

SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA TANCÍTARO, MICHOACÁN, MÉXICO

Dagne Boudet-Rouco¹, Manuel E. Mendoza^{1 y 2}, y Alejandro César Valdés-Carrera¹

¹Posgrado en Geografía. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México

²Centre for Natural Hazard Research (CNHR), Department of Earth Science, Simon Fraser University, Canada

Email: dboudet@pmip.unam.mx, mmendoza@ciga.unam.mx, avaldes@pmip.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9132-5999>

Recibido: mayo 2023	Aceptado: julio 2023
---------------------	----------------------

Resumen

Se identificaron las zonas susceptibles a la ocurrencia de procesos de remoción en masa en la cuenca Tancítaro, Michoacán, México. Se aplicó una evaluación multicriterio, y la ponderación se realizó utilizando el proceso de análisis jerárquico que consideró el inventario multitemporal de eventos de remoción en masa, conocimiento experto, y la literatura antecedente sobre el tema. El modelo se validó con el método de Característica Operativa del Receptor (ROC). El valor de ROC fue 0.93, el cual se considera altamente preciso. Los factores condicionantes con mayor importancia relativa fueron: 1) inclinación de la pendiente 2) distancia a estructuras, y 3) geoformas. Las áreas con susceptibilidad muy alta a la ocurrencia de procesos de PRM representan el 1.6 % de la cuenca, la susceptibilidad alta 5.1 %, la susceptibilidad media 22.9 %, la susceptibilidad baja 50.1 %, la susceptibilidad muy baja 12.0 % y las zonas no susceptibles 8.3 %. Este es un análisis es útil en la gestión del territorio.

Palabras clave: análisis multicriterio, factores condicionantes, procesos de montañas

SUSCEPTIBILITY TO MASS REMOVAL PROCESSES IN THE TANCÍTARO BASIN, MICHOACÁN, MEXICO

Abstract

The areas susceptible to the occurrence of mass removal processes were identified in the Tancítaro basin, Michoacán, Mexico. A multi-criteria evaluation was applied, and the weighting was carried out using the hierarchical analysis process that considered the multi-temporal inventory of mass removal events, expert knowledge, and the antecedent literature on the topic. The model was validated with the Receiver Operating Characteristic (ROC) method. The ROC value was 0.93, which is considered highly accurate. The conditioning factors with the greatest relative importance were: 1) slope inclination, 2) distance to structures, and 3) geoforms. Areas with very high susceptibility to the occurrence of PRM processes represent 1.6% of the basin, high susceptibility 5.1%, medium susceptibility 22.9%, low susceptibility 50.1%, very low susceptibility 12.0% and non-susceptible areas 8.3%. This is an analysis that is useful in territory management.

Keywords: multicriteria analysis, conditioning factors, mountain processes

1.Introducción

Entre los peligros naturales más frecuentes son los deslizamientos de tierra, a menudo resultan en grandes víctimas y pérdidas económicas (Rong et al., 2020). La susceptibilidad a procesos de remoción en masa (PRM) se puede definir como la combinación de factores geoambientales que condicionan las fallas de taludes, y su determinación es uno de los pasos cruciales necesarios para comprender la ocurrencia de estos peligros, considerando las particularidades de cada región de estudio (Dikshit et al., 2020).

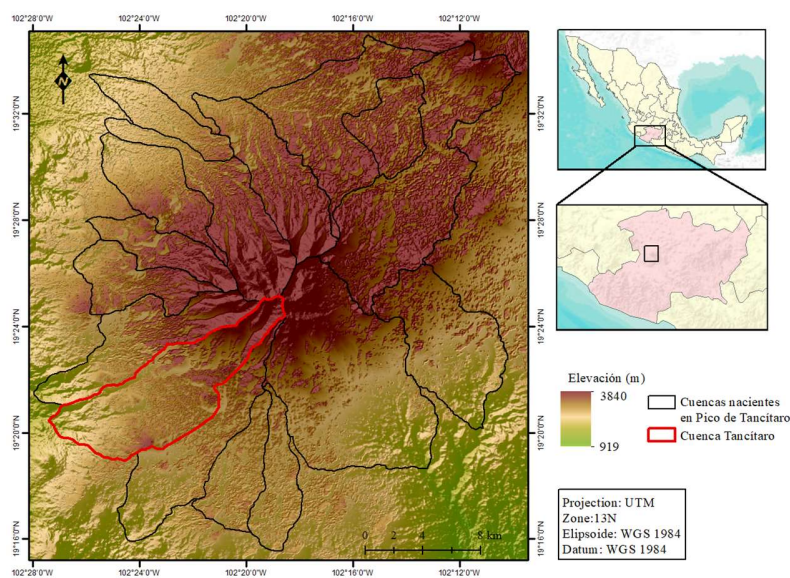
El riesgo de que ocurra determinado evento se compone del peligro que este representa, la vulnerabilidad y exposición de las poblaciones infraestructura económica, recursos naturales, y la capacidad de resiliencia ante la ocurrencia de desastres. El peligro, se compone de la susceptibilidad y probabilidad de factores inductores; para los PRM, la evaluación de la susceptibilidad es el paso clave de la evaluación del riesgo (Rong et al., 2020). La cartografía de las áreas que susceptibles a PRM es esencial para la planificación adecuada del uso de la tierra y la gestión de desastres en una localidad o región en particular (Ahmed, 2015).

El análisis de la susceptibilidad a deslizamientos puede ser cualitativo, cuantitativo, o semicuantitativo, dependiendo de los datos y técnicas utilizados para su evaluación. El análisis de susceptibilidad cualitativo se basa en un enfoque heurístico (experto) e histórico, lo que aporta una visión retrospectiva de los eventos sucedidos en una región. El análisis considera ciertas características físico-geográficas, permitiendo generar una zonificación de aquellas zonas afectadas, calificando su mayor o menor predisposición ante dicho evento (Soldano, 2009). Por otro lado, en el análisis de susceptibilidad cuantitativo se utilizan datos numéricos y estadísticos para medir y cuantificar la influencia de cada factor que contribuye a la susceptibilidad (Lee et al., 2003; Pradhan et al., 2010). El objetivo de esta investigación, es identificar cuáles son las zonas susceptibles a la ocurrencia de PRM provocados por precipitaciones en la cuenca Tancítaro, en el estado de Michoacán, México. La identificación se realizó mediante métodos semicuantitativos, que implican la identificación y evaluación de diferentes factores espaciales que pueden influir en la estabilidad del terreno, apoyado proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés). Esta técnica es muy adecuada para cualquier tipo de evaluación de peligros, ya que es una técnica de toma de decisiones utilizada para resolver problemas complejos, con muchos parámetros de objetivos interrelacionados o criterios en cuestión (Ahmed, 2015).

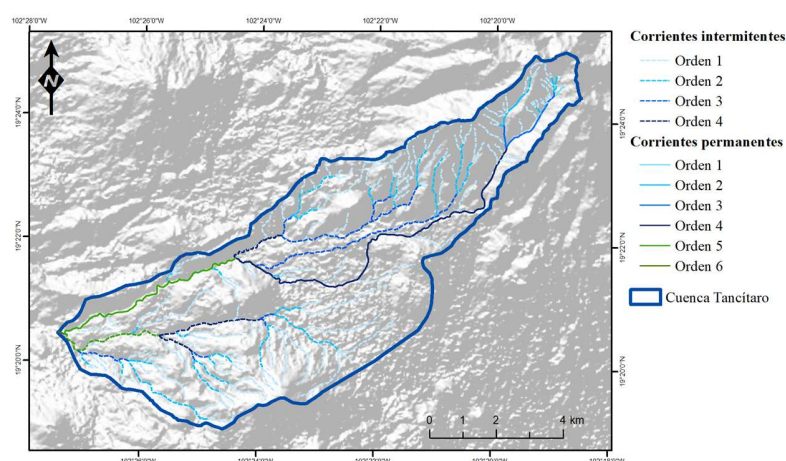
1.1. Caracterización del área de estudio

El Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro es la elevación de mayor altitud en el estado de Michoacán con 3840 msnm, localizada en el centro-oeste del Estado de Michoacán. Dentro de esta se encuentra el área de estudio es la cuenca Tancítaro, considerada una de las cuencas más importantes del Pico de Tancítaro debido, principalmente, a que en ella se localiza la población de Tancítaro y cabecera municipal. La cuenca se ubica al suroeste del Pico de Tancítaro con 66.3 km², su altura va de los 1386 a 3810 msnm y se ubica aproximadamente a 150 km de la costa del Pacífico (**Fig.1**).

El área de estudio pertenece a la Provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano. Geológicamente se trata de una región de origen volcánico, con predominio de basaltos y andesitas eel fuibales de Terciario y Cuaternario (Velázquez et al., 2003). La sismicidad registrada en la Región Volcánica Parícutin–Tancítaro, suele ser de magnitud baja a moderada (aunque existe una escasez de estaciones sísmicas cercanas), pero destaca el registro de 8 enjambres sísmicos ocurridos en los años de 1943, 1997, 1999, 2000, 2006, 2012, 2020 y 2021 (Gómez Calderón et al., 2021).



Es una cuenca cuya característica principal es la alteración que ha sufrido el régimen hídrico del cauce principal que, debería ser permanente y que no lo es debido a que el aprovechamiento total de sus aguas no permite el escurrimiento hasta la salida de la cuenca en todas las estaciones del año (Fuentes, 2004). De acuerdo con Fuentes (2004), la cuenca presenta un cauce largo y un área de tamaño mediano; la diferencia altitudinal pronunciada, el número de escurrimientos, el orden de corrientes, la densidad de drenaje y el coeficiente de masividad bajo, indican la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua, además en cuanto al tiempo de concentración, se observa un tiempo mayor entre la ocurrencia de la lluvia y la presencia de las crecidas. Las laderas orientadas al sur tienen un mayor número de escurrimientos, fundamentalmente en la cabecera y la zona de tránsito de la cuenca ubicada al noreste de la zona de estudio (Fig. 2).



La cabecera de la cuenca, ubicada al noreste del área de estudio, presenta laderas muy inclinadas, y algunas zonas donde llegan a ser extremadamente inclinadas. En zona de tránsito de la cuenca, la inclinación de la pendiente es moderadamente inclinada con algunas zonas poco inclinadas; y en la zona de acumulación presenta zonas planas y algunas elevaciones cuyas laderas llegan a ser muy inclinadas (Fig.3a). En cuanto a la orientación de las laderas, al

noreste de la zona de estudio, en la cabecera de la cuenca, las laderas se orientan al sur y al oeste; y en el caso de las más escarpadas, por lo general hacia el este. En el resto de la cuenca, se orientan al oeste en su mayor parte, y las más cercanas al parteaguas norte, se orientan al sur (**Fig. 3b**).

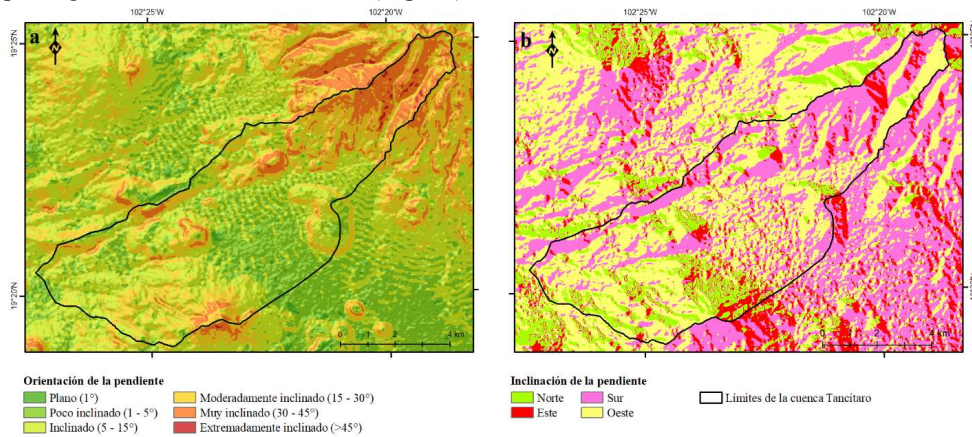


Fig. 3. a) Inclinación y b) Orientación de la pendiente en la cuenca Tancitaro. Fuente: Elaborado por la autora a partir de datos INEGI (2019)

Las rocas presentes, datan del Pleistoceno medio. En la cabecera de la cuenca, el tipo de roca es andesita, siendo las más jóvenes del área de estudio. Las rocas más antiguas se encuentran en la parte zona de tránsito y acumulación de la cuenca. Se encuentra tipo de roca, En la zona de tránsito de la cuenca se identifican depósitos de aluvión; al sureste de la cuenca y en la zona noroeste del parteaguas afloran basaltos, brecha volcánica basáltica y toba basáltica o la combinación de estas, en la zona de acumulación al sur de la cuenca, donde se identifica la mayor densidad de fracturas, fundamentalmente en la unidad del Cerro San Miguel (**Fig. 4**).

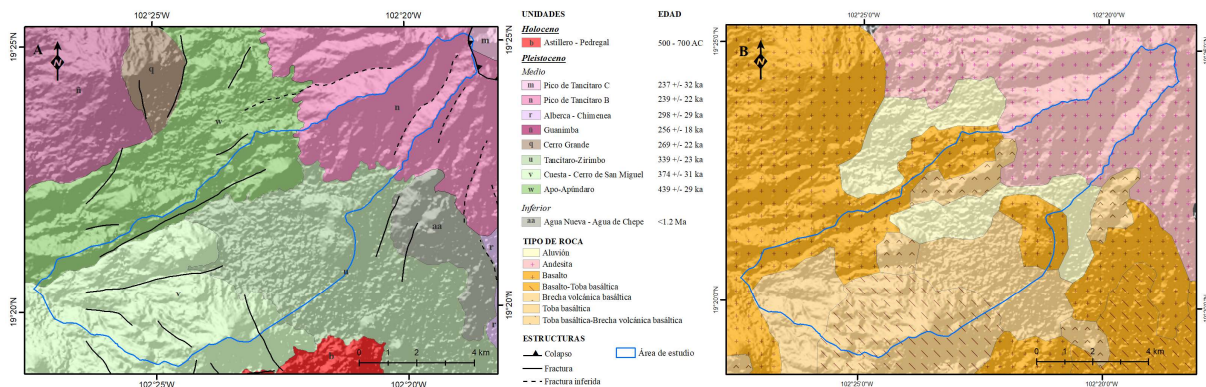


Fig. 4. a) Unidades geológicas y componentes estructurales (Fuente: Valdés Carrera et al. (2022)) y **b) Tipo de roca** (Fuente: INEGI, 1984) en la cuenca Tancitaro

Las geoformas aquí presentes, corresponden a productos volcánicos y sedimentos derivados de tales productos (Velázquez et al., 2003). Al noreste de la zona de estudio, en la parte más alta de la cuenca, se encuentra una zona de valle de origen glaciario, seguidos de valles fluviales que están rodeados de laderas de muy escarpadas a escarpadas. En la parte media de la cuenca, se encuentran laderas de medias a suaves y algunos domos lávicos, así como valles fluviales que se extienden desde la parte alta de la cuenca. En la parte baja de la cuenca, se encuentran varios conos volcánicos y domos sobre el piedemonte, así como valles fluviales que se hacen más anchos en la planicie interlávica de la salida de la cuenca (**Fig. 5**).

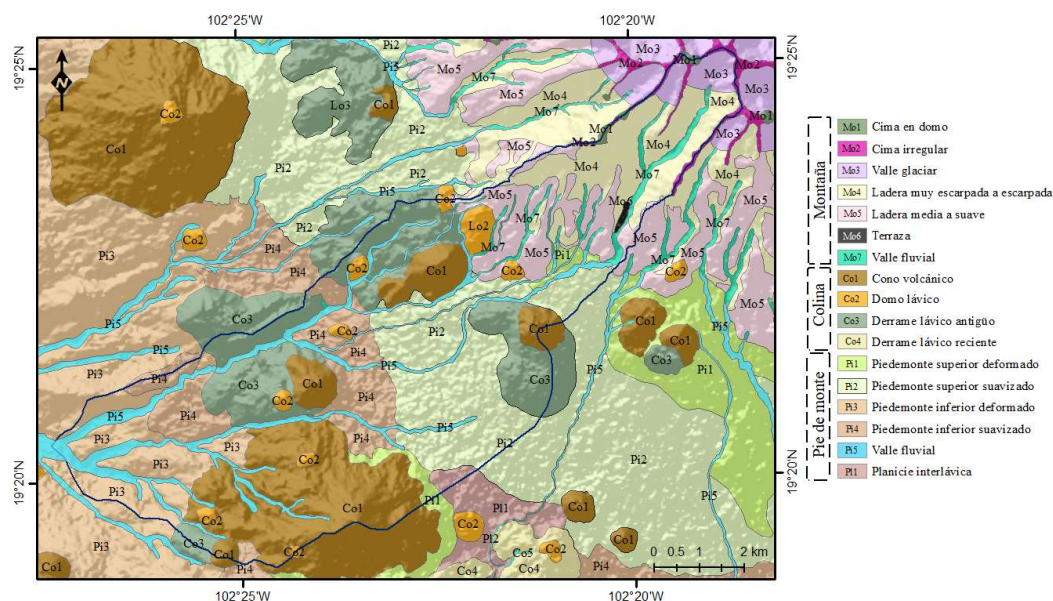


Fig. 5. Unidades de paisajes geomórficos en la cuenca Tancítaro. Fuente: Valdés Carrera et al. (2022)

Los suelos se han desarrollado a partir de cenizas, producto de las erupciones volcánicas, al menos 30% de los terrenos del Pico de Tancítaro, se encuentran cubiertos por espesores variables de cenizas del volcán Parícutín, en función de la cercanía al volcán y la topografía del terreno (Velázquez et al., 2003). Predominan los suelos de tipo andosol en la mayor parte de la cuenca cuyo origen es volcánico, constituidos principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo (INEGI, 2004). En la parte alta de la cuenca predominan el andosol dúctil epiléptico con textura arenosa gruesa (más de 65% de arena); en la parte media predomina el andosol epiesquelítico vítrico y andosol úmbrico vítrico, ambos con textura media (equilibrados generalmente en el contenido de arena, arcilla y limo); y en la parte baja se predomina el andosol dúctil vítrico, igualmente con textura media (Valdés Carrera et al., 2022; Fig. 6a).

En las zonas bajas de la cuenca, con poca inclinación de la pendiente o planas, está dedicada a la agricultura permanente (30.3 km²), fundamentalmente al cultivo del aguacate, a la agricultura temporal (7.0 km²), sobre todo maíz y hortalizas y se encuentran varios asentamientos humanos como Tancítaro y Apúndaro. En la parte media de la cuenca donde las pendientes son medianamente inclinadas, prevalece el bosque mixto (16.5 km²); también se pueden encontrar algunas zonas con pastizales (0.4 km²) y bosque mesófilo de montaña (0.1 km²). En la parte alta de la cuenca donde las pendientes son muy inclinadas, llegando a ser extremadamente inclinadas en algunas laderas, se encuentra bosque de oyamel (4.8 km²) y bosque de pino de altura-Zacatonal (3.9 km²) (Valdés Carrera et al., 2022; Figura 6b).

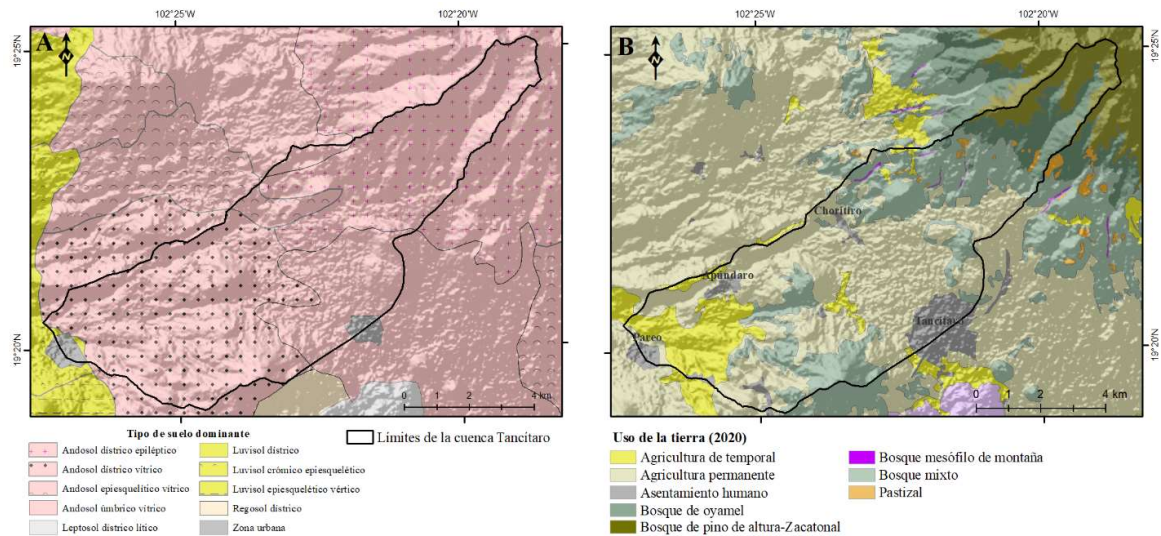


Fig. 6. a) Tipo de suelo dominante (Fuente: INEGI, 2007) **y b)** cobertura y uso de la tierra (Fuente: Valdés Carrera et al., 2022) en la cuenca Tancitaro

De acuerdo con el mapa de climas elaborado por García (2004) y con base en la clasificación climática de Köppen modificado por García, 1998, se observan 4 tipos de clima en la zona de estudio (Cb'(m) semifrío, húmedo con verano fresco largo, C(m) templado, húmedo, (A)C(w2) semicálido subhúmedo del grupo C, y (A)C(w1) semicálido subhúmedo del grupo C). La mayor diferenciación entre los climas identificados responde al comportamiento de la temperatura en función de los pisos altitudinales; sin embargo, en cuanto a la precipitación en la cuenca, se distinguen condiciones húmedas en la zona más alta y subhúmedas en la más baja.

La precipitación anual promedio de acuerdo con la norma climática del período 1991-2020 es de 903.3 mm. El período de lluvias se presenta entre junio y octubre, acumulando el 92.1 % de la precipitación y el período seco, entre noviembre y mayo acumula el 7.9 % restante. Los mayores acumulados mensuales, se presentan en los meses de julio y agosto. La mayor cantidad de días con lluvia ocurre en los meses de julio y agosto, aunque en junio y septiembre se registra la mayor cantidad de días como promedio con amulados superiores a 20 mm en 24 horas (Fig. 7).

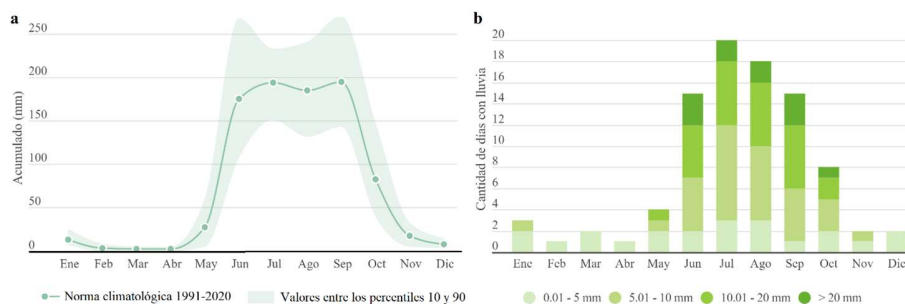


Fig. 7. a) Acumulado medio mensual **b)** cantidad de días con lluvia en la cuenca Tancitaro. Norma climatológica 1991-2020. Fuente: Elaborado a partir de los datos de CHIRPS¹.

2. Materiales y Métodos

¹ “The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations” (CHIRPS) elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la Universidad de California, Santa Barbara (UCSB)

<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>

La elaboración de las zonas susceptibles a PRM se elaboró a partir de la evaluación multicriterio que combina factores físico-geográficos espaciales para clasificar y evaluar susceptibilidad a PRM (Arca et al., 2018); y para la elaboración de las capas temáticas necesarias, se utilizaron los insumos enunciados en la Tabla I. Estas se trabajaron con un tamaño de pixel de 10 x 10 m y se utilizó la proyección UTM Zona 13, datum WGS84, elipsoide WGS84.

Tabla I. Insumos utilizados para generar las condiciones de susceptibilidad a PRM e inundaciones

Tema	Factores	Fuente
Geología	Tipo de roca (Escala 1:250 000)	INEGI (1984)
	Unidades geológicas y componentes estructurales (Escala 1:50 000)	Valdés Carrera et al. (2022)
Morfometría	Topografía (curvas de nivel) (Escala 1:50 000)	INEGI (2019)
	Modelo digital de elevación (MDE, resolución 10 m x 10 m)	Elaborado a partir de la topografía
	Modelo de sombras (resolución 10 m x 10 m)	Elaborado a partir del MDE
	Inclinación de la pendiente (resolución 10 m x 10 m)	Elaborado a partir del MDE
	Orientación de la pendiente (resolución 10 m x 10 m)	Elaborado a partir del MDE
	Geometría del terreno (resolución 10 m x 10 m)	Elaborado a partir del MDE
Otros	Cobertura y uso de la tierra (Escala 1:50 000)	Valdés Carrera et al. (2022)
	Inventario de PRM (Escala 1:50 000)	Valdés Carrera et al. (2022)
	Unidades de paisajes geomórficos (Escala 1:50 000)	Valdés Carrera et al. (2022)
	Tipo de suelo (Escala 1:50 000)	Valdés Carrera et al. (2022)

El método de proceso de AHP, desarrollado por Saaty (1977), es una técnicas de evaluación multicriterio donde se evalúa la influencia de cada factor y asigna valores dentro de un rango definido de clases de factores, determinando así, la susceptibilidad ambiental a un peligro específico.

El uso del método AHP implica la comparación por pares de los mapas de factores o variables de decisión. Inicialmente, a cada mapa de factores se le asigna un peso contra todos los demás factores para construir una matriz de comparación por pares. En AHP, se utiliza la razón de consistencia para determinar la consistencia de los resultados; un valor superior a 0.1 indica clasificaciones de factores inconsistentes y el modelo se descarta (Saaty, 1977).

El peso asignado a los factores espaciales, fue basado en la revisión de publicaciones anteriores (Arca et al., 2018; González-Arqueros et al., 2018; Dikshit et al., 2020; Saha & Agrawal, 2020), la disponibilidad de datos de entrada y el criterio de experto. Se utilizó para este análisis la herramienta Spatial Multi-Criteria Evaluation del sistema de información geográfica ILWIS 3.31 Academic.

Se elaboró un árbol de criterios, donde se definió la importancia relativa a partir de la asignación de un peso a cada uno de los factores espaciales que condicionan la ocurrencia de PRM (Tabla II). Se utilizó una restricción espacial en el modelo donde se indicó áreas sin susceptibilidad en los valles fluviales que se encuentran en el piedemonte y los lomeríos.

Tabla II. Factores utilizados y peso asignado dentro la evaluación multicriterio de la susceptibilidad a PRM

Grupos	Factores espaciales	Criterios	Peso de cada criterio	Peso de cada factor espacial
Morfología de laderas (Peso: 0.73)	Inclinación de la pendiente	Plano (<1°)	0.00	0.73
		Poco inclinado (1-5°)	0.06	
		Inclinado (5-15°)	0.07	
		Moderadamente inclinado (15-30°)	0.13	
		Muy inclinado (30-45°)	0.26	
		Extremadamente inclinado (>45°)	0.48	
		Razón de consistencia: 0.05		
	Orientación pendiente	Norte	0.00	0.19
		Sur	0.41	
		Este	0.41	
		Oeste	0.17	
		Plano	0.00	
		Razón de consistencia: 0.08		
	Geometría del terreno	Cóncavo	0.22	0.08
		Plano	0.00	
		Convexo	0.78	
		Razón de consistencia: 0.03		
	Razon de consistencia: 0.06			
Factores hidro estructurales (Peso: 0.19)	Distancia a drenajes	0-100 m	0.75	0.83
		100-300 m	0.18	
		>300 m	0.07	
		Razón de consistencia: 0.02		
	Distancia a estructuras	0-300 m	0.78	0.17
		300-500 m	0.15	
		>500 m	0.07	
		Razón de consistencia: 0.07		
	Razón de consistencia: 0.09			
	Factores del paisaje (Peso: 0.08)	Geoformas	Ladera muy escarpada a escarpada	0.41
Ladera media a suave			0.24	
Terraza			0.16	
Cono volcánico			0.10	
Domo lávico			0.06	
Derrame lávico			0.02	
Razón de consistencia: 0.08				
Tipo de suelo		Andosol dístrico epiléptico	0.36	0.11
		Andosol dístrico vítrico	0.12	
		Andosol epiesquelético vítrico	0.12	
		Andosol úmbrico vítrico	0.35	
		Luvisol crómico epiesquelético	0.04	
		Zona urbana	0.03	

	Razón de consistencia: 0.09		
Uso de la tierra	Bosque de oyamel	0.38	0.22
	Bosque de pino de altura-zacatonal	0.07	
	Bosque mixto	0.22	
	Bosque mesófilo de montaña	0.13	
	Agricultura temporal	0.03	
	Agricultura permanente	0.03	
	Asentamiento humano	0.01	
	Pastizal	0.03	
	Vegetación riparia	0.03	
	Área sin vegetación	0.07	
	Razón de consistencia: 0.09		
Tipo de roca	Andesita	0.36	0.05
	Brecha volcánica basáltica	0.17	
	Toba básica-Brecha volcánica basáltica	0.07	
	Basalto	0.14	
	Basalto-Toba basáltica	0.20	
	Toba basáltica	0.07	
	Aluvión	0.00	
	Razón de consistencia: 0.09		
Razón de consistencia: 0.09			

Razón de consistencia del modelo: 0.05

El mapa de susceptibilidad se dividió en 6 categorías: No susceptible (0), Muy baja (0.01-0.2), Baja (0.21-0.4), Media (0.41-0.6), Alta (0.61-0.8) y Muy alta (0.81-1).

La precisión de un modelo se evalúa analizando el acuerdo entre los resultados de este y los datos observados, dado que los datos observados comprenden la presencia/ausencia de PRM dentro de una determinada unidad de terreno. Se consideró el inventario de PRM realizado por Valdés Carrera et al. (2022) para asignar el peso correspondiente a cada factor, teniendo en cuenta su ocurrencia en cada zona. Además, se utilizó para determinar la frecuencia real de estos eventos en áreas donde el modelo indica una mayor susceptibilidad. En el cálculo de la curva ROC, se utilizaron 38 puntos donde se registró la ocurrencia de PRM.

La curva ROC (acrónimo de Receiver Operating Characteristic, o Característica Operativa del Receptor) se considera un método eficiente para validar modelos de susceptibilidad a deslizamientos de tierra (Frattini et al., 2010). En la curva ROC, la sensibilidad del modelo (el porcentaje de píxeles de PRM existentes predichos correctamente por el modelo) se traza contra la especificidad 1 (el porcentaje de píxeles de PRM predichos sobre el área total de estudio) (Youssef et al., 2015).

El área bajo la curva ROC (AUC) representa la calidad del modelo para predecir de manera confiable la ocurrencia o no ocurrencia de un PRM, y un modelo de ajuste perfecto tiene un valor AUC de 1. El rango de valores del AUC es de 0.5 a 1 representa buen ajuste, mientras que los valores inferiores a 0.5 representan un ajuste aleatorio (Jaafari et al., 2014) y fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$AUC = \frac{\sum TP + \sum TN}{(P + N)}$$

Donde P es el número total de deslizamientos de tierra, N es el número total de no deslizamientos de tierra, TP el valor de los verdaderos positivos y TN el valor de los falsos positivos.

3.Resultados y discusión

El mapa de susceptibilidad en clases se presenta en la **fig. 7**. Las áreas con muy alta susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de PRM representan el 1.6 % de la cuenca, la susceptibilidad alta 5.1 %, la susceptibilidad media 22.9 %, la susceptibilidad baja 50.1 %, la susceptibilidad muy baja 12.0 % y las zonas no susceptibles 8.3 %. La mayor susceptibilidad se encuentra, principalmente, en la cabecera de la cuenca donde se los factores condicionantes se combinan de manera favorable para la ocurrencia de PRM. En esta zona se encuentran las laderas más inclinadas, con pendientes de muy inclinadas a extremadamente inclinadas. Las pendientes orientadas hacia el este y el sur poseen la mayor cantidad de escurrimientos; lo que, sumado al tipo de suelo de esta zona, que es andosol dístico epiléptico, y tiene una textura arenosa gruesa que favorece la infiltración del agua, propicia una mayor humedad del suelo. El tipo de roca de las zonas con alta susceptibilidad es andesita y basalto.

El uso de la tierra de la tierra en las zonas más susceptibles es de bosques de oyamel, bosques de pino de altura-zacatonal y bosque mixto. Aunque en general, las raíces pueden reforzar mecánicamente suelos poco profundos en paisajes boscosos, los bosques tienen variaciones en las especies de vegetación y la edad que pueden dominar la estabilidad local de los sitios de iniciación de PRM, que unido a la perturbación antropogénica modifica la cohesión de las raíces (Schmidt et al., 2001; Valdés Carrera et al., 2022). A pesar de que esta es un área natural protegida, en estas zonas aumentan su susceptibilidad a PRM al promover la deforestación para la apertura de caminos, senderos y parcelaciones, así como actividad ganadera (Valdés Carrera et al., 2022).

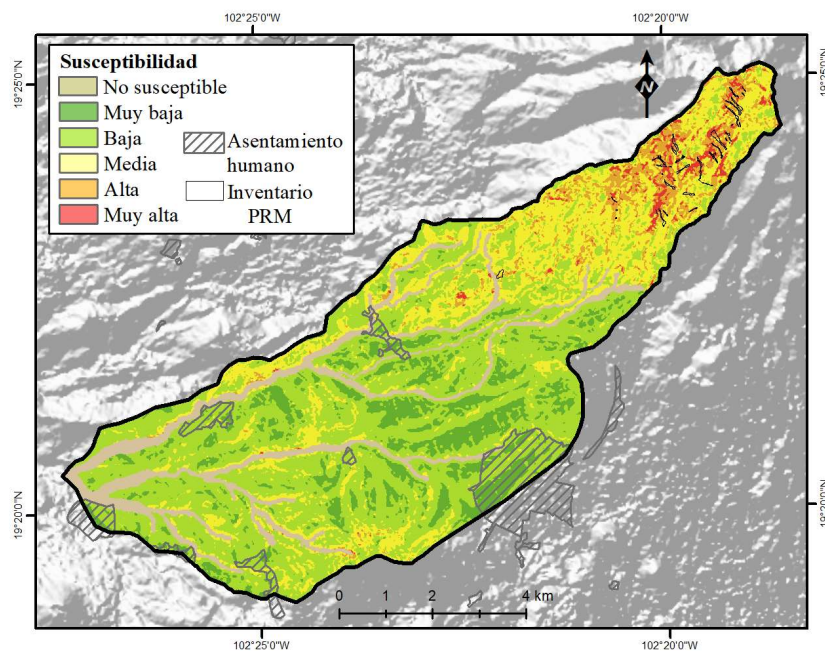


Fig. 7. Susceptibilidad a ocurrencia de PRM de la cuenca Tancitaro

El análisis resultante de la curva ROC del modelo de susceptibilidad a PRM, presenta un buen ajuste del modelo ya que el valor calculado de AUC fue de 0.93 (**Fig. 8**).

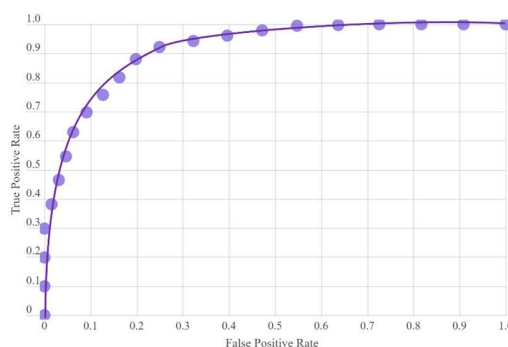


Fig. 8. Curva ROC del modelo de susceptibilidad a PRM

Conclusiones

Los PRM son amenazas que ocurren súbitamente, por lo que el reconocimiento y cartografía de áreas susceptibles a los mismos deben ser del interés de las organizaciones gubernamentales ya que facilita la tomar medidas preventivas y de mitigación a su ocurrencia en esas zonas. El análisis de susceptibilidad a PRM se puede realizar de manera efectiva a partir del análisis multicriterio, ya que permite un estudio rápido y práctico de los factores y subfactores que pueden dar lugar a un PRM.

La aplicación métodos semicuantitativos permite aprovechar las ventajas del método AHP, que cuantifica la influencia de cada factor que contribuye a la susceptibilidad a PRM, mediante el criterio de experto que permite asignar el peso y jerarquía de los factores espaciales que influyen en su ocurrencia. Este método es recomendable aplicarlo en estudios locales, como el caso de la zona de estudio, ya que en áreas grandes o el nivel regional, puede ser engorrosa la identificación y evaluación de todos los criterios relevantes. También permite la comparación de diferentes áreas o escenarios en términos de su susceptibilidad a los PRM. Esto ayuda en la identificación de las áreas de mayor riesgo y a priorizar las medidas de mitigación y prevención.

Agradecimientos

DBR y AVC agradecen al CONAHCYT las becas otorgadas para realizar estudios de doctorado en Geografía; MEM agradece al proyecto Dendrogeomorfología: desarrollo e implementación de un esquema para cartografiar y evaluar peligros geomorfológicos en zonas montañosas intertropicales de México, financiado por PAPIIT-UNAM (IN110222).

Referencias

- Ahmed, B. (2015). Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12(6), 1077–1095. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0521-x>
- Arca, D., Kutoğlu, H., & Becek, K. (2018). Landslide susceptibility mapping in an area of underground mining using the multicriteria decision analysis method. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7085-5>
- Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Jena, R., Drukpa, D., & Alamri, A. M. (2020). Temporal Probability Assessment and Its Use in Landslide Susceptibility Mapping for Eastern Bhutan. *Water*, 12(1), 267. <https://doi.org/10.3390/w12010267>
- Fratini, P., Crosta, G., & Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111(1–4), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.004>
- Fuentes, J. D. J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro.

- Instituto Nacional de Ecología, 1–47.
http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Gómez Calderón, D. A., Soria Caballero, D. C., & Corona Chávez, P. (2021). Tectónica y sismicidad en la Región Volcánica Parícutín - Tancitaro, Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita*, 82, 9–10.
<https://doi.org/10.35830/cn.vi82.556>
- González-Arqueros, M. L., Mendoza, M. E., Bocco, G., & Solís Castillo, B. (2018). Flood susceptibility in rural settlements in remote zones: The case of a mountainous basin in the Sierra-Costa region of Michoacán, Mexico. *Journal of Environmental Management*, 223(May), 685–693.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.075>
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1984). *Carta Geológica E13-3 Colima, Jalisco, Michoacán de Ocampo. Escala 1:250,000 México*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236571> (In Spanish)
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2004). *Guía para la interpretación de cartografía. Edafología*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231736/702825231736_1.pdf
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2007). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional. E13-3 Colima, Jalisco, Michoacán de Ocampo*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235147>
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E13B38-Tancitaro, E13B39-Uruapan, E13B48-Apatzingán, E13B49-Nueva Italia. Serie III. Escala 1:50,000. México*. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J., & Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 909–926. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0464-0>
- Lee, S., Ryu, J.-H., Lee, M.-J., & Won, J.-S. (2003). Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 44(7), 820–833.
<https://doi.org/10.1007/s00254-003-0825-y>
- Mind'je, R., Li, L., Nsengiyumva, J. B., Mupenzi, C., Nyesheja, E. M., Kayumba, P. M., Gasirabo, A., & Hakorimana, E. (2020). Landslide susceptibility and influencing factors analysis in Rwanda. *Environment, Development and Sustainability*, 22(8), 7985–8012. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00557-4>
- Pradhan, B., Oh, H.-J., & Buchroithner, M. (2010). Weights-of-evidence model applied to landslide susceptibility mapping in a tropical hilly area. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(3), 199–223.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2010.498151>
- Rong, G., Alu, S., Li, K., Su, Y., Zhang, J., Zhang, Y., & Li, T. (2020). Rainfall Induced Landslide Susceptibility Mapping Based on Bayesian Optimized Random Forest and Gradient Boosting Decision Tree Models—A Case Study of Shuicheng County, China. *Water*, 12(11), 3066. <https://doi.org/10.3390/w12113066>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saha, A. K., & Agrawal, S. (2020). Mapping and assessment of flood risk in Prayagraj district, India: a GIS and remote sensing study. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(2). <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00073-1>
- Schmidt, K. M., Roering, J. J., Stock, J. D., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R., & Schaub, T. (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 995–1024. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-5-995>
- Soldano, Á. (2009). Inundaciones: ¿Qué es Susceptibilidad? *Foro Virtual de La RIMD Para La Capacitación En*

Teledetección Aplicada a La Reducción Del Riesgo Por Inundaciones, 1–5.
<http://www.rimd.org/advf/documentos/4921a360071e58.79575639.pdf>

- Valdés Carrera, A. C., Mendoza, M. E., Carlón Allende, T., & Macías, J. L. (2022). Multitemporal landslide inventory analysis of an intertropical mountain in west-central Mexico — Basis for hazard management. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1650–1669. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7223-3>
- Velázquez, A., Torres, A., & Bocco, G. (2003). Las enseñanzas de San Juan. In *Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*.
- Youssef, A. M., Al-Kathery, M., & Pradhan, B. (2015). Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. *Geosciences Journal*, 19(1), 113–134. <https://doi.org/10.1007/s12303-014-0032-8>

Acerca de los autores:

MSc. Dagne Boudet Rouco: La MSc. Boudet es licenciada en Geografía y Maestra en Geografía Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial de la Facultad de Geografía de la Universidad de La Habana, y actualmente estudiante Doctorado en Geografía en el Centro de Investigaciones en Geografía ambiental de la UNAM. Su línea de investigación está relacionada con el estudio de peligros hidrometeorológicos, variabilidad y cambios climáticos. Ha publicado varios artículos en revistas indexadas en su línea de investigación. Es Miembro de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim).

<https://orcid.org/0000-0002-9132-5999>

Dr. Manuel Mendoza Cantú: El Dr. Mendoza es licenciado en Geografía (UNAM), Maestro en Ciencias (ITESM) y Doctor en Ciencias de la Tierra (UNAM). Actualmente es Investigador Titular C. Forma parte del Laboratorio Interinstitucional de Análisis de Peligros y Riesgos (UNAM), y del Centre for Natural Hazard Research (SFU), Canadá. Su investigación contribuye a resolver problemas de uso adecuado del territorio a diversas escalas. Ha publicado extensivamente artículos en revistas indizadas, así como libros y capítulos en libros. Ha desarrollado estancias de investigación en universidades de Holanda, Italia, Bolivia, EUA y Canadá. Ha dirigido 38 tesis, y dirige actualmente 14 más.

<https://orcid.org/0000-0003-1310-9702>

Dr. Alejandro Cesar Valdés Carrera

Doctor en Geografía-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM Campus Morelia, Maestro en Gestión Integrada de Cuencas-UAQ, Técnico Básico en Gestión Integral del Riesgo-CENAPRED, Diplomado en Sistemas de Información Geográfica en el Proceso de Ordenamiento Territorial y Ambiental, y Licenciado en Ciencias Ambientales-UAEMéx. Profesor de asignatura a nivel licenciatura en la ENES-Morelia-UNAM y profesor de posgrado en la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, UAQ. Miembro de la Red Mexicana de Cuencas, de la Sociedad Mexicana de Geomorfología, y de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), red temática CONAHCYT.

<https://orcid.org/0000-0002-9480-9331>