

SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTOS DE TIERRA: CARTOGRAFÍA PARA EL MUNICIPIO TENANCINGO, MÉXICO

Daniel Fernando Gómez Benítez¹ y Alexis Ordaz Hernández^{1*}

1. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, México.

*Autor de correspondencia: aordazh@uaemex.mx

DOI:
<https://doi.org/10.55467/reder.v9i2.203>

RECIBIDO
3 de marzo de 2025

ACEPTADO
15 de abril de 2025

PUBLICADO
1 de julio de 2025

Formato cita Recomendada (APA):
Gómez Benítez, D.F. & Ordaz Hernández, A. (2025). Susceptibilidad frente a deslizamientos de tierra: Cartografía para el municipio Tenancingo, México. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 9(2), 205-221. <https://doi.org/10.55467/reder.v9i2.203>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

RESUMEN

La gestión del riesgo se puede dividir en tres momentos esenciales, reducción del riesgo de desastres, la respuesta frente a la emergencia y la recuperación. Durante la primera de las tres etapas mencionadas se trabaja en incrementar el conocimiento sobre el riesgo y en diseñar medidas estructurales que lo mitiguen (entre otras actividades), pero es imposible encausar de forma coherente estas actividades sin una cartografía confiable que zonifique la amenaza. Justamente, el presente artículo tiene como objetivo elaborar la cartografía de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra en el municipio de Tenancingo (México). El municipio fue severamente afectado en el año 2024 por deslizamientos, los cuales fueron inducidos por una combinación de acciones antrópicas y factores naturales. El trabajo tiene dos aportes fundamentales: (1) demuestra la viabilidad del uso del método estadístico bivariado basado en el índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) en escenarios municipales en México; y (2) la cartografía resultante favorece la toma de decisiones en la planificación territorial y en el diseño de medidas preventivas.

PALABRAS CLAVES

Tenancingo; Susceptibilidad; Deslizamientos; Planificación territorial; México

SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDES: MAPPING FOR THE MUNICIPALITY OF TENANCINGO, MEXICO

ABSTRACT

Risk management can be divided into three essential stages: disaster risk reduction, emergency response, and recovery. During the first of the three stages mentioned the goal is to increase knowledge about risk and design structural measures to mitigate it (among other activities). However, it is impossible to coherently guide these activities without reliable mapping that zones the hazard. The aim of this article is to develop susceptibility mapping for landslides in the municipality of Tenancingo (Mexico). The municipality was severely affected by landslides in 2024, that were induced by a combination of human actions and natural factors. This work has two main contributions: (1) it demonstrates the viability of using the bivariate statistical method based on the Landslide Susceptibility Index (LSI) in municipal scenarios in Mexico, and (2) the resulting mapping supports decision-making in territorial planning and the design of preventive measures.

KEYWORDS

Tenancingo; Susceptibility; Landslides; Territorial planning; Mexico

INTRODUCCIÓN

Los procesos que ocurren en la superficie terrestre inciden directamente sobre la seguridad de las comunidades y la infraestructura que las sustentan. Las amenazas de génesis exógenas y particularmente los deslizamientos han desencadenado tragedias inadmisibles bajo el contexto de avance técnico y comunicacional contemporáneo. El Centro de Investigación en Epidemiología de Desastres [CRED] (2024) reporta en los últimos diez años al menos tres eventos de procesos de remoción en masa con impactos altamente negativos; es el caso de los deslizamientos ocurridos en Sindh (Pakistán, año 2015), en el valle de Bergalia (Suiza, año 2017) y en Kachin (Birmania, en el año 2018), mismos que ocasionaron 13, 8 y 17 muertes respectivamente. A los eventos contenidos en la base de datos del CRED, se debe agregar los lamentables deslizamientos ocurridos al sur de Etiopia ocurridos entre el 21 y 22 de julio de 2024 donde perdieron la vida 257 personas (France24, 2024).

En México, la combinación de las condiciones físicas, con factores subyacentes en especial las inconsistencias en los programas de ordenamiento territorial han materializado eventos imprevistos con un severo impacto. Uno de los trabajos más completos encaminados a recopilar la historicidad de deslizamientos en México (Díaz, 2022), establece que, entre los años 1905 y 2017 ocurrieron aproximadamente 3.007 procesos de remoción en masa, de los cuales 1.979 fueron deslizamientos, 589 flujos de lodo, 15 caídas de rocas, 384 avenidas torrenciales, 36 aluviones, 2 aludes y 2 movimientos complejos. Mientras que, el Atlas Nacional de Riesgos, en su sección “Fenómenos Geotécnicos” describe brevemente cinco deslizamientos que infligieron daños inaceptables: (1) en la comunidad la Barranca Grande, Estado de Veracruz, 03/01/1920, con 1.800 muertes; (2) puerto de Acapulco, Estado de Guerrero, 09/10/1997, 120 muertes; (3) comunidad de Teziutlán, Estado de Puebla, 05/10/1999, 110 muertes; (4) Juan de Grijalva, Estado de Chiapas, 04/11/2007, 19 muertes y 6 desaparecidos; y (5) comunidad la Pintada, Estado de Guerrero, 16/09/2013, 71 muertes (Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, 2024).

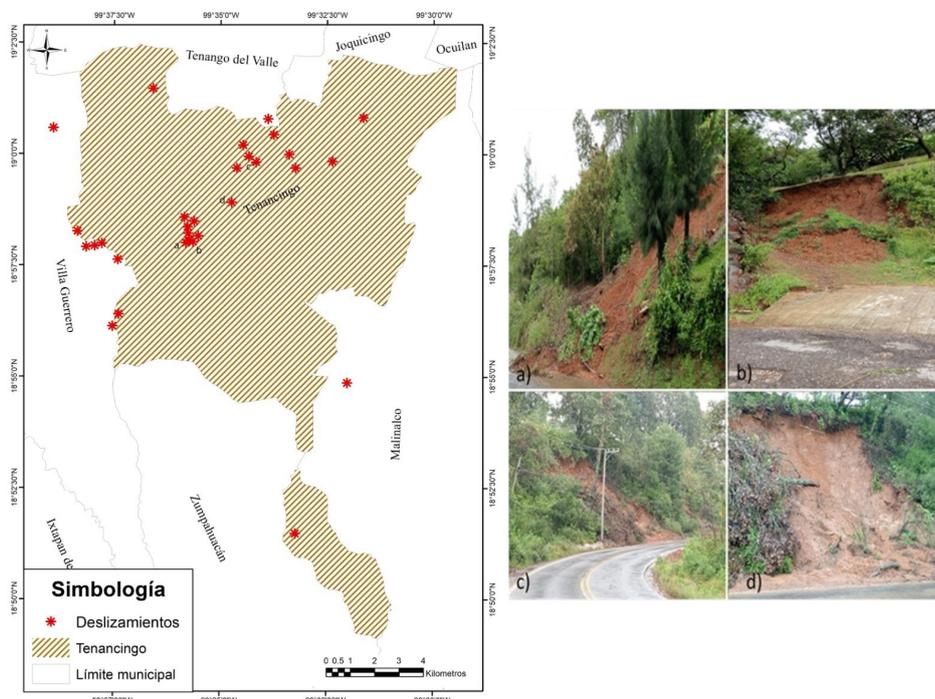


Figura 1. Deslizamientos inventariados en el año 2024

Fuente: Autores, 2025.

Nota: Las fotografías muestran la estrecha correlación de los deslizamientos con las carreteras. Las fotografías (a) y (b) corresponden a deslizamientos ocurridos en el cerro el Cristo y (c) y (d) corresponden a la altura de San Martín Coapaxtongo y Los Morales sobre la carretera Tenango-Tenancingo.

El escenario descrito, indica la clara manifestación del riesgo de desastres por deslizamientos, y sugiere la necesidad de continuar generando productos cartográficos de calidad, que reflejen con exactitud la influencia de los factores condicionantes y desencadenantes. En este sentido, la presente investigación tiene como propósito generar la cartografía de susceptibilidad a

deslizamientos para el municipio Tenancingo (Estado de México). En el municipio confluyen características físicas y antrópicas que provocaron al menos 24 deslizamientos en los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2024 (ver Figura 1).

El producto cartográfico obtenido, permitirá a la Coordinación Estatal de Protección Civil y a las direcciones municipales de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, establecer sinergias bajo un sustento teórico robusto, en al menos dos direcciones: (1) establecer prioridades en la reducción de vulnerabilidades de elementos expuestos, y (2) diseñar una planificación territorial que garantice la seguridad y el desarrollo sustentable.

METODOLOGÍA

Área de estudio

La investigación se focaliza en el municipio de Tenancingo de Degollado, mismo que se encuentra en el sur del Estado de México, colindando con los municipios de Tenango del Valle, Joquicingo, Malinalco, Zumpahuacán y Villa Guerrero (ver Figura 2). El emplazamiento se ubica a una altitud sobre el nivel medio del mar entre 2.200 y 2.700 metros, y representa el 0,73% de la superficie del Estado de México (Ayuntamiento de Tenancingo, 2022a).

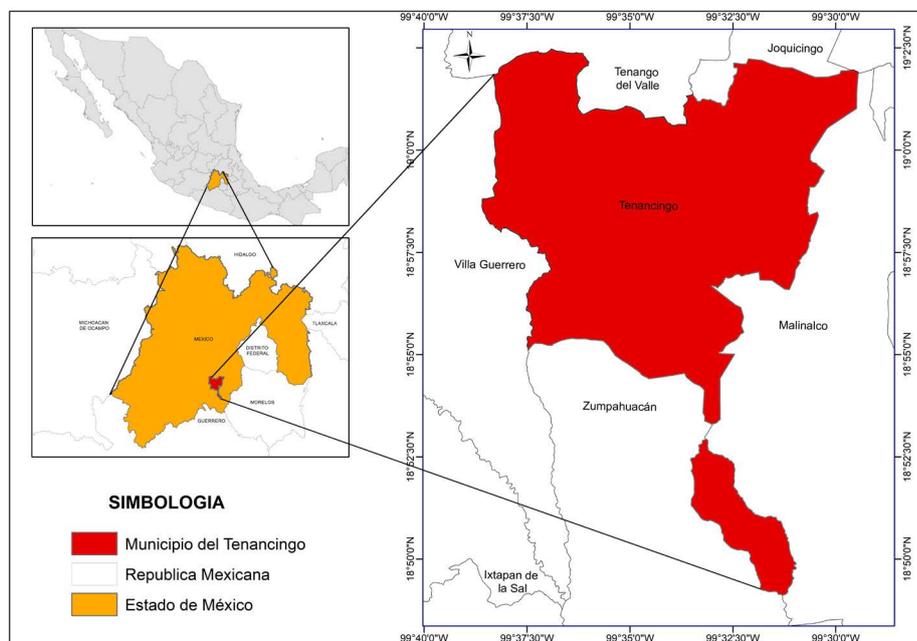


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio
Fuente: Autores, 2025.

El municipio ocupa el primer lugar de la Región XIII Tenancingo en cuanto al número de habitantes, esto de acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2021) con una población de 104.677, que representa el 25,23% para la Región mencionada y un 0,62% de la población estatal. Datos del Plan de Desarrollo Municipal de Tenancingo 2022-2024 indican un crecimiento poblacional sostenido desde la década de los años setentas con una tasa de crecimiento promedio por decenio de 28,43%. Actualmente la densidad de población se aproxima a los 637 hab/km² (Ayuntamiento de Tenancingo, 2022a). A los datos expuestos, se agrega un crecimiento que oscila entre el 2 y el 5% anual de superficie construida. La principal actividad económica de la región y en particular para el municipio, consiste en la agricultura intensiva para la producción de flores. La vía de distribución principal para el comercio de flores, son las carreteras, sin embargo, éstas se ven frecuentemente interrumpidas por los deslizamientos, generando cuantiosas pérdidas económicas a los productores (García, 2024).

En el 51% del área de trabajo afloran rocas ígneas efusivas particularmente basaltos y andesitas del mioceno-pleistoceno (Bonet, 1971 y Ayuntamiento de Tenancingo, 2022b). Esta unidad de génesis volcánica aflora en los poblados de Zacualpan, Ixtapan de la Sal y Tenancingo; consiste en una secuencia de derrames de lavas de composición andesítica con un espesor aproximado de 400 m afectadas por un metamorfismo regional (CONAGUA, 2024a).

En el contexto municipal, aflora también la formación Ayotusco, con edad comprendida entre los 290 y 250 millones de años (Pérmico) que, según Díaz (2019), se conforma por secuencias sedimentarias metamorizadas (calizas foliadas con estratos de cuarcitas, así como pizarras), mismas que afloran en Zacualpan. Las secuencias sedimentarias de la formación Ayotusco se ubica estratigráficamente sobre la unidad esquisto Taxco (135 Ma) y por debajo de la unidad Roca Verde Taxco Viejo (137 Ma); ambas afectadas por metamorfismo regional.

La morfología de la Región XIII Tenancingo, es compleja debido a sus características estructurales. En el sur del municipio, las grandes geoformas de origen sedimentario marino y metamórfico de la Sierra Madre del Sur configuran un paisaje con sierras y valles a altitudes medias y bajas (inferiores a 2.600 msnm). En contraste, la parte norte se conforma de afloramientos de rocas volcánicas (derrames lávicos, andesitas y dacitas) asociadas con las estribaciones del Eje Neovolcánico, que forman edificios volcánicos con altitudes significativamente mayores (superiores a 3.000 msnm) (CONAGUA, 2024a).

El municipio de Tenancingo se encuentra ubicado fisiográficamente en el valle de Ixtapan, constituido por alineaciones montañosas, la topografía preterciaria del centro del valle está cubierta en su mayoría por conglomerados paleógenos y una potente capa de materiales volcánicos y clásticos continentales plio-pleistocénicos, a través de los cuales emergen algunas topofomas constituidas por rocas más antiguas (Bonet, 1971).

La precipitación promedio anual, oscila entre los 800 y 1.500 mm, con acumulados significativos en los meses de agosto y septiembre. Por ejemplo, durante el mes de septiembre del año 2024, de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (2024a), las precipitaciones alcanzaron los 280 mm. En el acumulado descrito, influyó las lluvias relacionadas con el huracán “John” de categoría 3 que impactó el pacífico mexicano, y la saturación del terreno desencadenó al menos 10 deslizamientos en la carretera Tenango–Tenancingo.

Materiales y métodos

La presente metodología tiene como objetivo la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Tenancingo de Degollado, utilizando el enfoque de análisis bivariado. Este método se fundamenta en el índice de susceptibilidad a deslizamientos, con sus iniciales en idioma inglés LSI, que permite identificar áreas de acuerdo a su predisposición a este tipo de fenómenos.

El LSI, es un método estadístico bivariado, altamente confiable atendiendo a su rigor matemático y soportado en evidencias (Aristizábal et al., 2022, Robalino, 2023 y Cargua et al., 2024). Sin embargo, en México y particularmente en los estudios a escala municipal se continúa aplicando el análisis multicriterio soportado en criterios de expertos, justificado probablemente por la poca disponibilidad de inventarios (Serrano, 2018 y Muñoz, 2020). De esta forma, la presente investigación, pretende fomentar la aplicación de métodos más robustos en el contexto mexicano, demostrando la existencia y acceso a la información de los materiales básicos para el desarrollo del método estadístico bivariado.

Los factores que en la generalidad de los casos se consideran son, el ángulo de la pendiente, edafología, litología, uso del suelo, cobertura vegetal, entre otros; que son consideradas variables independientes. Mientras que, la intensidad de las precipitaciones y los procesos neotectónicos (sismicidad) son consideradas variables dependientes. Cada clase de variable se combina con la distribución de los deslizamientos históricos en la zona de estudio (inventario), y los pesos o valores de ponderación se determinan en función de la cantidad de deslizamientos asociados a cada clase de variable (Santamaría et al., 2021).

Dado que, este enfoque depende de una selección subjetiva de las variables y sus pesos, se han propuesto técnicas que estandarizan el proceso de selección de variables y ponderaciones, permitiendo comparar y evaluar los resultados obtenidos. Finalmente, la suma de los puntajes asignados a cada factor que influye en los deslizamientos genera un mapa con valores numéricos, los cuales pueden ser categorizados en diferentes rangos para establecer niveles de susceptibilidad.

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, es necesario contar con información base, que incluye el inventario histórico de deslizamientos en el área de estudio. Además, conforme a las técnicas del método estadístico bivariado, se deben identificar los factores

condicionantes y desencadenantes (Santamaría et al., 2021). Los parámetros seleccionados, en particular para esta investigación, fueron: (1) precipitaciones, (2) factores geológicos, (3) cercanía a infraestructura vial, (4) cobertura boscosa y uso del suelo, (5) factores topográficos y (6) proximidad a cuerpos de agua y ríos.

Inventario de deslizamientos

Los inventarios de deslizamientos históricos o multitemporales son fundamentales para el desarrollo de los métodos estadísticos (Legorreta et al., 2014). El inventario realizado para el caso del municipio Tenancingo, se conforma por datos obtenidos de diferentes fuentes: (1) la fotointerpretación de imágenes de sensores LANDSAT, ASTER y SPOT, (2) deslizamientos reportados en el Atlas de riesgo municipal, (3) deslizamientos identificados en campo por los autores de este trabajo, y (4) notas periódicas.

ID	Latitud	Longitud	Formación geológica	Tipo de movimiento	Material	Activo / Inactivo	Fuente	Evento detonante
1	19,056029	-99,657268	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Fotointerpretación	Precipitación
2	19,061478	-99,662502	Morelos	Deslizamiento	Calizas	Inactivo	Fotointerpretación	Precipitación
3	19,033717	-99,657687	Acuitlapán	Deslizamiento	Areniscas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
4	19,036535	-99,658581	Acuitlapán	Deslizamiento	Areniscas	Inactivo	Fotointerpretación	Precipitación
5	19,013624	-99,527466	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Calizas	Inactivo	Trabajo de campo	Precipitación
6	19,024508	-99,609721	Morelos	Deslizamiento	Calizas y dolomias	Activo	Atlas de riesgos	Precipitación
7	19,01338	-99,659485	Morelos	Desprendimiento	Calizas y Dolomias	Activo	Atlas de riesgos	Precipitación
8	19,009725	-99,648736	Morelos	Deslizamiento	Calizas y Dolomias	Activo	Atlas de riesgos	Precipitación
9	19,000873	-99,459837	Morelos	Deslizamiento	Calizas y Dolomias	Inactivo	Fotointerpretación	Precipitación
10	19,001281	-99,470943	Roca Verde Tasco Viejo	Desprendimiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
11	18,997303	-99,539587	Roca Verde Tasco Viejo	Desprendimiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
12	18,999873	-99,556454	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Areniscas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
13	18,994758	-99,553931	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
14	18,967639	-99,553841	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Calizas y Dolomias	Inactivo	Trabajo de campo	Falla geológica
15	18,960432	-99,623427	Roca Verde Tasco Viejo	Desprendimiento	Riolitas	Inactivo	Trabajo de campo	Precipitación
16	18,966506	-99,629663	Roca Verde Taxco Viejo	Deslizamiento	Riolitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
17	18,96564	-99,632466	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Inactivo	Trabajo de campo	Precipitación
18	18,940047	-99,623069	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Inactivo	Fotointerpretación	Precipitación
19	18,935522	-9,625452	Roca Verde Tasco Viejo	Desprendimiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
20	18,918448	-99,67266	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Fotointerpretación	Falla geológica
21	18,914332	-99,53360	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Inactivo	Fotointerpretación	Precipitación
22	18,853378	-99,46481	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
23	18,857954	-99,55383	Roca Verde Tasco Viejo	Desprendimiento	Andesitas	Activo	Fotointerpretación	Falla geológica
24	18,834924	-99,61995	Acuitlapán	Deslizamiento	Areniscas	Inactivo	Fotointerpretación	Precipitación
25	19, 01222	-99,34280	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
26	19, 02626	-99,33459	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación
27	18,594124	-99,34738	Roca Verde Tasco Viejo	Deslizamiento	Andesitas	Activo	Trabajo de campo	Precipitación

Tabla 1. Inventario de deslizamientos
Fuente: Autores, 2025.

La Tabla 1 muestra el inventario realizado, mismo que incluye la ubicación geográfica, formación geológica, génesis litológica, activo/inactivo, fuente y evento detonante. Dicha información servirá como base para la validación del modelo (ver Figura 1 y Tabla 1). De los 27 deslizamientos inventariados, de acuerdo a datos del Atlas de riesgo municipal (Ayuntamiento de Tenancingo, 2022b) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2024b), al menos 24 estuvieron antecedidos por acumulados de lluvias entre los 200 y 250 mm en los 30 días anteriores al desencadenamiento de los deslizamientos. Tres de los deslizamientos inventariados no se correlacionan con los intervalos de intensas lluvias mencionados; sin embargo, especialmente se

vinculan a las Falla Tenancingo y otras fallas locales (Figura 6a), todas con actividad neotectónica comprobada (Olivares, 2020).

Descripción de variables

Atendiendo a (1) los requerimientos del método descrito, (2) a la información disponible en el contexto municipal en que se aplica y (3) la experiencia de aplicaciones similares en el contexto latinoamericano (Ramírez & Rodríguez, 2017, Lodoño, 2017, Santamaría et al., 2021 y Robalino, 2023); se seleccionan las siguientes variables: (1) precipitación media anual, (2) proximidad a ríos y cuerpos de agua, (3) proximidad a infraestructura vial, (4) cobertura boscosa y uso de suelo, (5) topografía (energía del relieve, pendientes, curvatura y orientación de la ladera) y (6) geología (litología y proximidad a fallas geológicas).

Uno de los factores externos más influyentes en la inestabilidad de las laderas es la precipitación (variable 1), misma que provoca la saturación del suelo. La lluvia incrementa el peso volumétrico del terreno, lo que, a su vez, disminuye significativamente la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Adicionalmente, los flujos superficiales generados por precipitaciones intensas en las bases de las laderas pueden causar socavamiento, deslizamientos y alteraciones en la morfología de la ladera. Para la elaboración del mapa de distribución de la precipitación media anual (ver Figura 3a), se calculó el promedio anual de precipitaciones en milímetros para cada una de las ocho estaciones meteorológicas, mismas que se ubican en un radio de 25 km desde el centro del municipio objeto de estudio, con datos que cubren del año 1961 al 2020 (SMN, 2024). Las estaciones consideradas para este análisis fueron: Joquicingo (15038), Tenango del Valle (15122N), Villa Guerrero (15134, 15184, 15297, 15299), Malinalco (15223) y Zumpahuacán (15366).

La proximidad a los ríos en la base de las laderas, particularmente en áreas con topografía pronunciada y redes de drenaje densas puede generar socavamiento e inestabilidad. Para la elaboración del mapa de proximidad a ríos (variable 2), mostrado en la Figura 3b, se construyeron cinco áreas con una influencia cada una de 50 metros hasta una distancia máxima de 200 metros medida desde el centro de los ríos. Estos rangos fueron establecidos por Santamaría et al. (2021), en este sentido se consideraron los criterios de posibles incrementos en el caudal o áreas de influencia fluvial propuestos anteriormente por Quimbayo & Torres (2015) y Rodríguez & Rojas (2020).

Por su parte, las actividades humanas tienen un impacto significativo en la alteración del equilibrio natural del terreno en el contexto vial; donde, en ocasiones son necesarias medidas de mitigación en los taludes carreteros, similares a las propuestas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2021) en el fascículo laderas. La necesidad de estas medidas, en ocasiones es ignorada por su costo económico, creando un escenario de riesgo latente. En Tenancingo, la proximidad a la infraestructura vial es un factor determinante en la ocurrencia de deslizamientos, dado que, una gran cantidad de estos eventos se presentan muy cerca de las vías de comunicación (ver Figura 3c). El trabajo de campo realizado para la construcción del inventario de deslizamientos permitió confirmar la influencia descrita, donde se validó una alta influencia en los primeros 100 m medidos desde el eje de la carretera, una influencia media a partir de los 100 y hasta los 200 m, y a partir de los 200 m se considera una influencia baja (ver Figura 4).

La cobertura boscosa y el uso de suelo constituyeron la cuarta variable analizada. La vegetación y sus características tienen influencia en la estabilidad de las laderas desde la óptica hidrológica y su influencia mecánica sobre las partículas de suelo. Para su mejor entendimiento físico, Sánchez & Osorio (2017), lo explican como “mecanismo hidrológico” y “mecanismo mecánico”. El mecanismo hidrológico considera factores como la intercepción de la precipitación por el dosel arbóreo, el sistema de raíces y el agotamiento de humedad del terreno por desecación. Mientras que, la influencia mecánica se refiere a la risoclastia, misma que considera la capacidad de las raíces para contener al terreno y generar cohesión entre las partículas.

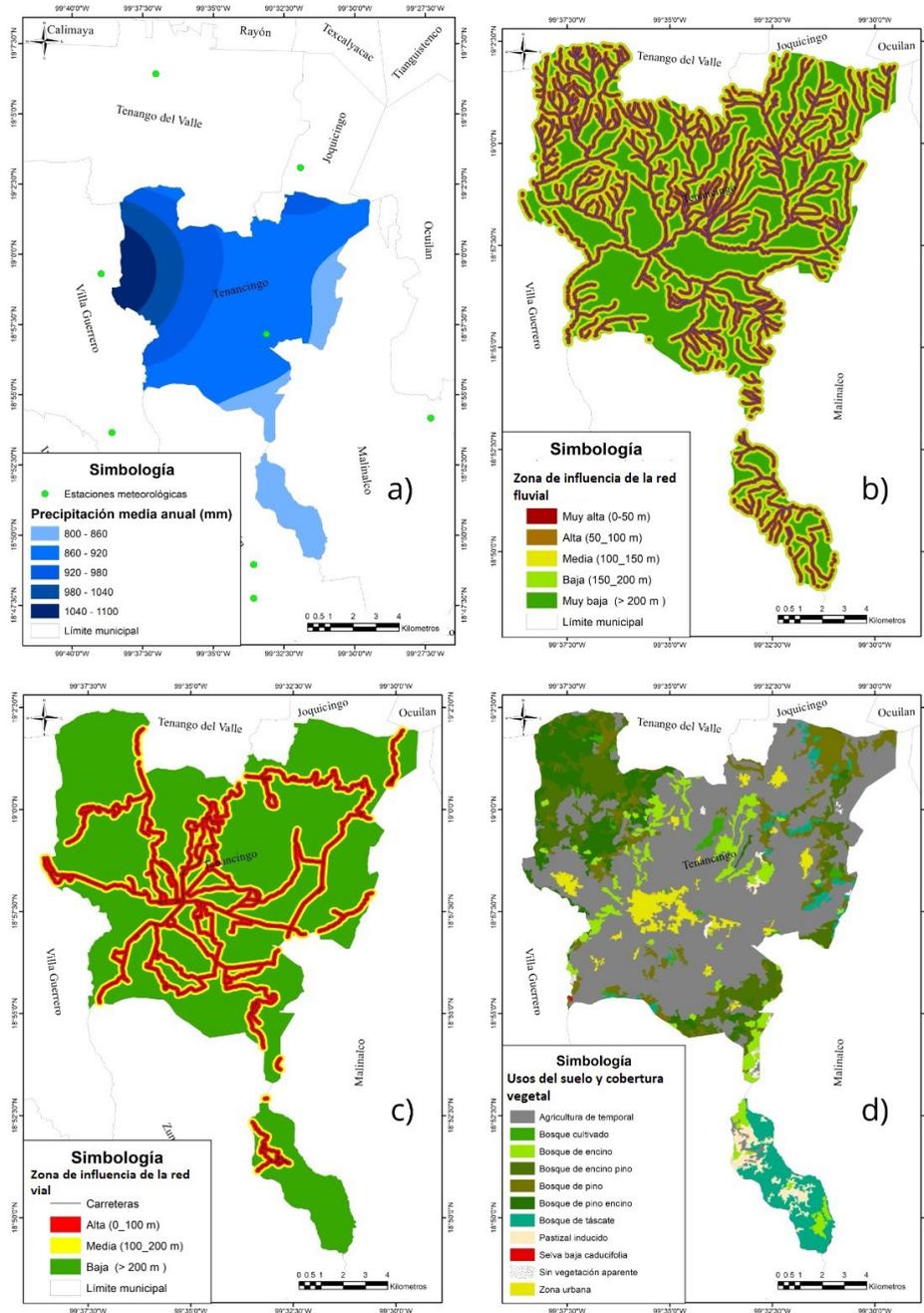


Figura 3. Variables condicionantes
Fuente: Autores, 2025.

Así mismo, de acuerdo con el uso del suelo, se pueden generar escenarios complejos de alta susceptibilidad, el más común para el caso de estudio consiste en las obras y movimientos de tierra asociados a la infraestructura vial. Sin embargo, existen otras dos condiciones, la primera asociada a taludes en obras de nivelación del terreno para el emplazamiento de edificios y la segunda, relacionada con la deforestación para el desarrollo agrícola. Atendiendo a lo anterior, Cuanalo et al. (2011) y Castillo et al. (2020) hacen un resumen de la influencia de la actividad humana en los procesos de remoción en masa. En los trabajos citados, los autores alertan de los principales impactos humanos sobre las laderas, indicando a (1) el aumento de cargas, (2) el aumento de presión de poros, y (3) a la deforestación.

Para el caso del municipio de Tenancingo, los dos factores (vegetación y uso de suelo), se integran, en el denominado mapa de cobertura boscosa y usos de suelo. En particular, en el municipio de Tenancingo la superficie está cubierta en un 96,12% por agricultura temporal, 3,60% por bosques de diferentes características, 0,13% de urbanización, 0,08% pastizales, 0,03% zona

sin vegetación aparente y un 0,04% de superficie de selva baja (ver Figura 3d). La cartografía fue obtenida de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2024) con escala original 1:50 000.

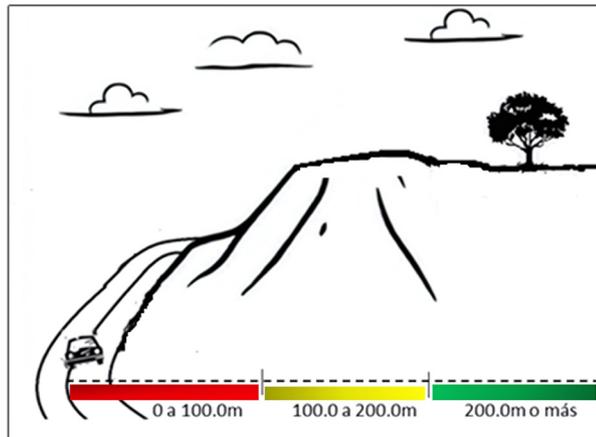


Figura 4. Posible amenaza a deslizamientos considerando la distancia entre el eje de la carretera y el talud
Fuente: Autores, 2025.

Para este caso de estudio la variable topográfica estará compuesta por los descriptores energía del relieve, pendientes, curvatura y orientación de la ladera. En todos los casos, como insumo primario se empleó el modelo digital de terreno (MDT) con resolución espacial de 5 metros, mismo que fue tomado de las bases de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2024).

La energía del relieve conjuga la disección en planta y la disección vertical, y es un indicativo del potencial del terreno a magnificar los procesos morfodinámicos (fluviales y gravitacionales) (Cortés et al., 2021). Matemáticamente se obtiene de la diferencia entre la altura máxima y mínima del relieve en una unidad de área, para este trabajo se considerará $1,0 \text{ km}^2$. Para Quesada (2016), este índice morfométrico puede indicar modificaciones a la morfología original por fuerzas exógenas de gran intensidad cuando los valores de energía del relieve son altos. Y valores mínimos, de energía del relieve sugieren zonas aparentemente estables (ver Figura 5a).

La pendiente del terreno es una variable común en la mayoría de los análisis de estabilidad de laderas (Crespo et al., 2024, Liu et al., 2024 y Kinde et al., 2024) (ver Figura 5b). La estabilidad de una ladera depende de forma significativa de la cohesión de la litología y la inclinación de su superficie. Por ejemplo, las rocas ígneas pudieran ser estables en ángulos superiores a los 45° ; sin embargo, laderas conformadas por lutitas meteorizadas y saturadas probablemente encuentren estabilidad en ángulos inferiores a los 20° (Suárez, 2021).

Por su parte, la concavidad o convexidad se denominará para este trabajo, curvatura del terreno (ver Figura 5c). Esta variable afecta el estado de equilibrio, la capacidad de infiltración, la velocidad de escorrentía y con ello la intensidad de los procesos erosivos (Suárez, 2021).

El último descriptor topográfico analizado, consistió en la orientación de las laderas (ver Figura 5d). La orientación de las laderas, para este caso en estudio particular pudiera influir en las condiciones microclimáticas (incidencia de la radiación solar, temperatura, y humedad), mismas que pueden condicionar la estabilidad de las laderas (Sharma & Sandhu, 2024).

La sexta y última variable considerada corresponde a la "geología", misma que estará compuesta por la influencia de las litologías y las fallas (ver Figura 6 a y b). En esta investigación se emplea como cartografía primaria las cartas geológicas E14-A48 y E14-A58, a escala 1:250.000, publicadas por el Servicio Geológico Mexicano (2024). En el caso particular de la litología, la predisposición a los deslizamientos es relacionada especialmente a sus propiedades geotécnicas, en especial al ángulo de fricción interna, cohesión, peso específico y porosidad (Ramos, 2017 y Valdez et al., 2022).

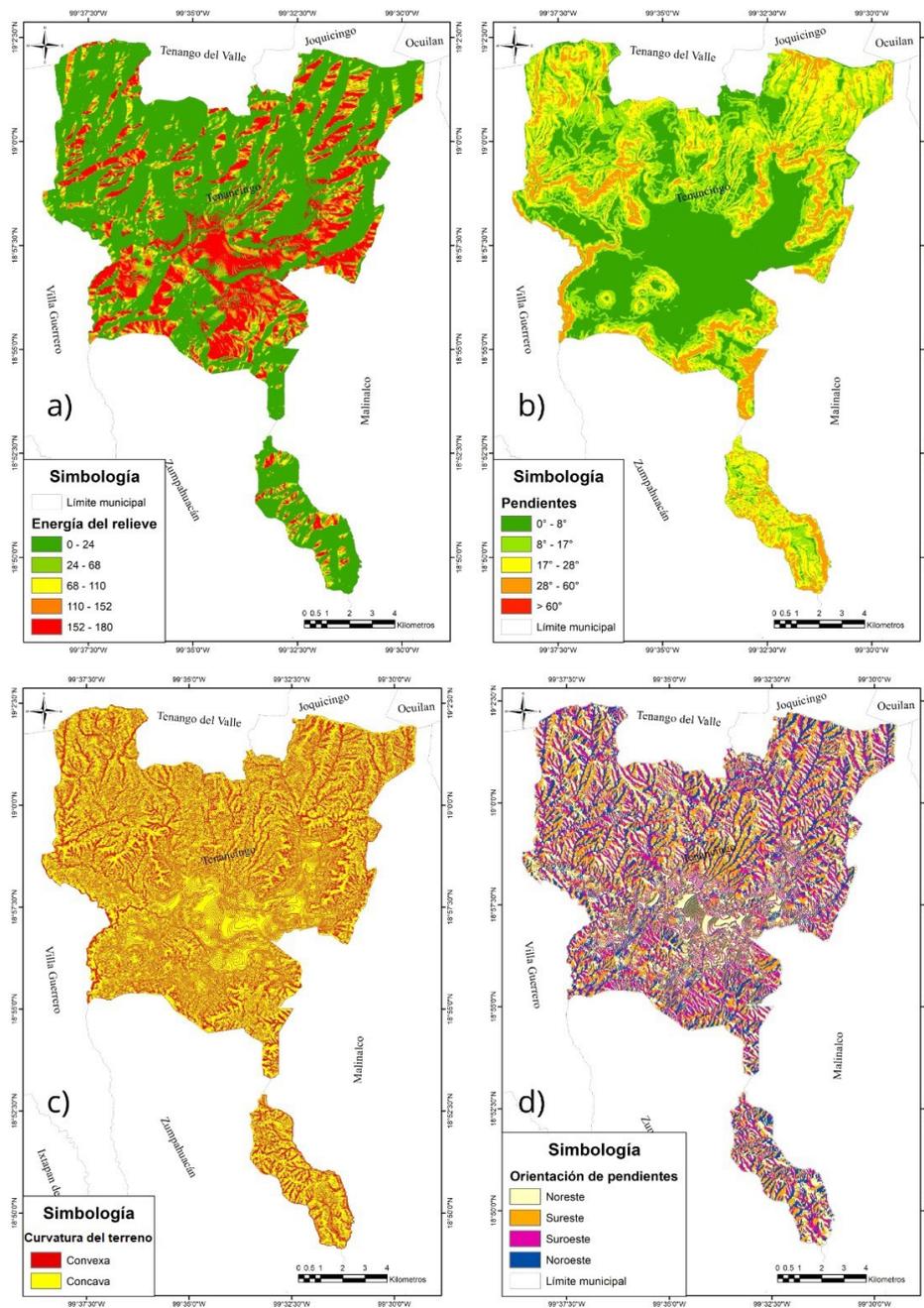


Figura 5. Expresión cartográfica de las variables topográficas
Fuente: Autores, 2025.

Por su parte, las fallas generan planos de debilidad tectónica y zonas de circulación de agua, de esta forma Santamaría et al. (2021) sugieren cinco rangos de influencia (cada 200 metros) (ver Figura 6b). La disposición espacial de las fallas se obtuvo del *shape* de fallas geológicas, también actualizado por el Servicio Geológico Mexicano (Servicio Geológico Mexicano, 2024).

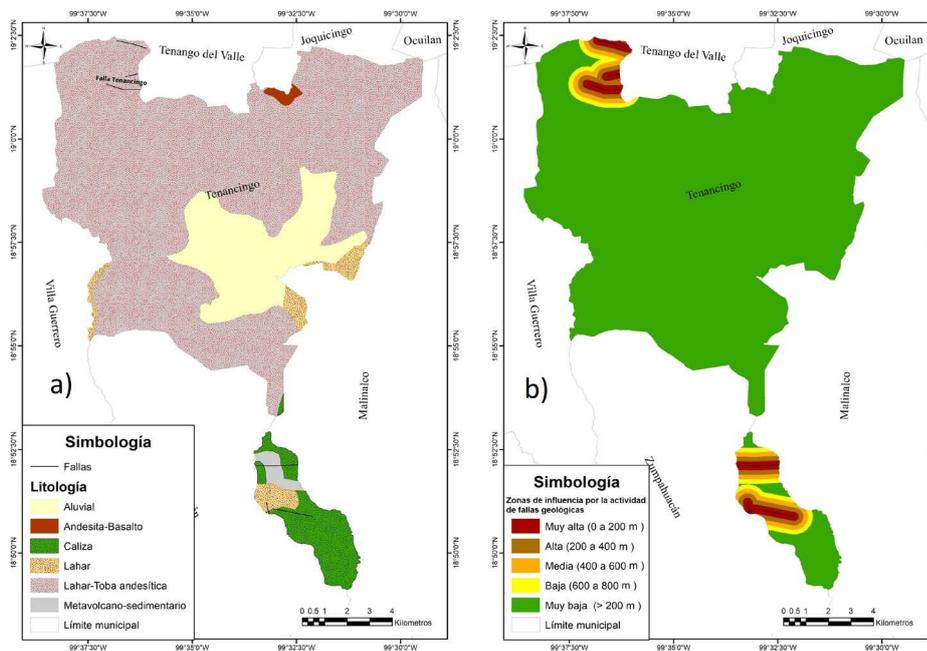


Figura 6. Variable geología

Fuente: Autores, 2025.

Nota: Donde (a) representa la distribución de las litologías y (b) la zona de influencia por la actividad de fallas geológicas

Cálculo del Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (ISD)

El método ISD determina la relación entre la distribución de deslizamientos y los parámetros condicionantes y desencadenante considerados relevantes para su ocurrencia. En términos técnicos, se realiza un análisis de cada uno de los parámetros en función del mapa de inventario de deslizamientos, generando una medida de influencia para cada factor. Se calcula el ISD para cada uno de los factores establecidos de acuerdo con la siguiente fórmula:

Ecuación 1

$$ISD = \sum_{i=1}^n d w_i \cdot F_i$$

Donde:

- » ISD = Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos.
- » w_i = Peso asignado a cada factor i (dependiendo de su influencia en la susceptibilidad al deslizamiento).
- » F_i = Valor del factor i (como la proximidad a carreteras, pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, etc.).
- » n = Número total de factores utilizados en el análisis.

El cálculo se obtiene utilizando herramientas del software ArcGIS PRO y hojas de cálculo de Microsoft Excel. A partir de los mapas generados en ArcGIS PRO en formato raster, se extrajeron los valores de los píxeles que representan el área total estudiada, el área de cada clase para cada uno de los parámetros, la cantidad de deslizamientos en cada categoría de parámetro y el número total de deslizamientos.

Estos valores de píxeles fueron luego exportados a Microsoft Excel para aplicar la ecuación correspondiente al ISD. Durante la generación del mapa de susceptibilidad, se utilizaron los valores del índice de cada parámetro considerado (condicionantes y desencadenantes), los cuales fueron ponderados según su valor. Los parámetros con mayor ISD recibieron un peso mayor en la elaboración del mapa mediante la herramienta de superposición ponderada. Los aspectos metodológicos para la estimación del ISD descritos en este apartado fueron tomados de Santamaría et al. (2021).

RESULTADOS

Susceptibilidad ponderada de acuerdo con el LSI

A partir de los resultados obtenidos del índice de susceptibilidad (LSI), se logra entonces identificar la influencia de los factores ya descritos en la ocurrencia de deslizamientos para el municipio de Tenancingo (ver Tabla 2). Los factores más influyentes resultaron la proximidad a la infraestructura vial y la curvatura de las laderas con LSI de 17.32 y 16.02 respectivamente. Los valores de LSI para cada rango de comportamiento de los factores considerados en el análisis se plasman en la Tabla 3. Empleando los valores de LSI (ver Tabla 3) y con el uso de la herramienta de superposición ponderada en el software ArcGIS PRO, se generó el mapa de susceptibilidad (ver Figura 7). La cartografía obtenida, se clasifica en cinco clases: muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Factor	Unidad	Promedio LSI
Proximidad a infraestructura vial	Metros	17,32
Proximidad a fallas geológicas	Metros	4,03
Proximidad a ríos	Metros	9,87
Cobertura boscosa y usos de suelo	Tipo	5,28
Pendientes	Grados	8,36
Precipitación	mm/años	5,23
Orientación de pendientes	Grados	6,44
Energía del relieve	m/km ²	8,30
Curvatura	Tipo	16,02

Tabla 2. Ponderaciones obtenidas mediante el LSI por factor

Fuente: Autores, 2025.

De acuerdo con la cartografía resultante, las localidades que se encuentran en zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos son las ubicadas al noreste del municipio, específicamente las cercanas a la carretera Tenango-Tenancingo, tales como San Martín Coapaxtongo, Los Morales, Francisco Zarco, La Mesita y Chalchihuapan. También hay que considerar la colonia Centro, que muestra alta susceptibilidad, principalmente por la influencia del Cerro Cristo Rey. Al realizar un análisis exhaustivo de la zona que comprende las comunidades del noreste del municipio, se evidencia una correlación clara y significativa entre las áreas clasificadas con susceptibilidad media y alta, y los sitios donde históricamente se han registrado deslizamientos de tierra. Esta relación se ve reflejada y respaldada por los resultados obtenidos durante el trabajo de campo, que permiten validar la tendencia observada en los modelos de susceptibilidad. Por ejemplo, en el cerro Cristo Rey, se observan condiciones claras de inestabilidad reveladas directamente en campo (ver Figura 1), principalmente en las zonas de influencia de las vialidades locales. Otro sitio, altamente afectado por los deslizamientos, es el tramo de carretera comprendido entre en km 37 y el km 43 de la carretera Federal 55 Tenango-Tenancingo, donde se documentó la ocurrencia de al menos 9 deslizamientos. El deslizamiento de mayor impacto se identificó en el km 39 de la citada carretera, con una longitud de la corona de aproximadamente 40.0 m y una profundidad del escarpe principal de al menos 10.0 m (ver Figura 7).

Factor	ID*	Rango/ Característica	Deslizamientos inventariados	Deslizamientos (%)	Pixeles asociados	Pixeles (%)	Valor LSI
Precipitación	1	800-860mm	0	0	0	0	0
	2	860-920mm	2	0,738	35	0,007	0,260
	3	920-980mm	7	2,583	25	0,025	0,638
	4	980-1040mm	13	4,797	459	0,047	22,009
	5	1040-1100mm	5	1,845	176	0,018	3,255
Proximidad a ríos	1	>200m	0	0	0	0	0
	2	150-200m	0	0	0	0	0
	3	100-150m	0	0	0	0	0
	4	50-100m	10	3,690	318	0,036	11,720
	5	0-50m	17	6,273	600	0,062	37,637
Cobertura boscosa y usos de suelo	1	Bosques	4	1,476	141	0,014	2,083
	2	Pastizal y selva baja	2	0,738	71	0,007	0,520
	3	Sin vegetación aparente	2	0,738	35	0,007	0,260
	4	Agricultura	9	3,321	318	0,033	10,548
	5	Zona urbana	10	3,690	353	0,036	13,023
Energía del relieve	1	0-24	0	0	0	0	0
	2	24-68	2	0,738	35	0,007	0,260
	3	68-110	0	0	0	0	0
	4	110-152	14	5,166	494	0,051	25,495
	5	152-180	11	4,059	388	0,040	15,758
Pendientes	1	0-8°	0	0	0	0	0
	2	8-17°	2	0,738	71	0,007	0,520
	3	17-28°	4	1,476	106	0,014	1,562
	4	28-60°	17	6,273	600	0,062	37,637
	5	>60°	4	1,476	141	0,014	2,083
Orientación de pendientes	1	Noreste	4	1,476	141	0,014	2,083
	2	Sureste	9	3,321	318	0,033	10,548
	3	Suroeste	5	1,845	141	0,018	2,604
	4	Noroeste	9	3,321	318	0,033	10,548
Proximidad a fallas geológicas	1	<200	3	1,107	106	0,011	1,172
	2	150-200m	5	1,845	176	0,018	3,255
	3	100-150m	8	2,952	247	0,029	7,293
	4	50-100m	4	1,476	141	0,014	2,083
	5	0-50	7	2,583	247	0,025	6,381
Litología	1	Sedimentario	9	3,321	282	0,033	9,376
	2	Ígneo consolidado	11	4,059	388	0,040	15,758
		Ígneo no consolidado	7	2,583	247	0,025	6,381
Proximidad a calles	1	>200m	0	0	0	0	0
	2	100-200m	10	4,059	353	0,040	14,325
	3	0-100m	17	6,273	600	0,062	37,637
Curvatura	1	Convexa	12	4,428	423	0,044	18,736
	2	0	0	0	0	0	0
	3	Cóncava	15	5,535	530	0,055	29,325

Tabla 3. Rangos de valores de LSI para cada parámetro

Fuente: Autores, 2025.

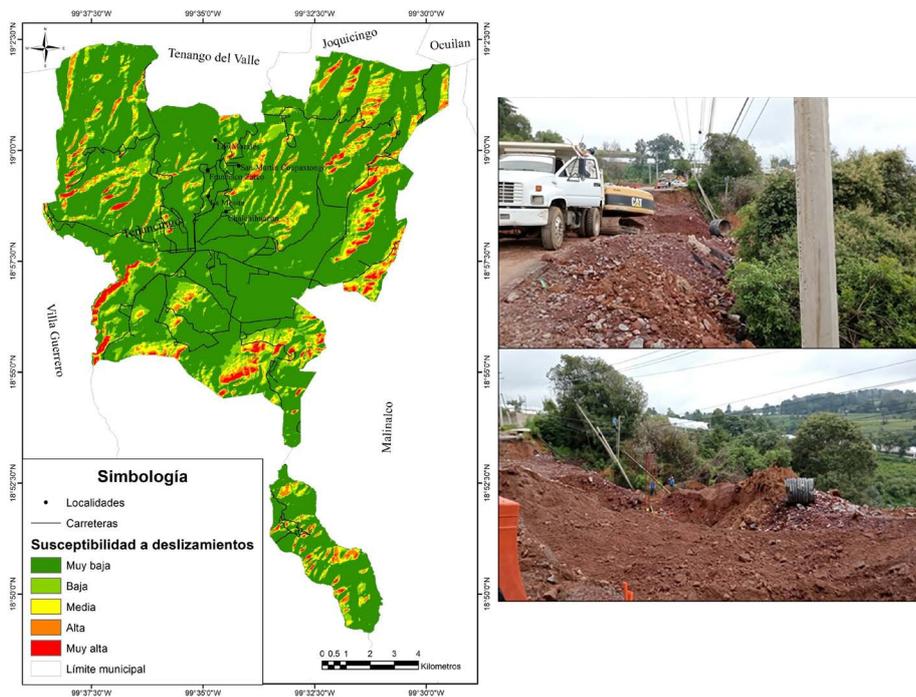


Figura 7. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Tenancingo

Fuente: Autores, 2025.

Nota: Las fotos muestran obras de reparación posteriores al deslizamiento de gran magnitud en el km 39 de la carretera Federal 55 Tenango-Tenancingo ocurrido el 24/07/2024.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la investigación se utilizó el índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) para identificar y analizar los factores más influyentes en la ocurrencia de este movimiento de remoción en masa para el municipio de Tenancingo del Estado de México. El uso del método representa una aplicación robusta y replicable para los municipios de la entidad mexiquense, donde hasta el momento solo se han aplicado variantes del análisis multicriterio. El enfoque técnico comúnmente utilizado en México para este tipo de estudios incluye el uso de sistemas de información geográfica (SIG) mediante análisis multicriterio de orden heurístico, los cuales dependen de la experiencia del investigador para asignar los pesos por cada parámetro (Serrano, 2018; Muñoz et al., 2020). De acuerdo con la consulta bibliográfica, los métodos estadísticos y específicamente el método bivariado han sido poco aplicados en México, algunos trabajos que emplean este procedimiento han sido los de Campos (2006) y Galindo & Alcántara (2015), sin embargo, aún es insuficiente la cantidad de aplicaciones.

Para el caso de estudio en particular, los resultados revelan que, los factores con mayor peso en la ocurrencia de deslizamientos son, la proximidad a la infraestructura vial, la proximidad a fallas geológicas, la cercanía a ríos, la cobertura boscosa, el uso del suelo y las precipitaciones.

El resultado cartográfico obtenido del análisis de susceptibilidad a deslizamientos ofrece una representación visual clara de las áreas más proclives a este tipo de fenómenos. La información oficial publicada en el Atlas de Riesgos de Tenancingo, en su apartado de deslizamientos, se obtuvo a través del análisis multicriterio para identificar y clasificar las zonas susceptibles (Ayuntamiento de Tenancingo, 2022b). De acuerdo con el documento citado y su comparación con el resultado de la Figura 7 (obtenido en la presente investigación), los polígonos de muy alta y alta susceptibilidad a los deslizamientos son coincidentes en un 30%. Se considera que, el análisis bivariado permite correlacionar con mejor exactitud las variables que influyen en los deslizamientos, lo que resulta en una aproximación más cercana a la distribución espacial del fenómeno. Esta mejora en el nivel de información es fundamental para la toma de decisiones en la gestión de riesgos y la planificación territorial. Ahora, con el resultado obtenido se pueden justificar acciones preventivas, como la reubicación de viviendas, la construcción de infraestructura de protección o la implementación de sistemas de alerta temprana.

CONCLUSIONES

El análisis del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) en el municipio de Tenancingo permitió identificar los factores que influyen de manera significativa en la ocurrencia de deslizamientos. Los resultados indican que, la proximidad a la infraestructura vial y la curvatura de forma cóncava de las laderas, son los factores más determinantes. El municipio tiene un área total de 166.76 km²; donde, el nivel muy bajo de susceptibilidad a deslizamientos cubre el 73%, el nivel de baja susceptibilidad el 11%, y los niveles de media, alta y muy alta susceptibilidad representan el 8%, 6% y 2% respectivamente de la superficie municipal.

Dado que, el cambio climático puede intensificar los fenómenos meteorológicos extremos, como lluvias torrenciales que detonarían deslizamientos; entonces se deben considerar la identificación y gestión de riesgos como una prioridad. El mapa de susceptibilidad que aquí se muestra, proporciona una base sólida para adoptar las estrategias de gestión de desastres especialmente en las localidades de San Martín Coapaxtongo, Los Morales, La Mesita, Chalchihuapán, en el Cerro Cristo Rey y en el tramo carretero que comprende desde La Isleta hasta Francisco Zarco.

El uso de métodos estadísticos bivariados, combinado con análisis cartográfico, resultaron herramientas efectivas en la identificación de zonas susceptibles a los deslizamientos. Donde, fue posible demostrar estadísticamente los factores más influyentes o determinantes; y ofrecer un recurso visual accesible que facilita la toma de decisiones tanto a nivel gubernamental como comunitario. Esto, mejora la capacidad de respuesta ante posibles deslizamientos y permite un monitoreo constante de las áreas de riesgo. Para próximas investigaciones en el municipio de Tenancingo, se debe trabajar en determinar con precisión la zona de influencia de los ríos (red de drenaje) y de las fallas, toda vez que, en este caso de estudio se aplicaron criterios establecidos en la literatura especializada.

La integración de los resultados cartográficos con otras herramientas de gestión del riesgo, como la planificación urbana, la reubicación de viviendas y la implementación de infraestructuras de protección, es clave para una gestión integral del riesgo de deslizamientos. Esta estrategia debe ser acompañada por acciones de prevención basadas en la educación y sensibilización de las comunidades, involucrándolas activamente en el proceso de mitigación y adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por el apoyo al proyecto CAT2024-0097 enmarcado en el Programa Investigadoras e Investigadores COMECYT. Además, extendemos agradecimientos al personal de Protección Civil del municipio de Tenancingo por brindar todas las facilidades para desarrollar el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Aristizábal, E., Morales, P., Vásquez, M., Ruíz, D., Palacio, J., Ángel, F.P., Caballero, H., & Ordóñez, O. (2022). Metodologías para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa como parte de los estudios básicos de amenaza: Caso de estudio municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *Revista de Geociencias*, 44(3), 199-213. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9079735.pdf>
- Ayuntamiento de Tenancingo. (2022a). Plan de desarrollo municipal de Tenancingo, Estado de México, 2022-2024. *Gaceta Municipal*, (32), 20 de junio de 2022. https://copladem.edomex.gob.mx/sites/copladem.edomex.gob.mx/files/files/pdf/Planes%20y%20programas/Mpales-2022-2024/Tenancingo_PDM%202022_2024.pdf
- Ayuntamiento de Tenancingo. (2022b). Actualización del Atlas Municipal de Riesgos de Tenancingo, Estado de México. *Gaceta Municipal*, (74), 19 de diciembre de 2022. https://tenancingo.gob.mx/reglamentos/74_ATLAS_DE_RIESGO.pdf
- Bonet, F. (1971). Espeleología de la región de Cacahuamilpa, estado de Guerrero, México. *Boletín del Instituto de Geología*, (90), 1-88. <https://espeleologiabibliografia.blogspot.com/2011/04/cacahuamilpa-bonet-1971.html>
- Campos, M. (2006). Comparación de un método cualitativo con uno bivariado para la evaluación del peligro por procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe, Edo. de México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000608561/3/0608561.pdf>

- Cargua, C.J., Espin, R., Valencia, B.G., Simbaña, M., Araujo, S., Cornejo, C., & Ocampos, A. (2024). Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera amazónica del Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 117-138. <https://www.redalyc.org/journal/4760/476077146008/html/>
- Castillo, P., Vergara, L., Chalas, J., & Vicioso, F. (2020). Revisión histórica de los deslizamientos de terreno superficiales causados por lluvias, casos: México y República Dominicana. *Aqua-LAC*, 12(1), 108-117. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2020-v12-1-09>
- Centro de Investigación en Epidemiología de Desastres [CRED]. (2024). Datos sobre la ocurrencia y los impactos de más de 26.000 desastres masivos en todo el mundo desde 1900 hasta la actualidad. <http://www.emdat.be>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2021). Inestabilidad de laderas. *Serie fascículos*, 1-39. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/7-FASCICULOINESTABILIDADDELADERAS.PDF>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2024). Eventos relevantes asociados a peligros en México desde 1810. http://www.atlasmacionalderiesgos.gob.mx/archivo/MapaFenomenos_1810.html
- Comisión Nacional del Agua, [CONAGUA]. (2024a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tenancingo 1504, Estado de México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gasi/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1504.pdf
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (2024). Cobertura del Suelo de México a 30 metros. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cortés, M.A., Hernández, J.R., & Aguilar, A.G. (2021). Susceptibilidad a procesos de remoción en masa: Aproximación metodológica para la construcción de un índice de amenaza en Álvaro Obregón-Ciudad de México. *Entorno Geográfico*, (21), 47-76. <https://doi.org/10.25100/eg.voi21.11291>
- Crespo, C., Martínez, J.J., & Martín, F. (2024). Characterization of historical earthquakes through a study of landslides by lichenometry (Murcia, SE Iberia). *Natural Hazards*, 120, 251-269. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06166-9>
- Cuanalo, O.A., Oliva, A.O., & Gallardo, R. (2011). Inestabilidad de laderas: Influencia de la actividad humana. *Elementos*, (84), 39-46. <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000001436.pdf>
- Díaz, S.R. (2022). Deslizamientos en México: factores detonantes e impacto social. Tesis doctoral. Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/137368>
- Díaz, V. (2019). Las rocas metamórficas de la región de Zacualpan, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 4(1), 1-12. <https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1409>
- France24. (2024, 25 de julio). El número de muertos por los deslizamientos en Etiopía sube a 257 y la ONU teme que ascienda a 500. *France24*. <https://www.france24.com/es/%C3%A1frica/20240725-el-n%C3%BAmero-de-muertos-por-los-deslizamientos-en-etio%C3%9Aa-sube-a-257-y-la-onu-teme-que-ascienda-a-500>
- Galindo, J.A., & Alcántara, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones geográficas*, (88), 122-145. <https://doi.org/10.14350/ri.43790>
- García, X. (2024, 9 de octubre). Deslaves y socavón en la Tenango-Tenancingo afectan ventas de flor. *El Sol de Toluca*. <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/deslaves-y-socavon-en-la-tenango-tenancingo-afectan-ventas-de-flor-12678073.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2021). Resultados del censo de población y vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx>
- Kinde, M., Getahun, E., & Jothimani, M. (2024). Geotechnical and slope stability analysis in the landslide-prone area: A case study in Sawla-Laska road sector, Southern Ethiopia. *Scientific African*, 23. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227624000152>
- Legorreta, G., Bursik, M., Pouget, S., Lugo, J., Paredes, L.M., & Aceves, 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. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222014000200010&lng=es&tlng=es

- Liu, S., Yin, K., Du, J., Chen, L., Xie, X. Zhu, S. & Zhang, X. (2024) Landslides triggered by the extreme rainfall on July 4, 2023, Wanzhou, China. *Landslides*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02296-8>
- Londoño, J.P. (2017). Landslides susceptibility assessment using discriminant analysis. Application on a regional scale. *Journal of Landslide Research*, 10(2), 123-134. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61385>
- Muñiz, R., Zúñiga, M., Vázquez, R. & Carranza, J.L. (2020). Análisis de vulnerabilidad de los deslizamientos de laderas en la ciudad de Chilpancingo, Gro. *Academia Journals*, 381-386. <https://www.researchgate.net/publication/342154335>
- Olivares, R.A. (2020). Geología ambiental y peligros geológicos a lo largo de las fallas Tenango, Estado de México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109023>
- Quesada, A. (2016). Peligros geomorfológicos: Inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. https://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/Premio/Tesis_MSc_2020/Tesis_Completa_Adolfo_Quesada.pdf
- Quimbayo, L.C.R., & Torres, M.C. (2015). Planteamiento y evaluación de alternativas estructurales para la gestión del riesgo de inundaciones en el valle alto del río Cauca. Tesis de grado, Universidad del Valle. <https://core.ac.uk/download/pdf/77932256.pdf>
- Ramírez, B.A., & Rodríguez, V. (2017). Comparación de métodos heurístico y estadístico bivariado para zonificar la susceptibilidad por deslizamientos, subzona hidrográfica río Tapias y afluentes al Cauca. Especialización en Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/server/api/core/bitstreams/oabod7e9-9acf-4bfe-bocb-121d1e861b5f/content>
- Ramos, A.A. (2017). Análisis de estabilidad de taludes en rocas. Simulación con LS-DYNA y comparación con SLIDE. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/47326/1/TFM_ABEL_ANTONIO_RAMOS_VASQUEZ.pdf
- Robalino, F. A. (2023). Cartografía de susceptibilidad a movimientos en masa con la aplicación del método estadístico bivariado, caso de estudio microcuenca del río Monjas. Trabajo de integración curricular para la obtención del título de Ingeniero Geólogo, Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24936>
- Rodríguez, A.D., & Rojas, J.A. (2020). Evaluación de las zonas de riesgo por inundación en el valle Santa Catalina frente a la crecida del río Simbal, La Libertad 2019. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Privada Antenor Orrego. https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12759/6641/REP_ANTHONY.RODRIGUEZ_JOANLUIS.ROJAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sánchez, R.J.M., & Osorio, J. P. (2017). Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: una revisión. *Revista Politécnica*, 13(24), 113-126. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1095>
- Santamaría, T., Samudio, M., & Sáez, D. (2021). Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta, provincia de Chiriquí, Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 7, 9-18. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/3242/3939>
- Serrano, D.A. (2018). Análisis del peligro de deslizamientos en el municipio de Temascaltepec, Estado de México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/105571/1_SERRANO-DIEGO-LGAM-2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Servicio Geológico de Estados Unidos [USGS]. (2024). Digital Elevation Model DEM. <https://www.usgs.gov/the-national-map-data-delivery/gis-data-download>
- Servicio Geológico Mexicano [SGM]. (2024). Fallas geológicas a nivel. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2024a). La temporada de ciclones tropicales 2024 ya comenzó. <https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/la-temporada-de-ciclones-tropicales-2024-ya-comenzo>
- Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2024b). Comisión Nacional del Agua. Datos climáticos de estaciones meteorológicas. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Sharma, A., & Sandhu, H.A.S. (2024). Landslide susceptibility analysis for sustainable development in the Indian Himalayas. In D. Thakur, S. Kumar, H.A.S. Sandhu, & C. Prakash (Eds.). <https://doi.org/10.1002/9781394214426.ch6>

Suárez, J. (2021). Libro digital deslizamientos. <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>

Valdez Valdez, J.E., Ordaz Hernández, A., Espinosa Rodríguez, L.M., & Baro Suárez, J.E. (2022). Susceptibilidad a deslizamientos en Malinalco, Estado de México, México. Un aporte a la reducción de riesgos de desastres a escala municipal. *Investigaciones Geográficas*, (109). <https://doi.org/10.14350/ig.60626>