

Identificación de áreas susceptibles a movimientos de ladera usando sistemas de información geográfica en Tabasco, México

Identification of areas susceptible to hillside movements using geographic information systems in Tabasco, Mexico

Lucía del Carmen García-Cruz*, Ojilve Ramón Medrano-Pérez**✉

García-Cruz, L. C., & Medrano-Pérez, O. R. (2021). Identificación de áreas susceptibles a movimientos de ladera usando sistemas de información geográfica en Tabasco, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 29(83), e2804, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2021832804>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es elaborar un mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera en Tabasco, México, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y el análisis de factores como la pendiente, uso de suelo y vegetación, así como litología, para identificar las áreas susceptibles a movimientos de ladera. Los resultados muestran un total de 1,006.64 km² de áreas susceptibles a deslizamientos con categorías de moderada, alta y muy alta en Tabasco, la cual está concentrada en 95.6% en los municipios de Tenosique, Tacotalpa, Huimanguillo, Macuspana y Teapa. Así, el ambiente morfogenético de la sierra es la zona que presenta mayor susceptibilidad a estos eventos, lo que representa un riesgo latente para las poblaciones de estas zonas. Así, los resultados obtenidos constituyen una base para la comprensión de estos fenómenos, la investigación y la toma de decisión a nivel municipal y estatal en temas relacionados.

Palabras clave: mapa de susceptibilidad; deslizamientos; riesgo natural; procesos de remoción en masa; inestabilidad de laderas.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a map of susceptibility to hillside movements in Tabasco, Mexico, through the use of Geographic Information Systems and the analysis of

Recibido: 12 de agosto de 2020 Aceptado: 3 de mayo de 2021

*División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Cunduacán-Jalpa km 1, Col. La Esmeralda, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México. Correo electrónico: lucygarciac97@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9416-8888>

**CONACYT-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. Calle Centenario Instituto Juárez S/N, Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México. Correo electrónico: ojilve.medrano@ccgs.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>

✉Autor para correspondencia

factors such as slope, land and vegetation use, and lithology, to identify areas susceptible to hillside movements. The results show a total of 1,006.64 km² of areas susceptible to landslides with moderate, high, and very high categories in Tabasco, which is concentrated in 95.6% in the municipalities of Tenosique, Tacotalpa, Huimanguillo, Macuspana, and Teapa. Thus, the morphogenetic environment of the mountain range is the area that has the greatest susceptibility to these events, which poses a latent risk to the populations of these areas. Thus, the results obtained provide a basis for understanding these phenomena, research, and decision-making at the municipal and state level on related issues.

Keywords: susceptibility map; landslides; natural hazard; mass removal processes; hillside instability.

INTRODUCCIÓN

Los movimientos gravitacionales en masa (roca, escombros o de la tierra) pendiente abajo ocurren cuando la masa más externa de la ladera sufre deslizamientos y cortes, usualmente en una superficie de falla principal, en los cuales el agua normalmente es un agente importante (Hinojosa-Corona, Rodríguez-Moreno, Munguía-Orozco, & Meillón-Menchaca, 2011; Mergili, Marchant-Santiago, & Moreiras, 2015). De acuerdo con Rivera-García, Cruz-Romero y Morales-Hernández (2020) la inestabilidad de laderas es considerada como uno de los fenómenos geológicos más destructivos que impactan a la humanidad, siendo este tipo de fenómeno el segundo en su categoría que mayor cantidad de pérdidas humanas y materiales provoca alrededor del mundo.

En particular, las afectaciones por este tipo de fenómenos impactan con mayor severidad en poblaciones de países en desarrollo y con vulnerabilidad socioeconómica, al ser quienes habitan las áreas montañosas. Los factores desencadenantes de los deslizamientos de laderas presentan orígenes naturales (Rivera-García et al., 2020) como características geológicas, tectónicas y climatológicas; pero también estos factores pueden ser de orígenes antrópicos, como el cambio de uso de suelo (Hinojosa-Corona et al., 2011; Quesada-Román et al., 2018).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta importante para la evaluación de riesgos de deslizamientos y, por consiguiente, para la prevención de los mismos. Los SIG son una tecnología informática diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y mostrar diversos conjuntos de datos espaciales o georreferenciados (Huabin, Gangjun, Weiya, & Gonghui, 2005), de la cual se pueden tomar herramientas como la separación de la información en múltiples capas o la manipulación de los datos de los deslizamientos en conjunción con el medio ambiente, lo que resulta sumamente útil para la ubicación de zonas con riesgo a procesos de remoción en masa (Guzzetti et al., 2012). Los Modelos Digitales de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) son el conjunto de datos digitales que describen los valores de elevación de la superficie terrestre (o cualquier otra superficie) y contienen información adicional sobre las características de esta superficie, y cuyo algoritmo de interpolación representa la mejor opción para la aproximación (modelado) de la topografía real (Szyputa, 2017).

Existen estudios alrededor del mundo que han abordado desde diferentes aspectos el análisis y la identificación de áreas de potencial riesgo a los deslizamientos de laderas.

Shahabi y Hashim (2015) basaron su estudio en la generación de modelos estadísticos mediante SIG y datos de teledetección y estudios de campo, para la generación de mapas de susceptibilidad del distrito de Cameron Highlands, en Malasia.

Por otra parte, Ali, Biermanns, Haider y Reicherter (2019) optaron por la recopilación de datos geológicos, geomorfológicos y factores detonantes (litología, sismicidad, intensidad de lluvias, entre otros) y mediante el método del proceso de jerarquía analítica y el método de superposición ponderada, determinar los índices de susceptibilidad a movimientos de tierra y obtener el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la autopista Karakoram en Pakistán. Meena y Nachappa (2019) utilizan distintos DEM con resoluciones espaciales diferentes (ALOS PALSAR: 12.5 m, ASTER: 30 m y SRTM: 90 m) para el mapeo de susceptibilidades en la región del valle de Kullu en el Himalaya, India.

En México Aceves-Quesada, Legorreta-Paulín, Lugo-Hubp, Umaña-Romero y Legorreta-Cuevas (2016) analizaron la ocurrencia de deslizamientos a partir de un inventario de deslizamientos creado a partir de fotos aéreas multitemporales y trabajo de campo, usando un modelo cartográfico-hidrológico (Stability Index MAPping) y un modelo de Regresión Logística Múltiple (RLM) en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz, México. En terrenos volcánicos los deslizamientos superficiales y flujos de escombros son frecuentes a lo largo de las laderas y los sistemas fluviales de los volcanes.

Paz-Tenorio, González-Herrera, Gómez-Ramírez y Velasco-Herrera (2017) se basaron en el método heurístico en combinación con análisis multicriterio, teniendo como resultado un mapa de amenazas por procesos de remoción en masa con cinco niveles de amenaza en la zona urbana de la ladera sur en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Por otro lado, Gaidzick et al. (2017) comparan mapas de susceptibilidad a deslizamientos en Guerrero, México, utilizando datos de alta resolución LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) de un inventario manual de eventos de deslizamientos y un algoritmo automatizado de inventario de deslizamientos, obteniendo resultados sobre laderas en menor tiempo.

Por otra parte, Ramos-Bernal et al. (2015) generaron cartografía de deslizamientos a partir de un algoritmo de decisión aplicando técnicas a priori de detección de cambios en imágenes de satélites de la zona costera de Guerrero y un inventario de deslizamientos a partir de fotografías aéreas disponibles en Google Earth. Asimismo, Rivera-García et al. (2020) establecieron la zonificación del deslizamiento de laderas en la región de Bahía de Banderas, México, utilizando la metodología del Bureau of Indian Standards. Hinojosa-Corona et al. (2011) analizaron el evento de deslizamiento de 2007 causado por precipitación anómala y actividad sísmica en el río Grijalva, Chiapas, mediante DEM e imágenes satelitales.

Cabe mencionar que se estima que los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de ladera solamente cubren 1% de los mismos en el planeta (Guzzetti et al., 2012); es decir, 99% aún se encuentran sin ser ubicados en un mapa, lo que puede representar un peligro potencial para las poblaciones alrededor del mundo. En México, donde se tiene susceptibilidad natural en dos terceras partes de su territorio, la información referente a deslizamientos, ya sea zonificación de susceptibilidades o sobre amenazas, riesgo y vulnerabilidad se considera escasa y heterogénea (Rivera-García et al., 2020).

En Tabasco la información relativa se reduce a la mostrada en el Atlas Nacional de Riesgos y al registro geoespacial de laderas del Centro Nacional de Prevención de

Desastres (CENAPRED). No obstante, esta es una problemática poco atendida en el estado de Tabasco, pues predominan los estudios sobre aspectos climáticos y la problemática de las inundaciones (i.e. Arreguín-Cortés, Rubio-Gutiérrez, Domínguez-Mora, & De Luna-Cruz, 2014; Valdés-Manzanilla, 2016; Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez, 2020).

El objetivo principal de este manuscrito fue elaborar un mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera en Tabasco, México, mediante SIG. Por tanto, se busca identificar las áreas con mayor susceptibilidad a movimientos de ladera. Sobre esta base se concluye que el estudio realizado puede favorecer no únicamente la investigación en estos temas, sino también la reflexión y la toma de decisión de actores a nivel local en torno a la prevención de riesgos en Tabasco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estado de Tabasco se localiza al sureste de México, sobre la llanura costera del Golfo de México entre las coordenadas 17° 58' 20" N y 92° 35' 20" O. Tiene una superficie de 25,493.81 km², la cual acoge una población cercana a los 2.4 millones de habitantes, según datos del año 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Su territorio representa 1.3% de la superficie continental del país y administrativamente se encuentra configurado por 17 municipios. Limita al norte con el Golfo de México, al noreste con el estado de Campeche, al sur y oeste con los estados de Chiapas y Veracruz y al sureste con Guatemala (Ortiz-Pérez, Siebe, & Cram, 2005) (figura 1).

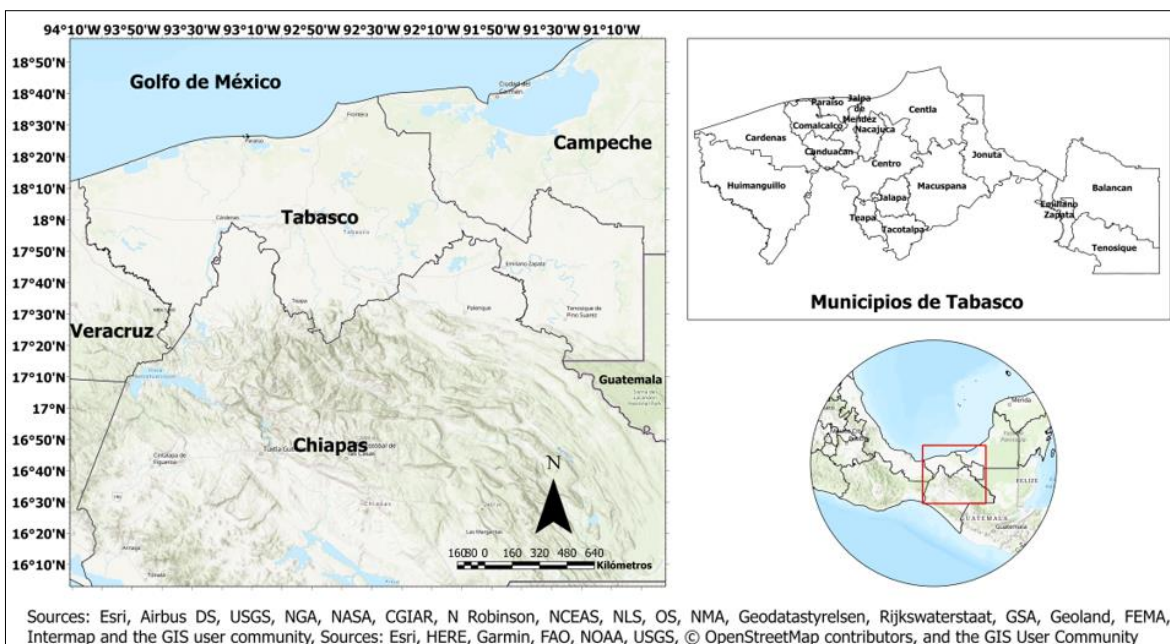


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Elaboración propia en ArcGisPro con información espacial de Airbus DS (s. f.), CGIAR (s. f.), Esri (s. f.), FAO (s. f.), FEMA (s. f.), Garmin (s. f.), Geodatasystelsen (s. f.), Geoland (s. f.), GISUser Community (s. f.), GSA (s. f.), HERE (s. f.), INEGI (s. f.), Intermap (s. f.), NASA (s. f.), NCEAS (s. f.), NGA (s. f.), NLS (s. f.), NMA (s. f.), NOAA (s. f.), N Robinson (s. f.), Open StreetMap Contributors (s. f.), OS Geo (s. f.), Rijkswaterstaat (s. f.) y USGS (s. f.).

Tabasco se caracteriza por tener un territorio con escasas elevaciones, algunas cercanas a los 1,000 m s. n. m. que forman parte de la Meseta Central de Chiapas. Comprende tres ambientes morfogénéticos: la Planicie Costera del Golfo Sur, la Península de Yucatán y la Sierra de Chiapas y Guatemala. A su vez, estos se subdividen en 12 paisajes geomorfológicos, de los cuales resaltan las terrazas costeras, las planicies palustres, fluvial activa y fluviodeltaica inactiva (Zavala-Cruz, Jiménez Ramírez, Palma-López, Bautista Zúñiga, & Gavi Reyes, 2016). Respecto a las características geolíticas, corresponden al periodo del Cuaternario con rocas ígneas extrusivas y arenas de aluvión. En cuanto a la edafología, se tienen vertisoles, gleysoles y fluvisoles (Ruiz-Álvarez, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, Ontiveros-Capurata, & López-López, 2012).

El clima es de tipo cálido con influencia marítima, registra una temperatura media anual de 22 °C (Arreguín-Cortés et al., 2014) y una precipitación promedio anual de 2,500 mm (Ruiz-Álvarez et al., 2012). En cuanto a su hidrología, previo a su descarga en el Golfo de México, Tabasco es receptor de dos de los más importantes ríos de México y la región: Grijalva y Usumacinta. En particular, el sistema Grijalva-Usumacinta es responsable de 30 a 40% de los escurrimientos superficiales de agua en México (García García & Kauffer Michel, 2011; March-Mifsut & Castro, 2010). Igualmente, este estado acoge una gran riqueza natural y enclaves naturales protegidos como la Reserva de Biósfera de Pantanos de Centla.

No obstante, históricamente se ha caracterizado por una alta exposición a eventos de inundación (Arreguín-Cortés et al., 2014; Valdés-Manzanilla, 2016) e intensivos procesos y transformaciones socioambientales del territorio (Tudela, 1990). Finalmente, las actividades socioeconómicas que coexisten en este estado son la agricultura, la ganadería y la explotación petrolera, principalmente.

Preparación de datos y áreas susceptibles a movimientos de ladera

La metodología utilizada en este artículo es una adaptación de la propuesta por Anbalagan, Chakraborty y Kohli (2008), utilizada actualmente como método normativo para gestiones territoriales y emplazamiento urbano por el Bureau of Indian Standards (Rivera-García et al., 2020). Adicionalmente, la practicidad de esta metodología y la disponibilidad de información para la zona estudiada permiten usar la metodología propuesta por Anbalagan et al. (2008) con fiabilidad y eficiencia. La metodología utilizada en esta investigación comprende los siguientes aspectos metodológicos:

- a) En primer lugar, se recopiló la siguiente información espacial: 1) Modelo Digital de Elevación: se utilizó un DEM de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) con resolución 90 x 90m obtenido a través de CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) (Jarvis, Reuter, Nelson, & Guevara, 2018); 2) Usos de suelo y vegetación (Serie VI), obtenida del INEGI y 3) Litología, obtenida del Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- b) En segundo lugar, a partir del DEM se generaron los mapas de elevación y pendientes (figura 2 inciso a y figura 2 inciso b), para este último fue necesario realizar una reclasificación con la herramienta Reclassify de ArcGis 10.5. Posteriormente, se llevó a cabo la selección de otros factores detonantes para el área de estudio en función de las condiciones topológicas y la disponibilidad de los datos para el estado de Tabasco. Los factores detonantes elegidos fueron uso de suelo y vegetación y litología, los cuales fueron procesados, clasificados y rasterizados utilizando ArcGIS 10.5 (figura 3 inciso a y figura 3 inciso b).

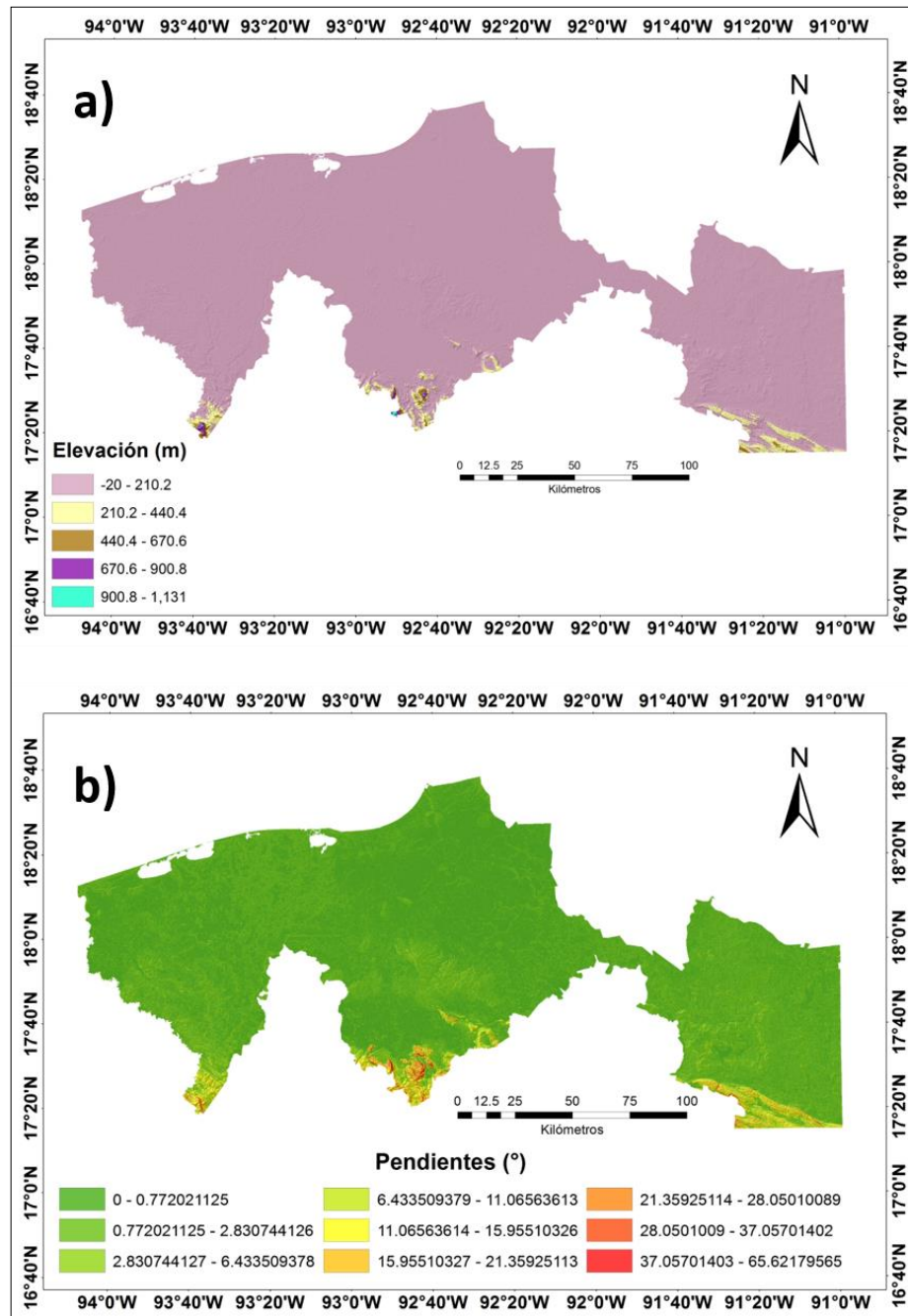


Figura 2. a) Mapa de elevaciones; b) Mapa de pendientes.
Elaboración propia en ArcGis 10.5 con información espacial de CGIAR
Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) (s. f.).

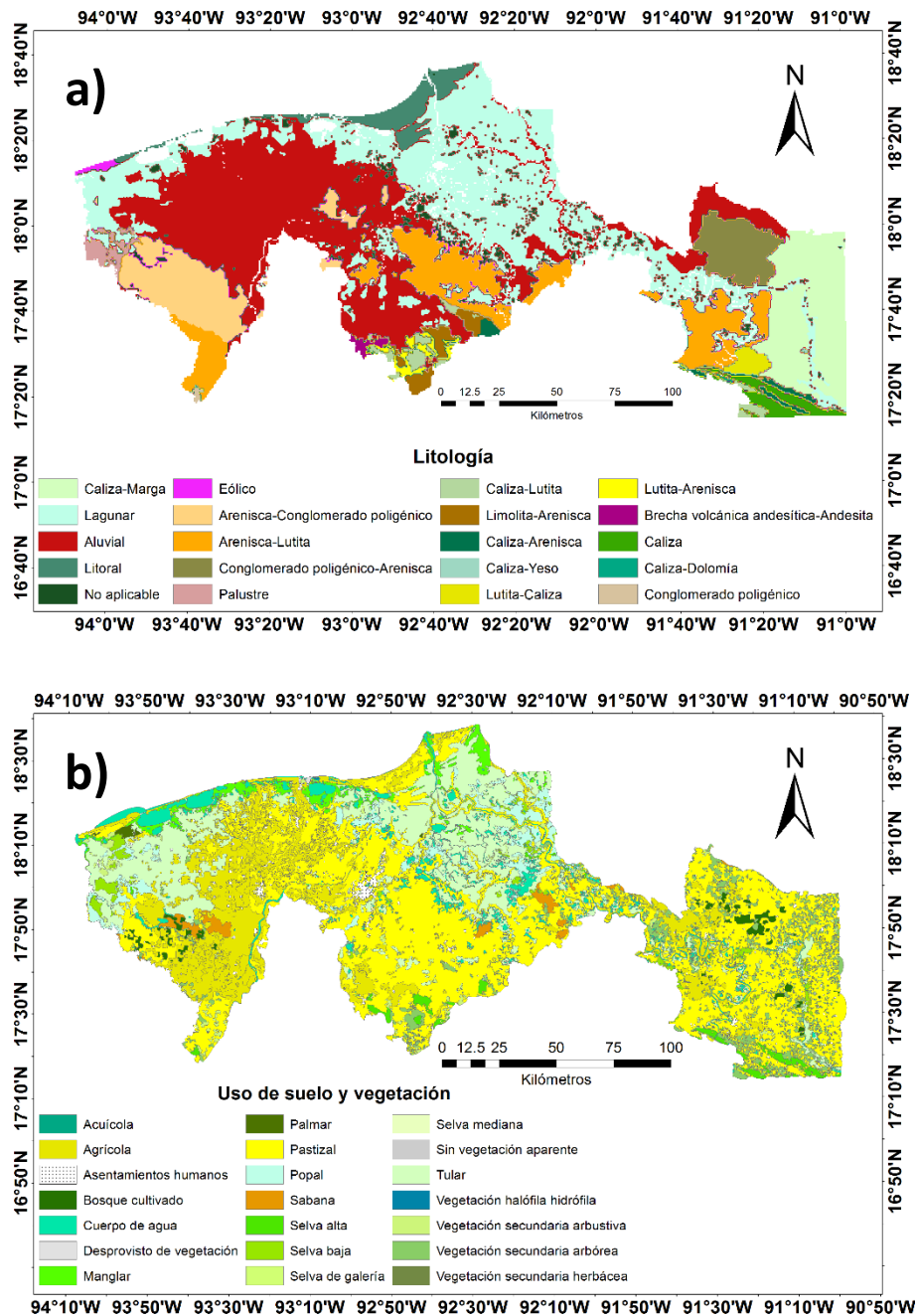


Figura 3. a) Mapa de litología; b) Mapa de uso de suelo y vegetación (Serie VI).

Elaboración propia en ArcGis 10.5 con información espacial del INEGI (s. f.) y el SGM (s. f.), respectivamente.

- c) Finalmente, se procedió a la suma de los ráster de pendientes reclasificados, de uso de suelo y vegetación, así como litología, clasificando el peso de cada factor según Anbalagan et al. (2008) en la tabla 1, con los datos disponibles y utilizando la

calculadora ráster de ArcGIS 10.5. Es un sistema numérico basado en los principales causales inherentes de la inestabilidad de taludes, como litología, uso de suelo y cobertura vegetal; cuyas clasificaciones máximas para varias categorías se determinan en función de su importancia estimada para causar inestabilidad. Con base en la asignación de pesos a los factores de pendiente reclasificada, uso de suelo y vegetación y litología, se obtuvo el mapa de susceptibilidad mediante la ecuación 1.

Tabla 1
Peso de los diferentes factores

Factor	Peso en el análisis
Litología	2
Estructura y discontinuidades	2
Morfometría del talud	2
Uso de la tierra y cobertura vegetal	2
Condiciones de aguas subterráneas	1
Relieve relativo	1
Total	10

Nota: Tomada de Anbalagan et al. (2008).

$$\text{Ecuación 1} = [(pendiente\ reclasificada)(0.4)] + [(uso\ de\ suelo\ y\ vegetación)(0.3)] + [(litología)(0.3)] = 1$$

RESULTADOS

Se obtuvo el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de ladera con cinco clases: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (figura 4 inciso a). A nivel estatal, se tiene un área total de susceptibilidad con categorías de moderada, alta y muy alta de 1,006.64 km², lo cual equivale a 3.95% de la superficie total del territorio tabasqueño. Esta área total de susceptibilidad del estado con categorías de moderada, alta y muy alta se encuentra concentrada en 95.6% en cinco municipios (962.13 km²), los cuales poseen cierta influencia del relieve del estado de Chiapas. En detalle, Tenosique (56.7%), Tacotalpa (19.84%), Huimanguillo (10.66%), Macuspana (6.53%) y Teapa (6.27%) representan los municipios donde se observan categorías de susceptibilidades moderada, alta y muy alta en mayor porcentaje del área total de susceptibilidad a movimientos de ladera en Tabasco (figura 4 inciso b, figura 4 inciso c y figura 4 inciso d). Adicionalmente, aunque con categoría moderada, 4.4% restante del área total de susceptibilidades del estado (44.51 km²) se concentra en los municipios de Balancán, Emiliano Zapata y Jonuta.

No obstante, según los resultados de la tabla 2, a nivel estatal la superficie total de área de susceptibilidad con categoría alta y muy alta alcanza 438.75 km². Esta área se concentra en los municipios de Tacotalpa, Tenosique y Teapa en 92.3% para una superficie de 404.81 km², siendo estos municipios los que poseen un mayor grado de exposición a este tipo de fenómeno. En particular Tacotalpa y Tenosique tienen los mayores porcentajes; 39.5% y 39.3%, respectivamente. El porcentaje restante de 7.7% del total de área de

susceptibilidad con categoría alta y muy alta agrupa tan solo a dos municipios, Huimanguillo y Macuspana con un área total para estas categorías de 33.9 km².

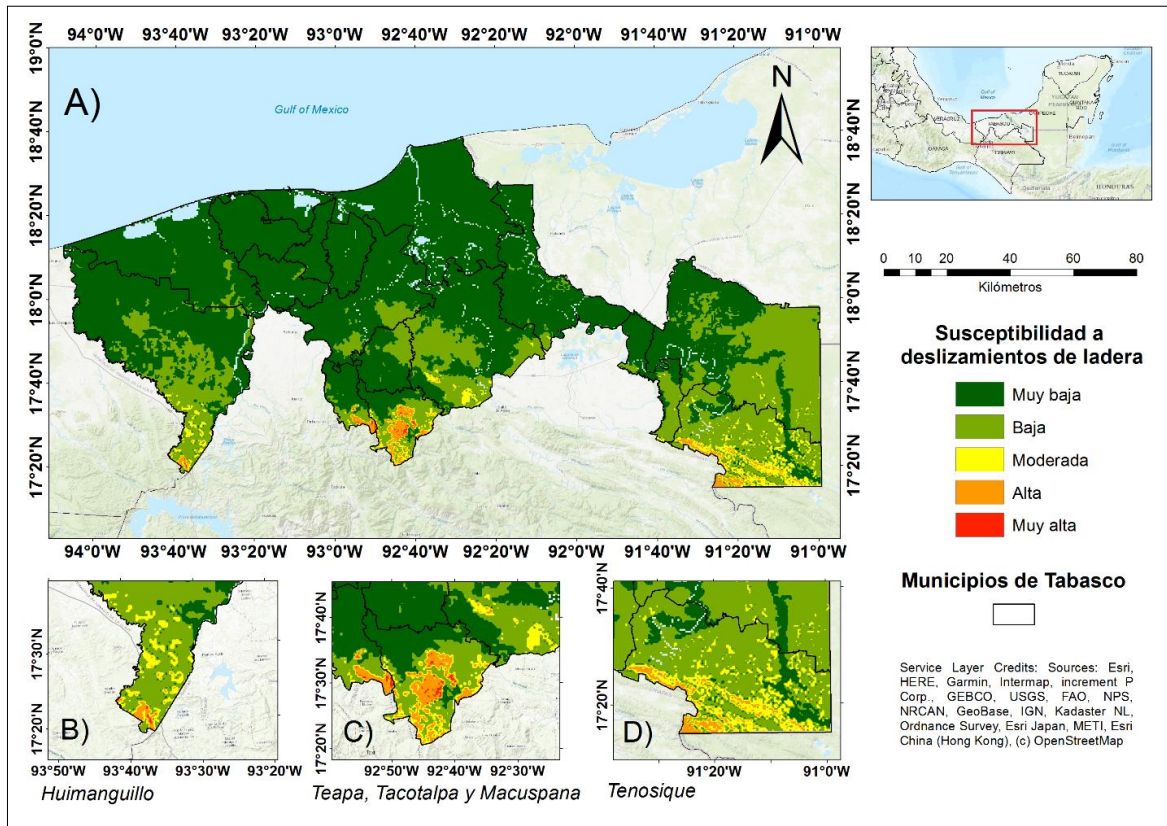


Figura 4. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de ladera de Tabasco.

Elaboración propia en ArcGisPro con información de Esri (s. f.), Esri China (Hong Kong) (s. f.), Esri Japan (s. f.), FAO (s. f.), Garmin (s. f.), GEBCO (s. f.), GeoBase (s. f.), HERE (s. f.), IGN (s. f.), Increment P Corp. (s. f.), Intermap (s. f.), Kadaster NL (s. f.), METI (s. f.), NPS (s. f.), NRCAN (s. f.), Open StreetMap Contributors (s. f.), Ordnance Survey (s. f.), y USGS (s. f.).

Tabla 2
Áreas de susceptibilidad a movimientos de ladera por municipio

MUNICIPIO	ÁREA DE SUSCEPTIBILIDAD (km ²)					ÁREA TOTAL (km ²)
	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta	
Balancán	1,576.27	2,014.30	35.17	0	0	3,626.10
Cárdenas	2,012.10	99.69	0	0	0	2,112.00
Centla	3,093.00	0	0	0	0	3,093.00
Centro	1,375.84	236.00	0	0	0	1,612.00
Comalcalco	723.20	0	0	0	0	723.20
Cunduacán	610.61	13.23	0	0	0	623.90
Emiliano Zapata	250.76	179.47	7.13	0	0	437.40
Jalapa	455.37	187.47	0	0	0	642.91
Jalpa de Méndez	468.53	3.78	0	0	0	472.36
Jonuta	1,488.35	84.93	2.21	0	0	1,575.64
Macuspana	1,418.27	955.51	58.24	4.14	0.49	2,436.89
Nacajuca	488.03	0.29	0	0	0	488.37
Tacotalpa	240.92	305.12	17.54	168.77	4.57	737.00
Teapa	450.57	168.86	1.29	53.64	5.37	679.80
Tenosique	225.34	1,326.63	373.04	171.62	0.84	2,098.10
Paraíso	377.55	0	0	0	0	377.55
Huimanguillo	2,476.25	1,178.38	73.27	27.43	1.88	3,757.59
Total	17,730.96	6,753.66	567.89	425.6	13.15	25,493.81

Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

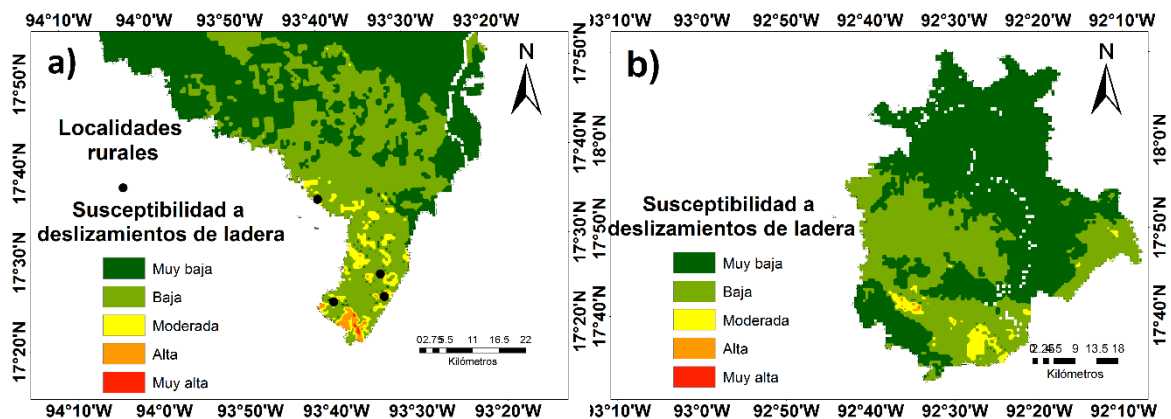
Los resultados obtenidos indican que las áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos de ladera corresponden a los municipios ubicados en la Sierra de Tabasco donde se concentran las mayores elevaciones y las pendientes más pronunciadas del estado, siendo considerados estos factores por Ramos-Bernal et al. (2015) como detonantes claves para la ocurrencia de deslizamientos. De acuerdo con la información geoespacial de la ubicación de laderas reportada por el CENAPRED (2018), los municipios de Tabasco con mayor nivel de susceptibilidad a deslizamientos de laderas son coincidentes a los mostrados en este estudio. A pesar de la poca información sobre deslizamientos a nivel estatal, la literatura hace referencia a algunos eventos. De acuerdo con CENAPRED (2014) el 3 de junio de 2000 en el cerro El Tortuguero, Macuspana, Tabasco, se registró un deslizamiento de rocas calizas con afectaciones en 7 ha y con origen antropogénico (CENAPRED, 2014).

En cuatro de los cinco municipios antes mencionados con categorías de susceptibilidad moderada, alta y muy alta se tiene una población total en potencial riesgo de 11,370 habitantes, distribuida en 40 localidades rurales en los municipios de Huimanguillo, Tacotalpa, Teapa y Tenosique; como se muestra en la tabla 3 y en la figura 5. En particular, el municipio con mayor proporción de población en potencial riesgo es Tacotalpa y, a su vez, el municipio con mayor área en categoría de susceptibilidad alta de todo el estado de Tabasco.

Tabla 3
Porcentajes de áreas de susceptibilidad y la población en potencial riesgo

MUNICIPIO	Porcentaje del área de susceptibilidad y la superficie total del municipio (%)			Superficie total del municipio (km ²)	Número de localidades en potencial riesgo	Población en potencial riesgo (habitantes)
	Moderada	Alta	Muy alta			
Macuspana	2.39	0.17	0.02	2,436.89	0	0
Tacotalpa	2.38	22.90	0.62	737.00	19	5,717
Teapa	0.19	7.89	0.79	679.80	7	3,859
Tenosique	17.78	8.18	0.04	2,098.10	10	1,390
Huimanguillo	1.95	0.73	0.05	3,757.59	4	404
Total						11,370

Nota: Elaboración propia con información estadística del INEGI (2021).



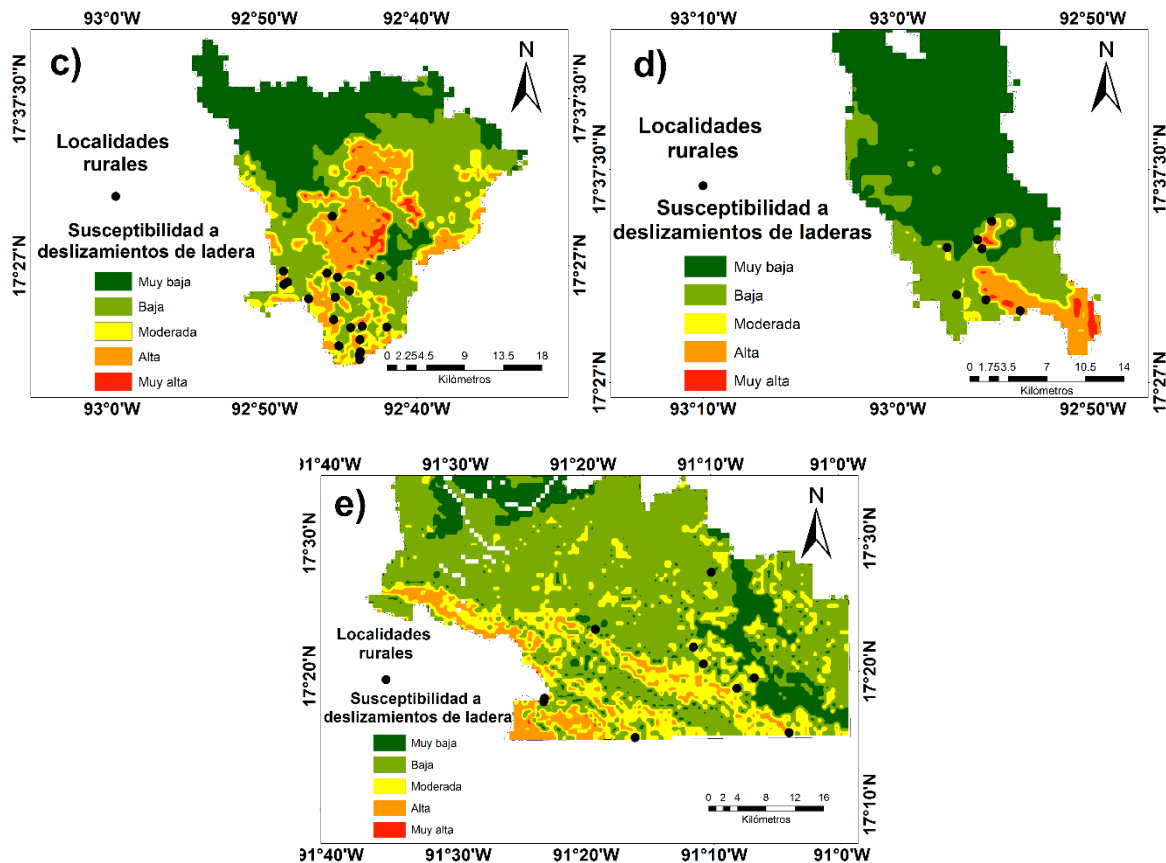


Figura 5. Localidades rurales con población en potencial riesgo: a) Huimanguillo; b) Macuspana; c) Tacotalpa; d) Teapa; e) Tenosique. Elaboración propia con información del INEGI (s. f.).

Las localidades rurales con riesgo potencial de sufrir deslizamientos de ladera por municipio son: a) Huimanguillo, en zonas de susceptibilidad moderada Gustavo Díaz Ordaz 1° Sección, Carlos A. Madrazo, La Soledad 2° Sección y Río Pedregal 2° Sección, con un total de 404 habitantes, lo que equivale a 0.21% de la población total del municipio; b) Tacotalpa, zonas de susceptibilidad moderada: Francisco I. Madero 2° Sección, Cerro Blanco 3° y 5° Sección, Nueva Esperanza, La Esperanza, Noypac, Nuevo Madero y La Cuesta, con un total de 2,470 habitantes, equivalente a 5.16% de la población total del municipio; en zonas de alta susceptibilidad: Buena Vista 1° Sección, Cerro Blanco 4° Sección, Cuitláhuac, Francisco I. Madero 1° Sección, Pomoquita, Tomás Garrido Canabal, La Pila, Villa Luz, El Shotal, San Manuel y Nueva Reforma, con un total de 3,015 habitantes, lo que equivale a 6.29% de la población total del municipio; c) Teapa, zonas de moderada susceptibilidad: Eureka y Belén, Vicente Guerrero (Las Nieves), Nicolás Bravo 1° Sección, Mariano Abasolo (Abasolito), Calcinado y Coconá, con 3,154 habitantes en total, equivalente a 5.37% de la población total del municipio; en zona de alta susceptibilidad se encuentra Vicente Guerrero (Guanal) con 705 habitantes, lo que equivale a 1.20% de la población total del municipio y d) Tenosique, zonas de moderada susceptibilidad: El Xotal 2° Sección, Nuevo Progreso, La Última Lucha, San Juan, Santa Cruz, San Pedro, Cortijo Nuevo 2° Sección y Reyes Morales, con 1,141 habitantes en total, lo que equivale a 1.83%

de la población total del municipio; zonas de alta susceptibilidad: Francisco I. Madero Ríos y Nueva Jerusalén, con un total de 249 habitantes, equivalente a 0.40% de la población total del municipio.

De acuerdo con los resultados obtenidos estas poblaciones poseen un cierto grado de vulnerabilidad (propiedades, actividades económicas, servicios públicos, población humana, etc.) al estar en riesgo una determinada área ante la ocurrencia de este tipo de eventos. Además de la vulnerabilidad histórica a las inundaciones que ha caracterizado a Tabasco (Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez, 2020; Valdés-Manzanilla, 2016), se tiene que los eventos de deslizamientos de laderas representan un factor de riesgo en las áreas identificadas.

Es sabido que la variabilidad espacial de la humedad del suelo está influenciada por factores relacionados con la topografía, la vegetación y las propiedades del suelo (Wicki, Lehmann, Hauck, Seneviratne, Waldner, & Stähli, 2020). Asimismo, en relación con otros factores detonantes como el uso de suelo y vegetación se tiene que en las áreas donde se presenta mayor susceptibilidad en la zona estudiada predomina la vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia, distribuida en lugares con abundantes precipitaciones (CONABIO, 2019; Maldonado-Sánchez & Maldonado-Mares, 2010). En particular, se considera que factores como la precipitación representa una variable desencadenante de los movimientos pendiente abajo debido a la saturación del suelo, ya que la presencia de un bosque puede tener un gran impacto en el proceso de infiltración, en la saturación de las pendientes y en aumento de los niveles de agua subterránea dentro de la masa (Dahal, Hasegawa, Nonomura, Yamanaka, & Dhakal, 2008; Highland & Bobrowsky, 2008; Wicki et al., 2020).

A raíz de los resultados obtenidos, de acuerdo con lo reportado por Anbalagan et al. (2008) en otra investigación, las zonas clasificadas con susceptibilidad moderada se consideran como relativamente seguras para expansión urbana pero con áreas inestables, por lo que debe considerarse su monitoreo. En cambio, para las zonas clasificadas con susceptibilidad alta y muy alta es recomendable evitar el desarrollo urbano y las modificaciones del área, ya que la probabilidad de fenómenos asociados a deslizamientos de ladera es mayor. Por ello es clave disponer de medidas de mitigación del riesgo, es posible la implementación de proyectos de nivelación adecuada e ingeniería de pendientes, el monitoreo instrumental para detectar movimiento y la velocidad de movimiento del material, uso de medidores de inclinación, construcción de muros de contención al pie de las pendientes, pernos de roca y anclajes mecánicos. En áreas peligrosas se recomienda colocar señales de advertencia (Highland & Bobrowsky, 2008).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que 3.95% de la superficie total de Tabasco registra algún tipo de susceptibilidad entre las categorías moderada, alta y muy alta. Los niveles de susceptibilidad con categoría moderada, alta y muy alta se presentan a lo largo de cinco municipios de la sierra tabasqueña que poseen cierta influencia del relieve del sistema montañoso de Chiapas. En particular, en los municipios de Tenosique, Tacotalpa, Huimanguillo, Macuspana y Teapa se concentra 95.6% del área categorizada con susceptibilidad de entre moderada, alta y muy alta del estado. A su vez, los municipios de

Huimanguillo, Tacotalpa, Teapa y Tenosique concentran una población total en potencial riesgo de 11,370 habitantes distribuida en 40 localidades rurales, y en definitiva son las áreas estatales que requieren mayor atención para la prevención de este tipo de desastres. En dichas áreas los factores que detonan la inestabilidad de las laderas están relacionados con las pendientes, la vegetación, el uso de suelo, la litología y las precipitaciones.

Los resultados permitieron verificar la hipótesis. La clasificación propuesta por Anbalagan et al. (2008) ha mostrado ser factible para identificar las áreas susceptibles a deslizamientos de laderas. Por tanto, se recomienda que para el establecimiento de medidas de mitigación de riesgo a nivel local se analicen áreas más reducidas que el nivel estatal como municipios, poblados o carreteras y así obtener una mayor precisión, mejores resultados y una contribución directa al conocimiento de la población y actores locales.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A. C. (CCGS) por las facilidades durante la realización de esta investigación, así como a los revisores anónimos por los comentarios y recomendaciones. ORMP desea agradecer al programa Cátedras-CONACYT y al proyecto Cátedras-CCGS No. 963 "Hacia un manejo sustentable del agua en el sureste de México y áreas adyacentes de Centroamérica".

REFERENCIAS

- Aceves-Quesada, J. F., Legorreta-Paulín, G., Lugo-Hubp, J., Umaña-Romero, J., & Legorreta-Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 91, 43-55. doi: 10.14350/rig.46503
- Airbus DS. (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.airbus.com/space.html>
- Ali, S., Biermanns, P., Haider, R., & Reicherter, K. (2019). Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China-Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 999-1022. doi: 10.5194/nhess-19-999-2019
- Anbalagan, R., Chakraborty, D., & Kohli, A. (2008). Cartografía de la zona de peligro de los lados del mar (LHZ) en mesoescala para la planificación urbana sistemática en terreno montañoso. *Investigación Científica e Industrial*, 486-497.
- Andrade-Velázquez, M., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate. *Revista Bio Ciencias*, 7, e905. doi: 10.15741/revbio.07.e905

- Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., & De Luna-Cruz, F. (2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 5-32. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000300001
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2014). Inestabilidad de laderas. Serie *Fascículos*. Recuperado el 2 de julio de 2020, de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/7-FASCICULOINESTABILIDADELADERAS.PDF>
- _____ (2018). Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas [Mapa]. Recuperado el 28 de abril de 2020, de <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>
- CGIAR (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.cgiar.org/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2019). Selvas húmedas [Portal con información multimedia]. Recuperado el 20 de mayo de 2020, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/selvaHumeda.html>
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., & Dhakal, S. (2008). DEM-based deterministic landslide hazard analysis in the Lesser Himalaya of Nepal. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2(3), 161-178. doi: 10.1080/17499510802285379
- ESRI (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.esri.com/es-es/home>
- _____(2019). ArcGIS and ArcMap (ArcMap 10.5). Software Esri. Recuperado de www.esri.com
- _____(2020). ArcGIS Pro. Software Esri. Recuperado de <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- ESRI China (Hong Kong) (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.esrichina.hk/en-hk/home>
- ESRI Japan (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.esrij.com/>
- FAO (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <http://www.fao.org/home/en/>
- FEMA (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.fema.gov/es>

- Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M. T., Bunn, M., Leshchinsky, B. A., Olsen, M., & Regmi, N. R. (2017). Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1054-1079. doi: 10.1080/19475705.2017.1292560
- García García, A., & Kauffer Michel, E. F. (2011). Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: Un acercamiento a su delimitación y problemática general. *Frontera Norte*, 23(45), 131-161. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13618448005>>
- Garmin (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.garmin.com/en-US/>
- GEBCO (s. f.). [Base de datos]. Recuperada de <https://www.gebco.net/>
- GeoBase (s. f.). [Base de datos]. Recuperada de http://www.geobase.com/__media__js/trademark.php?d=www.geobase.com&type=ns
- Geodatasyrelsen (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://gst.dk/>
- Geoland (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.geoland.es/presentaci%C3%B3n.html>
- GISuser Community (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://gisuser.com/>
- GSA (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.gsa.gov/>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- HERE (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.here.com/>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook-A guide to understanding landslides. Circular 1325* (129 pp.). Reston, Virginia, US: US Geological Survey.
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V. M., Munguía-Orozco, L., & Meillón-Menchaca, O. (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 15-38. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000100003

- Huabin, W., Gangjun, L., Weiya, X., & Gonghui, W. (2005). GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 29(4), 548-567. doi: 10.1191/0309133305pp462ra
- IGN (s. f.). [Dato colocado por el programa computacional ArcGis como colaborador en la elaboración del mapa base].
- Increment P Corp. (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://geot.jp/english/business/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s. f.). Biblioteca digital de mapas del INEGI. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html>
- _____ (2021). Censo General de Población y Vivienda 2020. México: Autor. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Intermap (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.intermap.com/>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2018). Hole-Filled SRTM for the Globe Version 4. CGIAR-CSI SRTM 90 m Database 2008 [Portal de datos geológicos]. Recuperado el 1 de julio de 2020, de <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Kadaster NL (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.kadaster.nl/>
- Maldonado-Sánchez, E. A., & Maldonado-Mares, F. (2010). Estructura y diversidad arbórea de una selva alta perennifolia en Tacotalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 26(3), 235-245. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000300003
- March-Mifsut, I., & Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. En H. Cotler Ávalos (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización* (pp. 193-197). México, D. F.: SEMARNAT-INE-IAP. Recuperado el 5 de junio de 2020, de <https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-de-mexico-diagnostico-y-priorizacion/>
- Meena, S. R., & Nachappa, T. G. (2019). Impact of spatial resolution of digital elevation model on landslide susceptibility mapping: A case study in Kullu Valley, Himalayas. *Geosciences*, 9(8), 360. doi: 10.3390/geosciences9080360
- Mergili, M., Marchant-Santiago, C. I., & Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5159334>

- METI (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <http://meti.org/>
- NASA (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.nasa.gov/>
- NCEAS (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.nceas.ucsb.edu/>
- NGA (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.nga.mil/Pages/Default.aspx>
- NLS (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.oracle.com/index.html>
- NMA (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://geohive.ie/nma.html>
- NOAA (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.noaa.gov/>
- NPS (s. f.). [Dato colocado por el programa computacional ArcGis como colaborador en la elaboración del mapa base].
- NRCAN (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.nrcan.gc.ca/home>
- N Robinson (s. f.). [Dato colocado por el programa computacional ArcGis como colaborador en la elaboración del mapa base].
- Open StreetMap Contributors (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.openstreetmap.org/>
- Ordnance Survey (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.ordnancesurvey.co.uk/>
- Ortiz-Pérez, M. A., Siebe, C., & Cram, S. (2005). *Diferenciación ecogeográfica de Tabasco*. México D.F.: UNAM-CONABIO.
- OS Geo (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.osgeo.org/>
- Paz-Tenorio, J. A., González-Herrera, R., Gómez-Ramírez, M., & Velasco-Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 92, 128-143. doi: 10.14350/ig.52822
- Quesada-Román, A., Moncada-López, R., Paz-Tenorio, J. A., Espinoza-Jaime, E., Gutiérrez-Gutiérrez, C., Castellón-Meyrat, A., & Acosta-Galeano, N. (2018). Las investigaciones sobre movimientos de laderas en Costa Rica, Honduras, México y Nicaragua: Enseñanzas desde la academia, las agencias de cooperación y las instituciones públicas. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60), 17-60. doi: 10.15359/rgac.60-1.1

- Ramos-Bernal, R. N., Vázquez-Jiménez, R., Romero-Calcerrada, R., Novillo Camacho, C. J., Arrogante-Funes, P., & Sánchez-Tizapa, S. (2015). Identificación de deslizamientos de laderas aplicando técnicas de detección de cambios a imágenes Landsat en la zona costera del estado de Guerrero, México. *Análisis espacial y representación geográfica: Innovación y aplicación*, 827-834. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7386203>
- Rijkswaterstaat (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.rijkswaterstaat.nl/>
- Rivera-García, J. E., Cruz-Romero, B., & Morales-Hernández, J. C. (2020). Zoning the susceptibility to landslides associated with natural phenomena in the Bahía de Banderas región. *Revista Bio Ciencias*, 7, e892. doi: 10.15741/revbio.07.e892
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., Ontiveros-Capurata, R. E., & López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 28(1), 1-14. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000100001&lng=es
- Servicio Geológico Mexicano. (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.gob.mx/sgm>
- Shahabi, H., & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific Reports*, 5, 1-15. doi: 10.1038/srep09899
- Szyplula, B. (2017). Digital elevation models in Geomorphology. In D. P. Shukla (Ed.), *Hydro-Geomorphology-Models and Trends* (pp. 81-112). London: IntechOpen Limited. doi: 10.5772/intechopen.68447
- Tudela, F. (1990). Recursos naturales y sociedad en el trópico húmedo tabasqueño. En E. Leff (Coord.), *Medio ambiente y desarrollo en México: Vol. 1* (pp. 149-227). México: Porrúa.
- USGS (s. f.). [Portal electrónico]. Recuperado de <https://www.usgs.gov/>
- Valdés-Manzanilla, A. (2016). Historical floods in Tabasco and Chiapas during sixteenth-twentieth centuries. *Natural Hazards*, 80, 1563-1577. doi: 10.1007/s11069-015-2039-5
- Wicki, A., Lehmann, P., Hauck, C., Seneviratne, S. I., Waldner, P., & Stähli, M. (2020). Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides*, 17, 1881-1896. doi: 10.1007/s10346-020-01400-y

- Zavala-Cruz, J., Jiménez Ramírez, R., Palma-López, D. J., Bautista Zúñiga, F., & Gavi Reyes, F. (2016). Paisajes geomorfológicos: Base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 161-171. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282016000200161&lng=es&tlng=es



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licencianta no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licencianta.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.