con la ayuda del trabajo de campo. Se realizaron seis sesiones de trabajo de campo por año, entre 2022 y 2024, a lo largo del río principal y de algunos secundarios. Con ello se validó la fotointerpretación, la cartografía de los procesos y se verificó el modelo de susceptibilidad. En este estudio se cartografiaron más de 300 PRM a partir de fotografías aéreas y verificación durante el trabajo de campo. A la par se elaboró una base de datos geoespacial con los atributos observados de los procesos cartografiados. En el SIG se registró en forma de base de datos geográfica la siguiente información: 1) etiqueta de identificación específica del proceso gravitacional; 2) tipo de proceso; 3) nivel de certidumbre de la observación; 4) tamaño del proceso gravitacional (con cinco rangos de área que van desde muy pequeños hasta muy grandes); 5) actividad del proceso gravitacional; 6) partes del proceso gravitacional (escarpe principal, cuerpo y depósito); (6) pendiente del terreno medida en campo; 7) cota de despegue; 8) área y 9) comentarios del investigador.

En la segunda etapa se calculó la susceptibilidad a los PRM utilizando el modelo de RLM. El modelo está diseñado para estimar la probabilidad de ocurrencia de los PRM relacionando la variable dependiente (proceso gravitacional) con una diversidad de variables predictoras geo-ambientales (Guzzetti *et al.*, 2005). En la RLM, los PRM se clasifican como variable dicotómica (1 o 0), donde uno representa la presencia del proceso y cero la ausencia del proceso gravitacional. En este modelo de RLM, la falta de relación lineal entre las variables se supera mediante el uso de la transformación logarítmica

(Kleinbaum y Klein, 2002). El análisis se realizó de la siguiente manera:

- A. En el modelo RLM se utilizaron cinco variables independientes para el análisis (altimetría, pendiente, densidad de drenaje, erosión vertical y uso del suelo). Estas fueron codificadas o utilizadas sin codificar para el análisis (Tabla 1).
- B. Con un nivel de confianza del 95%, se muestreó aleatoriamente el 5 % del área total de todos los escarpes de los PRM y se muestreó aleatoriamente la misma área espacial para las zonas sin inestabilidad de laderas (Bartlett *et al.*, 2001).
- C. Con las áreas muestreadas, se creó un mapa máscara, codificado con valores de 0 y 1 en áreas con y sin PRM, respectivamente.
- D. Se realizó una superposición digital entre el mapa máscara y los cinco mapas de las variables independientes. La superposición se utilizó para muestrear y extraer todos los parámetros para calcular la RLM.
- E. Se generó una tabla ASCII con los parámetros obtenidos y se importó al programa SPSS para realizar el análisis de RLM.
- F. Las variables independientes se probaron para el diagnóstico de multicolinealidad utilizando el factor de inflación de la varianza (FIV) (Pallant, 2020). La erosión vertical se eliminó en función de su FIV.
- G. Después de la evaluación de la multicolinealidad, el análisis de susceptibilidad se calculó utilizando la RLM con método inverso utilizando el paquete estadístico SPSS. El método inverso de la RLM consiste en analizar dentro del modelo todas las variables independientes para distinguir si alguna de ellas debe ser suprimida del estudio.
- H. La RLM inicia con todas las variables independientes y las va considerando una a una para ver cuál puede ser suprimida sin tener una consecuencia importante sobre el ajuste correcto que el modelo de RLM hace de los datos observados (Field, 2024). La RLM fue analizada con base en estadísticas intrínsecas del modelo (prueba Hosmer y Lemeshow,

prueba de significancia de Wald, etc.), las cuales permiten evaluar por sí mismas si el modelo de la RLM fue o no estadísticamente válido (Field, 2024). La susceptibilidad de PRM se calculó con base en la probabilidad obtenida de la función de la RLM: $1 / (1 + (\text{Exp}(- (1.449 + \text{Mapa de elevación} * -0.003) + (\text{Mapa de pendiente} * 0.099) + (\text{Mapa de densidad de drenaje} * 0.936) + (\text{Mapa de uso del suelo} * 0.158))))$ usando la calculadora de ArcMap. El mapa de susceptibilidad a PRM resultante se expresó utilizando diez clases con puntos de ruptura subjetivos de incrementos del 10 %.

I.
Tabla 1. Variables utilizadas.

Variable	Índice
Elevación	
Datos fuente originales (sin clasificar).	No codificada
Pendiente	
Datos fuente originales (sin clasificar).	No codificada
Densidad de drenaje	
Datos fuente originales (sin clasificar).	No codificada
Erosión vertical	
Datos fuente originales (sin clasificar).	No codificada
Uso del suelo	
Bosque de coníferas	1
Bosque de latifoleadas caducifoleo	2
Matorral tropical subtropical	3
Matorral templado o subpolar	4
Pastizal templado o subpolar	5
Suelo agrícola	6
Suelo desnudo	7
Asentamiento humano y carreteras	8
Cuerpo de agua	9

Para el paso final se utilizó el área bajo la curva (AUC) de la característica operativa del receptor (COR) para analizar la precisión del modelo de susceptibilidad. El AUC es un indicador estándar utilizado para evaluar la capacidad de pronóstico espacial del modelo (Xiao *et al.*, 2020). El AUC indica la precisión general de los valores predictivos al

describir su capacidad para estimar correctamente los eventos que se han producido (deslizamientos) o no (no ocurrencia de deslizamientos). Así, los valores del AUC varían de 0 a 1, de modo que cuanto más cerca esté el valor numérico del AUC de 1, mayor será la precisión general y cuanto más cerca de 0, más baja precisión y, por lo tanto, más error (Xiao *et al.*, 2020; Chowdhury *et al.*, 2024). Estudios previos señalan que un AUC entre 0.75 y 0.8 corresponden a un modelo de susceptibilidad aceptable, valores de AUC entre 0.8 y 0.9 indican un modelo bueno y, valores > 0.9 representan modelo excelente (Guzzetti *et al.*, 2005).

El AUC se calculó en SPSS, asignando a los PRM del inventario valores positivos y el resto del área a valores negativos. El AUC se establece diseñando en un gráfico bidimensional los pares de sensibilidad y especificidad. La sensibilidad es el número de píxeles acertadamente clasificados en la categoría de PRM con respecto a la cantidad total de píxeles de PRM verdaderos. La especificidad es el número de píxeles de no presencia de PRM clasificados incorrectamente en la categoría de ausencia de PRM con respecto al número total de píxeles de no presencia de PRM verdaderos (Günther *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la creación del inventario de PRM las capas temáticas de distinta escala disponible, compiladas e incorporadas en el SIG, permitieron establecer una caracterización generalizada de los procesos gravitacionales y así facilitar su cartografía, análisis e interpretación. La alternancia de activar y desactivar visualmente las capas temáticas en el SIG permitió crear un mapa base para ayudar en el proceso de digitalización, así como permitir una primera selección de las variables a usar en el modelo de susceptibilidad. Así, por ejemplo, la carta de clima 1:250 000 ayudó a la caracterización del patrón regional de lluvias y temperatura de la cuenca, pero no fue posible utilizarla en el modelo de susceptibilidad debido a que su información, al ser demasiado generalizada con relación al tamaño de la cuenca, no permitió caracterizar áreas con y

sin PRM.

A través de la valoración de la cuenca del río El Xopanac, se inventariaron 362 procesos gravitacionales (Figura 2), de los cuales el 86.7 % corresponde a deslizamientos superficiales (incluidos los superficiales indiferenciados, los deslizamientos de detritos y los flujos de detritos), seguidos por los deslizamientos profundos y flujos de tierra (13.3 %). De todos ellos, el 94.5 % fueron clasificados como definitivos y el 5.5 % como probables. Los PRM definitivos son aquellos cuyo grado de certeza de la observación del autor (investigador) de la información está seguro de que se trata de un proceso gravitacional, y probable cuando el investigador está casi seguro de que se trataba de un proceso gravitacional (Tabla 2).

El trabajo de campo y el mapa geológico muestran una distribución homogénea de varias secuencias de depósitos de explosiones laterales y colapsos pertenecientes al volcán Iztaccíhuatl, por

lo que la geología en toda la cuenca es la misma. En general, desde el *talweg* hasta la divisoria hay un depósito de detritos por avalancha. El depósito presenta clastos angulares de bloques y fragmentos de roca perteneciente a un posible domo. A este depósito basal le siguen secuencias de flujos y caídas piroclásticas (Figura 3). Las últimas secuencias son terrazas formadas por capas de lahares, flujos de cenizas y depósitos de caída y oleadas piroclásticas interestratificadas.

Existe una diferencia muy marcada entre el margen izquierdo y derecho del cauce del río principal (considerado la dirección del flujo de agua) (Figura 3a). El análisis muestra que el 89.2 % de los PRM cartografiados se encuentran en la margen izquierda. Esta mayor actividad de deslizamientos puede ser atribuida más que a la litología (por ser relativamente homogénea en ambos márgenes), a los cambios en el uso del suelo, en particular los relacionados con la deforestación, la agricultura

Tabla 2. Número y área de PRM cartografiados y nivel de certeza en su identificación.

Tipo de proceso gravitacional	# de PRM	Área (km ²)	% PRM definitivos	% PRM probables
Deslizamientos superficiales no diferenciados	123	0.03	30.7	3.3
Flujos de escombros	166	0.03	45.6	0.3
Deslizamientos de detritos	25	0.01	6.9	0
Deslizamientos profundos	47	0.09	11	1.9
Flujos de tierra	1	0.03	0.3	0
Total	362	0.19	5.5	94.5

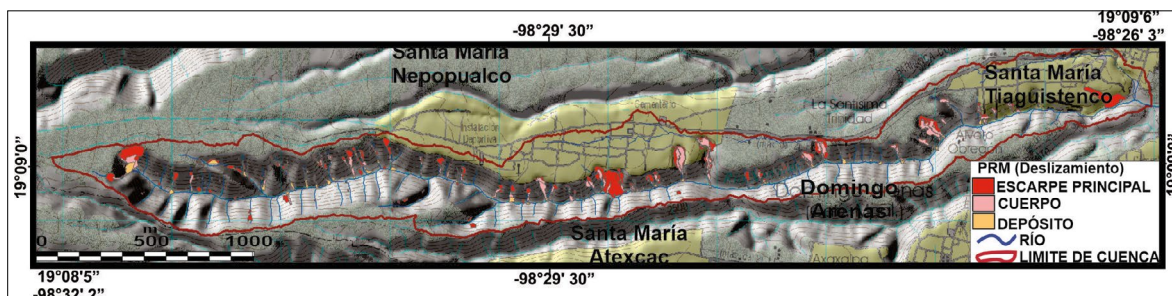


Figura 2. Inventario de PRM de la cuenca del río Xopanac. Fuente: elaboración propia.

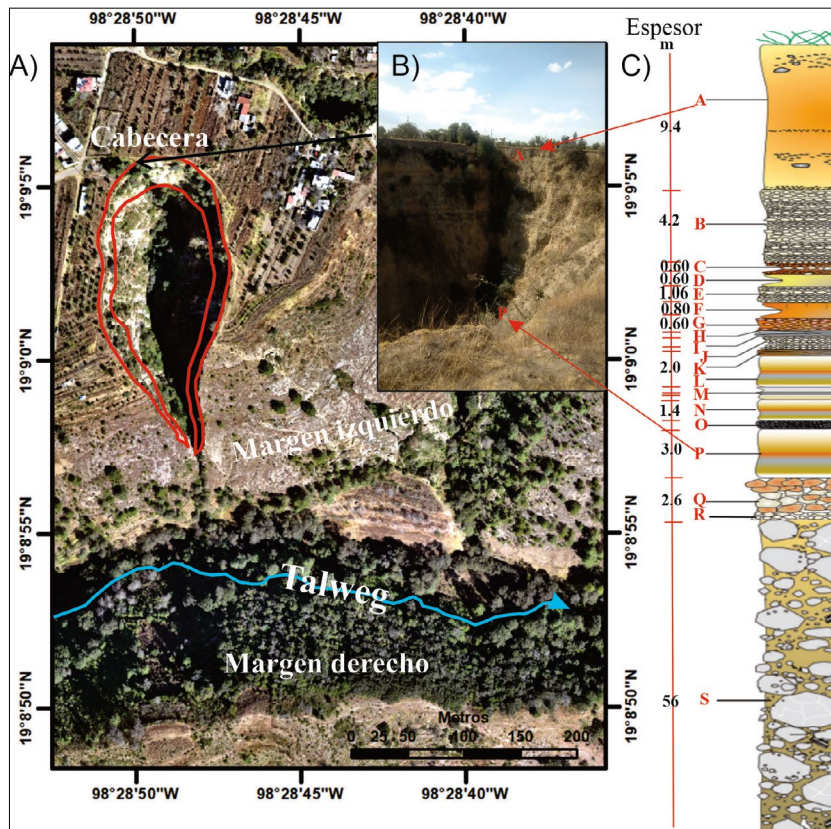


Figura 3. A) Diferencias en la cobertura del uso del suelo a lo largo de las márgenes derecha e izquierda del río. B) Deslizamiento de detritos provocado por la sismicidad y por la actividad antrópica. C) Columna estratigráfica, donde la letra A representa al suelo y diversas capas de lahares seguida de secuencias (letras B a P) de depósitos de caída, oleadas y flujos piroclásticos alternados y asociados a la misma erupción, mientras que las letras de la Q a la S representan los depósitos basales constituidos por una avalancha de escombros.

de subsistencia y la urbanización. En la cuenca, la agricultura es el uso de suelo predominante (44.3 %), seguida de bosques de coníferas y caducifolios (39.3 %), arbustos (8.4 %), asentamientos humanos y caminos (7.4 %) y pastizales (0.65 %).

La mayor parte de la infraestructura humana y la agricultura se desarrollan en las laderas de la margen izquierda del río. Mientras que en su margen derecha las laderas están cubiertas de bosques y matorrales, y con menor actividad antrópica. Durante el trabajo de campo se observó que algunas de las construcciones aledañas al cause principal, en Santa María Nepopoalco, desfogan sus aguas residuales hacia los escarpes de deslizamientos y realizan prácticas inadecuadas de sembrado al trazar los surcos siguiendo la pendiente. Lo anterior reduce la capacidad de absorción de agua en las laderas e incrementa la erosión, lo que a su vez puede desencadenar deslizamientos.

Las variables (elevación, pendiente, densidad de drenaje, erosión vertical y uso del suelo) se uti-

lizaron para construir el modelo de susceptibilidad a los PRM. El modelo de RLM incluyó todas las variables seleccionadas, excepto la erosión vertical, debido a que mostró un grave problema de multicolinealidad con un FIV mayor a 10. El FIV (Tabla 3) reveló que las cuatro variables restantes se pueden usar en el análisis RLM, dado que están fuertemente relacionadas con la probabilidad de distribución de la variable dependiente (existencia o no de PRM), pero no fuertemente relacionadas entre sí.

Las pruebas estadísticas intrínsecas del modelo de RLM mostraron que la intersección α y los coeficientes β eran lo bastante fuertes como para que el modelo fuera estadísticamente válido (Tabla 3). Las estadísticas de validación del modelo indican que la RLM es confiable. La prueba de Hosmer y Lemeshow arroja resultados no significativos (0.022). Por lo tanto, los valores de las cuatro variables independientes en el modelo no difieren significativamente de los datos del mapa y puede pronosticar bastante bien lo observado en

la realidad. La confiabilidad de la intersección α y los coeficientes β se evaluaron con una prueba de Wald (Wald en la Tabla 3) y los valores 'WSig'. En esta prueba todas las variables independientes presentaron valores inferiores a 0.05, lo que significa que las variables hacen una contribución importante al modelo. Aunque el modelo de RLM fue estadísticamente válido, no toda la variabilidad de los deslizamientos es explicada por las variables seleccionadas. El uso de otras variables como sismi-

cidad, geoformas, litología, etc., podrían aumentar la presión del modelo cuando los datos de estas variables estén disponibles en áreas remotas o la escala espacial sea apropiada para su uso.

Con la estimación del intercepto α y los coeficientes β para las variables se cartografió la probabilidad de PRM celda por celda con base en la función logit. El mapa de susceptibilidad a PRM resultante se clasifica en diez categorías de zonas de probabilidad (Figura 4).

Table 3. Coeficientes, función logit y pruebas estadísticas de la RLM.

MLR (método inverso)									
							95% C.I. for EXP(B)		Colinealidad
Variable	Coeficiente	S.E.	Wald	df	WSig	Exp(B)	bajo	superior	
Interceptor	1.449	1.871	0.600	1	4.4E-01	4.261			FIV
Elevación	-0.003	0.001	13.719	1	2.1E-04	0.997	0.996	0.999	1.255
Pendiente	0.099	0.008	136.831	1	1.3E-31	1.104	1.086	1.123	1.259
Densidad de drenaje	0.936	0.119	62.321	1	2.9E-15	2.550	2.021	3.217	1.065
Uso de suelo	0.158	0.045	12.268	1	4.6E-04	1.171	1.072	1.280	1.475
Función Logit	1 / 1 + Exp(-1.449 + Mapa de Elevación (-0.003) + Mapa de pendiente (0.099) + Mapa de densidad de disección (0.936) + Mapa de uso de suelo (0.158)))								
				Modelo			Prueba Hosmer y Lemeshow		
% global de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square	Chi-cuadrada	df	Sig.	Chi-square	df	HLSig.
75.500	771.116	0.283	0.378	243.652	4	0.000	17.950	8	0.022

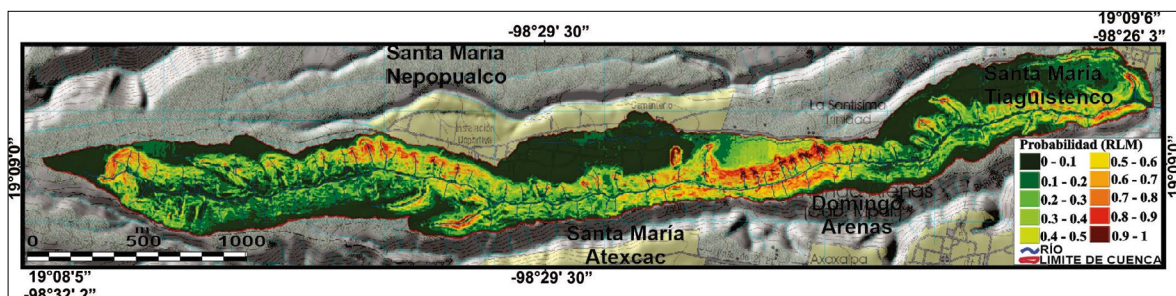


Figura 4. Modelo de susceptibilidad a PRM. Fuente: elaboración propia.

Cualitativamente, el modelo muestra áreas de alta inestabilidad en las zonas montañosas cubiertas con depósitos piroclásticos mal consolidados y a lo largo de las laderas del valle donde se presentan pendientes pronunciadas. Sin embargo, este patrón es más diferenciado en la porción centro-norte de la cuenca, donde la probabilidad es mayor en las vertientes de las laderas del margen izquierdo. Cuantitativamente, el modelo predice un 10.2% de susceptibilidad a PRM en la margen izquierda del río y un 4.4% en la margen derecha. Cuantitativamente, el desempeño de los modelos se evaluó en términos del área bajo la curva (AUC). El AUC indica una capacidad predictiva alta para el modelo de RLM (80.2 %).

CONCLUSIONES

En este artículo presentamos y revisamos el uso de un método para cartografía de PRM y de estimación de susceptibilidad. Se destaca como un enfoque eficaz la cartografía de deslizamiento y la aplicación de la RLM en el modelado de la susceptibilidad en la cuenca del río Xopanac. Para la creación del inventario y su posterior análisis, se registraron y verificaron eventos históricos de PRM mediante trabajo de campo e imágenes de percepción remota. Este procedimiento se fundamenta en la estandarización y combinación de mapas temáticos y sus bases de datos geoespaciales dentro del sistema de información geográfica ArcMap.

La evaluación en el río Xopanac es un intento por identificar y seleccionar factores que promueven estos procesos en regiones volcánicas de México con escasa información cartográfica y ambiental. Estos factores incluyen elevación, ángulo de pendiente, densidad de drenaje y uso del suelo. Estos factores representan los elementos morfológicos y humanos que influyen en la ocurrencia de PRM. El inventario de PRM permitió no solo observar la distribución, abundancia, y tipos de PRM a lo largo de la cuenca, sino también hacer notar que las laderas del flanco izquierdo del río son más propensas a la inestabilidad debido no solo a sus pendientes pronunciadas y depósitos volcánicos sueltos, sino también al uso antropogénico del sue-

lo. La interferencia antropogénica es un elemento muy importante, ya que en las laderas del margen izquierdo existen zonas densamente urbanizadas, adyacentes a las principales carreteras y áreas agrícolas que han perturbado los bosques y facilitado la inestabilidad de las laderas, al poner sobre peso a las mismas y canalizar aguas negras a la barranca.

Se utilizó el modelo de regresión logística para valorar el impacto de los factores físicos y ambientales seleccionados en la inestabilidad de las laderas. El mapa de susceptibilidad a PRM obtenido con la RLM indica la distribución espacial de la susceptibilidad mediante diversos grados de probabilidad a estos procesos. La distribución espacial de las clases de susceptibilidad en la región basada en el modelo de regresión logística muestra que casi el 14.6 % del área de la cuenca está clasificada como altamente inestable.

También el inventario sirvió como referencia para comparar y contrastar las áreas susceptibles predichas por el modelo como propensas a los PRM.

La validación del modelo, derivada del AUC, muestra un poder de predicción buena con 80.2 % de acierto. Sin embargo, es necesario señalar que un valor AUC alto no garantiza que los resultados del modelo sean razonables o realistas en términos de identificación de áreas susceptibles o no a deslizamientos, sino que un valor alto de AUC indica que el modelo es implementado y opera correctamente. Es decir, nos indica una mejor discriminación entre las dos clases (deslizamientos y zonas sin deslizamientos) e implica que el modelo puede diferenciar entre áreas con diferentes susceptibilidades. No obstante, la precisión y validez del mapa de susceptibilidad dependerán de varios factores que incluyen el tipo de muestreo para entrenar al modelo de RLM, la disponibilidad de las variables de entrada y las limitaciones intrínsecas del modelo de RLM. Así, por ejemplo, pese a que la litología juega un papel importante, no fue posible utilizarla, ya que las estadísticas obtenidas para esta variable a escala 1:50 000 la descartaron, al ser totalmente homogénea y no pudo proporcionar ningún poder de diagnóstico.

A pesar de sus limitaciones, el inventario de PRM y el modelado de la susceptibilidad a estos procesos del río Xopanac poseen el potencial de

dar una guía metodológica para manejar y respaldar estudios de inestabilidad de laderas. Al abordar un método cartográfico geomorfológico y modelado de susceptibilidad a escala de cuenca, las autoridades locales de Puebla, como las agencias de protección civil de dicha entidad y otras organizaciones gubernamentales, se beneficiarán con respecto a la planificación y mitigación de los PRM.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades al Laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía de la UNAM por su ayuda en la adquisición de las imágenes PLANET y al International Programme on Landslides (IPL #281) por su aprobación y ayuda. Esta investigación fue apoyada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), Beca UNAM no. IN100223.

REFERENCIAS

- Aceves-Quesada, J. F., Luna, V. M. M. y Paulín, G. L. (2013). Gravitational processes in the eastern flank of the Nevado de Toluca México. En *Landslide Science and Practice: Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning* (pp. 211-219). Springer.
- Alcántara-Ayala, I. y Garnica-Peña, R. (2016). Impacto social de los desastres por procesos de remoción en masa. En O. Moncada Maya y Á. López López (Coords.), *Geografía de México: una reflexión espacial contemporánea* (pp. 56-70). Instituto de Geografía, UNAM.
- Aristizábal, E. y Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. *Gestión y Ambiente*, 10(2), 17-30.
- Bartlett, J., Kotlik, J. W. y Higgins, C. C. (2001). Organizational Research: Determining Appropriate Sample Size in Survey Research. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.opalco.com/wp-content/uploads/2014/10/Reading-Sample-Size1.pdf>
- Can, T., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. y Duman, T. Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, (72), 250-271.
- Cashman, B. H. y Brunengo, M. J. (2006). *Landslide hazard zonation project—Mass wasting assessment—Grays Bay, Pacific and Wahkiakum Counties*. Washington Department of Natural Resources, Forest Practices.
- Cemiloglu, A., Zhu, L., Mohammednour, A. B., Azarafza, M. y Nanehkaran, Y. A. (2023). Landslide susceptibility assessment for Maragheh County, Iran, using the logistic regression algorithm. *Land*, 12(7), 1397.
- Chowdhury, M. S., Rahaman, M. N., Sheikh, M. S., Sayeid, M. A., Mahmud, K. H. y Hafsa, B. (2024). GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh. *Heliyon*, 10(1), e23424.
- CONABIO. (2015). Cobertura del Suelo de México a 30 metros. Esc. 1:100,000 Accesado: 02-10-2023 de: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/nalcmsmx15gw.html>
- Cruden, D. M. y Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. En A. K. Turner y R. L. Shuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy of Sciences.
- ESRI. (2004). How Slope Works. Help. ArcGIS 10.8.2. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm#:~:text=The%20Slope%20tool%20identifies%20the,value%2C%20the%20steeper%20the%20terrain>. Último acceso: 02-27-2024
- Equipo Planeta. (2017). Interfaz del programa de aplicación Planeta: en el espacio para la vida en la Tierra. <https://api.planet.com>
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics*. SAGE Publications Limited.
- Forest Practices Division. (2006). Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol, version 2.0. Washington State Department of Natural Resources (DNR). http://www.dnr.wa.gov/BusinessPermits/Topics/LandslideHazardZonation/Pages/fp_lhz_review.aspx.
- García, R. S., Legorreta, P. G. y Aceves, Q. F. (2018). Susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas*, (96), 0-0.
- García-Tenorio, F. (2002). *Estratigrafía y petrografía del complejo volcánico Iztaccíhuatl*. [Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México].
- García-Tenorio, F. (2008) *Avalancha de detritos del pleistoceno tardío del cono Los Pies, complejo volcánico*

- Iztaccíhuatl*. [Tesis de Maestría. Escuela Superior de Ingeniería, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional, México].
- Gobierno de México. (2024). Lluvia menor 500 mm. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/266747/LLUVIA_MENOR_1500_MM_OK_C.pdf. Último acceso: 04-26-2024.
- 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., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. y Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1-4), 272-299.
- INEGI. (1983). Carta geológica. Huejotzingo. E14B42. Esc. 1:50 000.
- INEGI. (1985). Carta de efectos climáticos regionales noviembre-abril. Ciudad de México E14-2. Esc. 1:250 000.
- INEGI. (1985). Carta de efectos climáticos regionales noviembre-abril. Ciudad de México E14-2. Esc. 1:250 000.
- INEGI. (2008). Conjunto de datos geográficos de la carta de clima, 1:1000000. En línea: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>. Último acceso: 08-15-2023.
- INEGI. (2016a). Modelo Digital de Elevación de Tipo Terreno. e14b42b3.
- INEGI. (2016b). Modelo Digital de Elevación de Tipo Terreno. e14b42b4.
- INEGI. (2016c). Modelo Digital de Elevación de Tipo Terreno. e14b42c3.
- INEGI. (2018). Carta topográfica. Huejotzingo. E14B42. Esc. 1:50,000
- Kleinbaum, D. G. y Klein, M. (2002). *Analysis of matched data using logistic regression. Logistic regression: A self-learning text* (2a. ed.). Springer.
- Legorreta, P. G., Bursik, M., Lugo-Hubp, J. y Orozco, J. Z. (2010). Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(3-5), 137-148.
- Legorreta, P. G., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M.T., Lugo-Hubp, J., Orozco, J. Z. y Alcántara-Ayala, I. (2013). Landslide Inventory and Susceptibility Mapping in a Mexican Stratovolcano. En *Landslide Science and Practice: Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning* (pp. 141-146). Springer.
- Lugo, H. J. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada. Métodos cartográficos*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Macías, J. L., Arce, J. L., García-Tenorio, F., Layer, P. W., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., López-Pizaña, F. y Avellán, D. (2012). Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico. En J. J. Aranda-Gómez, G. Tolson y R. S. Molina Garza (Eds.), *The southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field Guide* 25 (pp. 163-193).
- Nixon, G. T. (1989). The geology of Iztaccíhuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico. *Geological Society of America*, 219, 1-59.
- Ohlmacher, G. C. y Davis, J. C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, (69), 331-343.
- Pallant, J. (2020). SPSS survival manual: A step by step guide to data analysis using IBM SPSS (7a. ed.). Routledge, Open University Press.
- Pourghasemi, H. R. y Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, (162), 177-192.
- Sánchez-García, K. R. (2018). Cartografía geomorfológica del volcán de Iztaccíhuatl, México. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/175054>.
- SEDATU. (2016). *Atlas de Peligros y/o Riesgos del Municipio de Huejotzingo 2015*. H. Ayuntamiento Municipal de Huejotzingo, Puebla. https://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2015/21074_Atlas_Huejotzingo.pdf.
- Siebe, C., Macías, J. L., Abrams, M., Rodríguez, S., Castro, R. y Delgado, H. (1995). Quaternary explosive volcanism and pyroclastic deposits in east central Mexico: implications for future hazards. En *Guidebook of geological excursions: in conjunction with the Annual Meeting of the Geological Society of America* (pp. 1-48).
- SMADSOT. (2024). *Programa Municipal de Resiliencia Huejotzingo*. Secretaría de Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclefindmkaj/https://smadsot.puebla.gob.mx/images/riesgos/Actualizacion/Municipios/ACTUALIZACION/03PMR_Huejotzingo.pdf
- Sujatha, E. R. y Sridhar, V. (2021). Landslide susceptibility analysis: A logistic regression model case study in Coonoor, India. *Hydrology*, 8(1), 41.
- Sun, X., Chen, J., Bao, Y., Han, X., Zhan, J. y Peng, W. (2018). Landslide susceptibility mapping using

- logistic regression analysis along the Jinsha river and its tributaries close to Derong and Deqin County, southwestern China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11), 438.
- Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A. y Bras, R. L. (2001). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36(3-4), 187-202.
- Wieczorek, G. F. (1984). Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geology*, (21), 337-342.
- Xiao, T., Segoni, S., Chen, L., Yin, K. y Casagli, N. (2020). A step beyond landslide susceptibility maps: A simple method to investigate and explain the different outcomes obtained by different approaches. *Landslides*, (17), 627-640.