

Determinación de áreas susceptibles a procesos de remoción en masa en la región Motozintla-Huehuetenango, México-Guatemala

Víctor Bello Carranza ♦ Alexis Ordaz Hernández ♥ José Ramón Hernández Santana ▲ Luis Miguel Espinosa Rodríguez ★ 

Resumen

La región Motozintla-Huehuetenango presenta una alta susceptibilidad a la ocurrencia de Procesos de Remoción en Masa (PRM) debido a su localización geográfica en un contexto geotectónico complejo, entre las placas Norteamericana y del Caribe, donde confluyen factores litológicos, geomorfológicos y un ambiente tropical húmedo cálido. A los factores biofísicos se suman intervenciones antrópicas como la deforestación y los cambios de uso de suelo, especialmente los relacionados con la construcción de carreteras y asentamientos humanos. Este trabajo regionaliza la susceptibilidad a los procesos de ladera mediante la aplicación de la metodología propuesta por Mora y Vahrson (1994), que incorpora factores condicionantes y desencadenantes, con la inclusión del carácter morfotectónico del relieve y del uso de suelo como nuevos elementos de análisis. El resultado obtenido constituye una base sólida para las tareas de ordenación territorial y de gestión del riesgo, bajo un sustento técnico coherente con los factores antrópicos y ambientales de la región.

Palabras clave: deslizamiento de tierra, Guatemala, México, movimientos de masa, riesgos por deslizamiento, susceptibilidad.

Ideas destacadas: artículo de investigación que aborda la susceptibilidad a la ocurrencia de PRM a través de la implementación y modificación de la metodología de Mora y Vahrson (1994).



RECIBIDO: 02 DE MAYO DE 2023. | EVALUADO: 29 DE ENERO DE 2024. | ACEPTADO: 02 DE OCTUBRE DE 2024.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Bello Carranza, Víctor, Ordaz-Hernández, Alexis, Hernández Santana, José Ramon, Espinosa Rodríguez, Luis Miguel. 2025. "Determinación de áreas susceptibles a procesos de remoción en masa en la región Motozintla-Huehuetenango, México-Guatemala". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 34 (2): 473-495. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v34n2.108696>.

- ♦ Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México – México. ✉ victordinh092@comunidad.unam.mx – ORCID: 0009-0001-0513-7626.
 - ♥ Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca – México. ✉ aordazh@uaemex.mx – ORCID: 0000-0002-6788-650X.
 - ▲ Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México – México. ✉ santana@igg.unam.mx – ORCID: 0000-0002-1375-2776.
 - ★ Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca – México. ✉ lmepinosar@uaemex.mx – ORCID: 0000-0002-9545-400X.
- ✉ Correspondencia: Alexis Ordaz-Hernández, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110.

Determination of Susceptible Areas to Mass Removal Processes in the Motozintla-Huehuetenango Region, Mexico-Guatemala

Abstract

The Motozintla-Huehuetenango region presents a high susceptibility to the occurrence of Mass Removal Processes (MRP) due to its geographical location, in a geotectonic context on the limit between the North American and Caribbean plates, where lithological and geomorphological factors and the warm humid tropical environment influence. Joined to the biophysical factors, some anthropic interventions such as deforestation and land use are added, especially in the construction of roads and human settlements. In this work, the regionalization of susceptibility of the occurrence of slope processes is carried out, through the application of the methodology proposed by Mora and Vahrson (1994), which involves conditioning and triggering factors, including the morphotectonic character of the relief and the land use as new factors. The result obtained constitutes a solid base for territorial planning and risk management tasks, under a technical support consistent with the anthropic and environmental factors of the region.

Keywords: landslide, Guatemala, Mexico, mass movements, landslide hazards, susceptibility.

Highlights: research article that addresses the susceptibility to the occurrence of MRP through the implementation and modification of the Mora and Vahrson (1994) methodology.

Determinação de áreas susceptíveis a processos de remoção em massa na região de Motozintla-Huehuetenango, México-Guatemala

Resumo

A região de Motozintla-Huehuetenango apresenta alta suscetibilidade à ocorrência de Processos de Remoção de Massa (PRM) devido à sua localização geográfica, em um contexto geotectônico entre as placas norte-americana e caribenha, onde influenciam fatores litológicos, geomorfológicos e o ambiente tropical. úmido. Junto com os fatores biofísicos, somam-se as intervenções antrópicas como o desmatamento e o uso da terra, principalmente na construção de estradas e assentamentos humanos. Neste trabalho, é realizada a regionalização da suscetibilidade à ocorrência de processos de taludes, por meio da aplicação da metodologia proposta por Mora e Vahrson (1994), que envolve fatores condicionantes e desencadeantes, com a inclusão do caráter morfotectônico do relevo e do uso da terra como novos fatores. O resultado obtido constitui uma base sólida para as tarefas de planejamento territorial e gestão de riscos, sob um suporte técnico coerente com os fatores antrópicos e ambientais da região.

Palavras-chave: deslizamento de terra, Guatemala, México, movimentos de massa, riscos de deslizamento de terra, suscetibilidade.

Ideias destacadas: artigo de pesquisa que aborda da suscetibilidade à ocorrência de PRM por meio da implementação e modificação da metodologia de Mora e Vahrson (1994).

Introducción

Los procesos de remoción en masa (PRM), tanto en México como en Guatemala, constituyen una de las amenazas geológico-geomorfológicas más frecuentes, y ocasionan daños físicos, económicos e incluso psicológicos en las poblaciones afectadas (Mendoza y Domínguez 2006). Ejemplos representativos de estos procesos se han desencadenado a partir de diversos eventos hidrometeorológicos, como las tormentas tropicales “Earl” y “Javier” en 1998, el huracán “Stan” en 2006 y la tormenta “Agatha” en 2010. Dichos eventos impactaron significativamente la región de estudio, provocando al menos 300 pérdidas de vida, 500 personas desaparecidas, carreteras obstruidas y poblaciones reubicadas (Bitrán Bitrán 2001; Hernández Moreno 2011; Sánchez-Núñez et ál. 2011). La morfometría y la geología superficial del área favorecen la ocurrencia recurrente de flujos, deslizamientos y avalanchas de detritos (INSIVUMEH 1991; Sánchez-Núñez et ál. 2011; Oropeza y Figueroa 2013).

En zonas de alta energía del relieve, estos movimientos se originan por alteraciones en el equilibrio de las laderas, condicionadas por factores internos (estructura y morfología del terreno) y desencadenadas por factores externos (precipitación, sismicidad, vulcanismo, actividad humana) que superan la resistencia del material (Mendoza et ál. 2002; Popescu 2002; UNISDR 2009). Mientras los factores condicionantes actúan de forma lenta y progresiva, los desencadenantes lo hacen súbitamente, provocando el inicio del movimiento (Popescu 2002).

Alcántara (2000) define a los PRM, como el movimiento descendente de una porción de ladera bajo la influencia de la gravedad, como resultado de alteraciones en la fuerza de resistencia y el cizallamiento de la ladera a lo largo de un plano de ruptura.

La región Motozintla-Huehuetenango está especialmente expuesta a dos factores desencadenantes. Según datos del Servicio Meteorológico Nacional, en los últimos 50 años se han registrado acumulados extraordinarios de lluvias de entre 200 y 400 mm en 24 horas, y la precipitación media anual ha alcanzado los 3.000 mm; en años de ocurrencia de eventos meteorológicos extraordinarios ha llegado hasta los 5.600 mm anuales (SMN 2024). En segundo lugar, se tiene en cuenta la sismicidad, donde destacan dos sismos fuertes de magnitud 8,2 Mw con epicentros en las proximidades del área de estudio, ocurridos los días 24 de mayo de 1947 y 7 de septiembre de 2017; el catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) indica la amplia ocurrencia

de sismos de baja y moderada magnitud con promedio de 4.0 Mw (SSN 2024).

Además, la vulnerabilidad ha aumentado por actividades antrópicas como la deforestación, la agricultura y los asentamientos irregulares (Caballero et ál. 2006). Esta última idea ratifica la importancia de realizar contribuciones al análisis del riesgo de desastre por PRM, tanto para prevenir eventos que pueden resultar catastróficos para la sociedad como para la planificar y ordenar ecológica y socioeconómicamente el territorio, lo que permite aprovechar los recursos naturales de forma racional, responsable y sostenible (Rivera, Casado y Sánchez 2014). Así pues, el objetivo de este trabajo es determinar la susceptibilidad a la ocurrencia de PRM, como aporte a la futura gestión del territorio.

La metodología de Mora y Vahrson (1994) se desarrolló para clasificar la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos en zonas tropicales sísmicamente activas, condiciones similares a las de la región Motozintla-Huehuetenango. Se tiene en cuenta tres factores intrínsecos o pasivos (relieve, litología y humedad del suelo) y dos factores extrínsecos o activos del terreno (sismicidad y precipitación).

La utilidad y eficacia de esta metodología se ha comprobado en diversos trabajos a nivel mundial. Segura, Badilla y Obando (2011) realizaron la regionalización de susceptibilidad a PRM, mediante el uso de la metodología Mora-Vahrson, sustituyendo el factor de “relieve relativo” por un mapa de pendientes e incorporando un inventario de deslizamientos. Barrantes, Barrantes y Núñez (2011) identificaron zonas de susceptibilidad y su coincidencia con los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, el 8 de enero de 2008. Rodríguez et ál. (2013) establecieron zonas de susceptibilidad a PRM en Pamplona (Colombia), obteniendo buenos resultados; sin embargo, se encontraron regiones que no coincidían con la aplicación de la metodología. Quesada y Feoli (2018) contrastaron la metodología Mora y Vahrson con la morfométrica y obtuvieron resultados similares, por lo que los autores recomendaron su uso para establecer una línea base de investigación. Ávila Velásquez (2019) identificó zonas de susceptibilidad alta y media a PRM y verificó la confiabilidad del método en campo. Finalmente, López et ál. (2020) zonificaron la susceptibilidad a PRM en el municipio de Manaure (Colombia), obteniendo una predominancia de valores bajos y medios, lo cual concuerda con sus registros históricos.

Recientemente, investigaciones de Valdez et ál. (2022) con esta metodología en el municipio de Malinalco, Estado

de México, señalan que otro de los factores que estimulan estos procesos son las modificaciones geométricas de los taludes para la construcción de carreteras, fundamentalmente en las áreas con media y alta susceptibilidad. Muchas veces, las empresas de ingeniería civil no tienen en cuenta los detalles del diseño de los taludes en las carreteras para anular la potencialidad de los PRM, por problemas de costos u otros motivos, acaban recurriendo a medidas de mitigación que, con frecuencia, no son tan efectivas y también son costosas. Por este motivo, es necesario complementar los proyectos de ingeniería con los resultados de las investigaciones geocientíficas, contando con el reconocimiento y aprobación de las autoridades gubernamentales.

Atendiendo a la problemática descrita y a la necesidad de generar un insumo cartográfico que identifique las zonas más inestables, el objetivo de esta investigación es determinar la susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el área fronteriza

Motozintla-Huehuetenango, tomando como base metodológica la propuesta de Mora y Vahrson (1994), a la que se le realizarán algunas modificaciones en función de las características físicas particulares de la zona de estudio.

Área de estudio

La región denominada Motozintla-Huehuetenango se ubica entre las coordenadas 15°09' y 15°37', de latitud norte, y 91°40' y 92°30' de longitud oeste, en la zona fronteriza entre México y Guatemala, y comprende total o parcialmente los municipios: Motozintla, Siltepec, Bella Vista, Amatenango de la Frontera, Bejucal de Ocampo, La Grandeza, El Porvenir, Tapachula, Tuzantán, Frontera Comalapa, Huixtla, Escuintla, Mazapa de Madero y Tapachula, en México; y San Marcos y Huehuetenango, en Guatemala. Tiene una extensión de aproximadamente 1.400 km² y cuenta con altitudes de hasta 3.650 m.s.n.m. (INAFED 2018) (Figura 1).

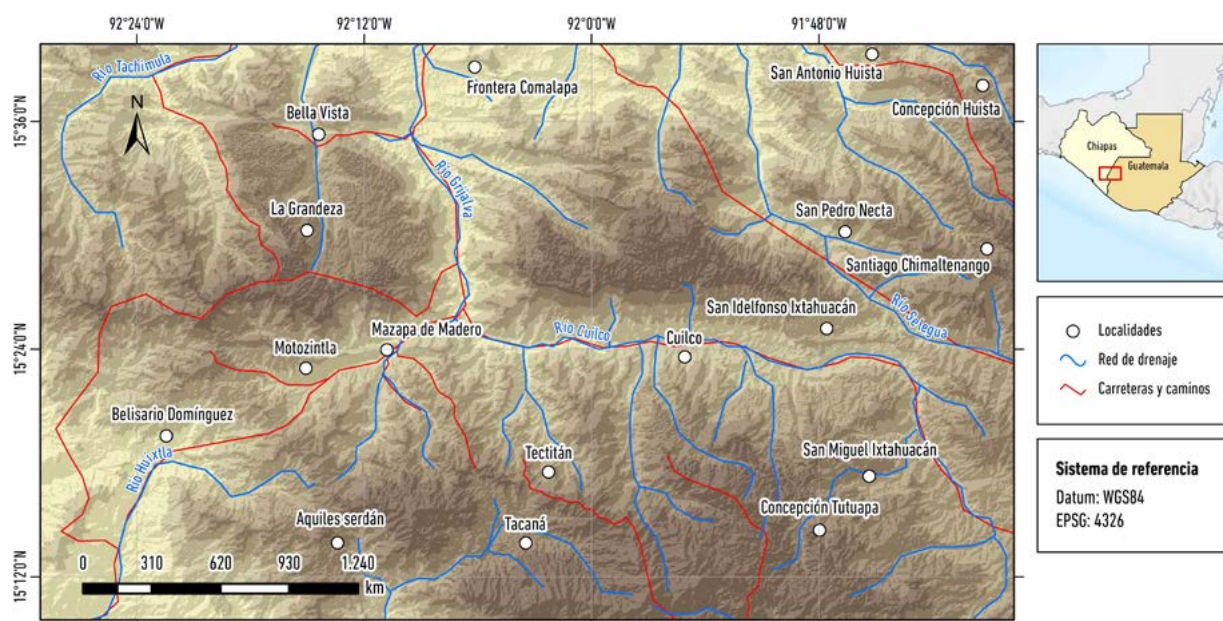


Figura 1. Localización de la región Motozintla-Huehuetenango.
Datos: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2022) y CONABIO (2024).

El área de estudio se encuentra ubicada en una zona tectónica activa, en donde interactúan las placas tectónicas Norteamericana (NA), Cocos (CO) y Caribe (CA), lo que genera la subducción entre las placas de Cocos y la Norteamericana, y de transformación entre la Norteamericana y la del Caribe. Desde una perspectiva regional, Burkart et ál. (1987) informan de un movimiento

lateral izquierdo de entre 20 y 65 km de las cuñas tectónicas al norte del sistema Polochic-Motagua, que acompañó al movimiento neógeno documentado de 130 km, registrado en el desplazamiento de la estructura y estratigrafía del cinturón plegado y corrido del Cenozoico (Burkart 1978). Según Guzmán-Speziale y Molina (2022), las principales fallas sísmicamente activas están relacionadas con la

zona transformante lateral izquierda Motagua, Polochic e Ixcán, y otras de menor extensión como Seleguá, Nentón y Las Conchas.

El régimen tectónico de la región ha provocado una zona de fallas de tipo inversas denominadas “Anticlinorio de Chiapas”, una región de fallas laterales denominadas “Fallas Laterales del Sur de México” y una zona de plegamientos al noroeste del sistema Polochic-Motagua. Estos sistemas conforman un marco tectónico complejo que propicia la ocurrencia de eventos sísmicos y, por ende, la activación de los PRM.

Este patrón transformante de alta movilidad tectónica ha generado terremotos a lo largo de la falla de Polochic, como el del 22 de julio de 1816 (magnitud 7,6), y en la falla de Motagua, como el del 4 de febrero de 1976 (magnitud 7,5) (Plafker 1976; Lodolo et ál. 2009; Guzmán-Speziale y Molina 2022). En este último evento, Kanamori y Stewart (1978) informaron de la existencia de rupturas superficiales de más de un metro. Otros autores, como White (1984, 1985) y White y Harlow (1993), muestran catálogos de la sismicidad histórica de estas estructuras transformantes, donde se refleja la existencia de decenas de sismos durante siglos pasados.

Al suroeste se extiende la frontera subductiva entre las placas Norteamericana y Cocos, que es sismogeneradora

y tiene un gran significado para esta región, con magnitudes superiores a 7,0 grados Richter. En interacción con la zona transformante, determina el criterio de junta triple Caribe-América del Norte-Cocos (Authemayou et ál. 2011).

La geología regional está constituida por rocas ígneas intrusivas graníticas y gabroides, ígneas volcánicas continentales, ígneas volcano-sedimentarias marinas, metamórficas regionales, sedimentarias continentales y sedimentarias marinas, pertenecientes a las eras, cenozoica (Cuaternario-Terciario), mesozoica (Cretácico-Triásico) y paleozoica (Pérmico-Cámbrico). De la misma forma, la zona de estudio se encuentra entre una serie de regiones ciclogénicas, por lo que es escenario de eventos hidrometeorológicos provenientes del océano Pacífico y del mar Caribe, lo que la somete a desastres por inundación y provoca procesos gravitacionales de manera indirecta. Ejemplos de esta situación son la tormenta tropical “Earl”, en 1998, y el huracán “Stan”, en 2005.

Esta amenaza se agrava debido al alto el grado de deforestación de las selvas en México, sobre todo en el estado de Chiapas (Figura 2). La región Motozintla-Huehuetenango presenta un alto deterioro de la cobertura vegetal, con más del 90 % deforestado (Sánchez-Núñez et ál. 2011), lo que prepara el escenario para una intensa erosión, sobre todo durante eventos hidrometeorológicos extremos.



Figura 2. Ejemplos de condiciones de deforestación e implementación de prácticas agrícolas inadecuadas en la región Motozintla, Chiapas. Fotografía de Bello Carranza, julio de 2022.

En las regiones montañosas, el carácter intensivo y extensivo de los procesos erosivos pueden provocar la ocurrencia de los PRM. El inventario de estos procesos realizado por Sánchez-Núñez (2012) en Motozintla registra diecisiete deslizamientos, 61 caídas de rocas, ocho

flujos, dos zonas de avalancha y uno de tipo complejo. Otra característica de esta cuenca es el volumen sedimentario acarreado por los ríos tributarios de montaña Xelajú Grande, Allende y Mina, al río Motozintla o Mazapa, que en ocasiones han dividido a la ciudad en

dos sectores, tanto por las avenidas como por la carga de sedimentos aluviales.

Condiciones similares se localizan en el sector de Huehuetenango (Guatemala), dada su similitud geológica y geográfica con Motozintla, ubicadas ambas en uno de los ejes tectónicos transformantes más importantes de Américas.

Metodología

El método Mora y Vahrson (1994), se diseñó para determinar la susceptibilidad o predisposición de las laderas a sufrir deslizamientos. Su primera aplicación se materializó en el caso de estudio de la localidad de Tapantí (Costa Rica). Desde entonces, se ha aplicado en múltiples trabajos (Segura, Badilla y Obando 2011; Barrantes, Barrantes y Núñez 2011; Rodríguez et ál. 2013; Quesada y Feoli 2018; López et ál. 2020), especialmente en Costa Rica, Honduras, Colombia y, más recientemente en México, con los trabajos del CENAPRED (2019), Valdez et ál. (2022) y León et ál. (2024).

Atendiendo a la flexibilidad del método y a la viabilidad de acceso a la información que lo sustenta, se ha dedicado aplicarlo en la región Motozintla-Huehuetenango, considerada una zona sísmicamente activa y en un clima tropical. Sin embargo, es importante señalar que a la propuesta de Mora y Vahrson (1994) se le realizarán algunas modificaciones que se explicarán en este apartado. Las adecuaciones tienen como propósito alcanzar la coherencia entre las variables utilizadas, su ponderación y la realidad física del territorio objeto de estudio.

En su propuesta inicial (aplicada a la localidad de Tapantí), se tuvieron en cuenta los siguientes factores: pendiente, humedad del suelo, litología, sismicidad e intensidad de lluvia. El nivel de susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos se obtiene mediante la ecuación 1:

$$H = (Sr * Sl * Sh) * (Ts + Tp) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

Pendiente (sr): inclinación de las laderas en grados (factor condicionante).

Litología (sl): tipo de materiales (factor condicionante).

Humedad del suelo (sh): humedad acumulada durante todo el año (factor condicionante).

Intensidad sísmica (Ts): intensidad Mercalli Modificada para un periodo de retorno de 100 años (factor desencadenante).

Intensidad de lluvias (Tp): precipitaciones máximas diarias (precipitación máxima en 24 horas, para un periodo de retorno de 100 años) (factor desencadenante).

En las conclusiones de la propia publicación, Mora y Vahrson sugieren considerar la influencia del uso del suelo en futuros trabajos, por lo que, atendiendo a esta última recomendación, se incluye el uso del suelo (Tu) como factor condicionante para el caso de estudio Motozintla-Huehuetenango. La incorporación del uso del suelo en este caso se justifica por el uso inapropiado del territorio, con actividades como deforestación, agricultura, pastoreo, construcción desmedida de carreteras y asentamientos, entre otros. Estos últimos elementos acentúan las condiciones de susceptibilidad a la ocurrencia de PRM, con la consiguiente denudación y alteración de las laderas.

Una segunda modificación del método consistió en reforzar el factor condicionante "Litología" con la incorporación de los rasgos estructurales (fallas y morfolineamientos). En coherencia con la propuesta, en lo sucesivo, el factor condicionante litología (sl) se nombrará factor condicionante geológico-estructural (SGE) (Ecuación 2).

$$H = (Sr * SGE * Sh * Tu) * (Ts + Tp) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Pendiente (Sr): inclinación de las laderas en grados (factor condicionante).

Geológico-estructural (SGE): tipo de materiales geológicos y rasgos estructurales (factor condicionante).

Humedad del suelo (sh): humedad acumulada durante todo el año (factor condicionante).

Uso del suelo y vegetación (Tu): ocupación del terreno (factor condicionante).

Intensidad sísmica (Ts): intensidad Mercalli Modificada para un periodo de retorno de 100 años (factor desencadenante).

Intensidad de lluvias (Tp): precipitaciones máximas diarias (precipitación máxima en 24 horas, para un periodo de retorno de 100 años) (factor desencadenante).

Aplicación del método: ventajas y desventajas

El método Mora-Vahrson ha demostrado su efectividad en el análisis de PRM a nivel regional, como se desprende de la revisión de algunos trabajos (Segura, Badilla y Obando 2011; Barrantes, Barrantes y Núñez 2011; Rodríguez et ál. 2013; Quesada y Feoli 2018; López et ál. 2020). Sin embargo, el método presenta limitaciones, ya que no tiene en cuenta el uso del suelo ni factores estructurales como fallas y fracturas. Las variables humedad

(factor condicionante) e intensidad de las lluvias (factor desencadenante) tienen unas ponderaciones diseñadas para clima tropical húmedo, por lo que constituyen una limitación para otras regiones climáticas.

En el caso particular del sur de México y el norte de Guatemala, donde se enclava la región de estudio, prevalece el clima tropical húmedo, lo que sugiere la viabilidad de la aplicación del método de Mora-Vahrson. No obstante, para este caso de estudio y otros futuros en la región, es importante justificar detalladamente cada variable.

Inventario de PRM

Este trabajo considera los PRM ocurridos en el pasado a través de un inventario (Figura 3), que se contruyó a partir de información recopilada de cuatro fuentes principales: la primera, el trabajo de campo realizado por los autores de esta investigación en junio de 2022; la segunda, el inventario de PRM de Sánchez-Núñez et

ál. (2011); la tercera, el “atlas de factores de riesgo de la cuenca de Motozintla” (Oropeza y Figueroa 2013); y la cuarta, el inventario de deslizamientos del Ministerio de Comunicaciones de Guatemala (INSIVUMEH 1991).

La información procedente de los inventarios citados permitió la ubicación espacial de los eventos, aunque no favoreció la clasificación de cada uno. Por este motivo, en lo sucesivo se identificarán de forma genérica como procesos de remoción en masa (PRM). En total se representaron 92 PRM, la mayoría en la región de la cabecera municipal de Motozintla, que ha tenido mayor número de reportes debido a su importancia socioeconómica.

La relación espacial de los PRM contenidos en la Figura 3 y las condiciones físicas del territorio se tendrán en cuenta en lo sucesivo para las ponderaciones de las variables que intervienen en el método, especialmente de los condicionantes.

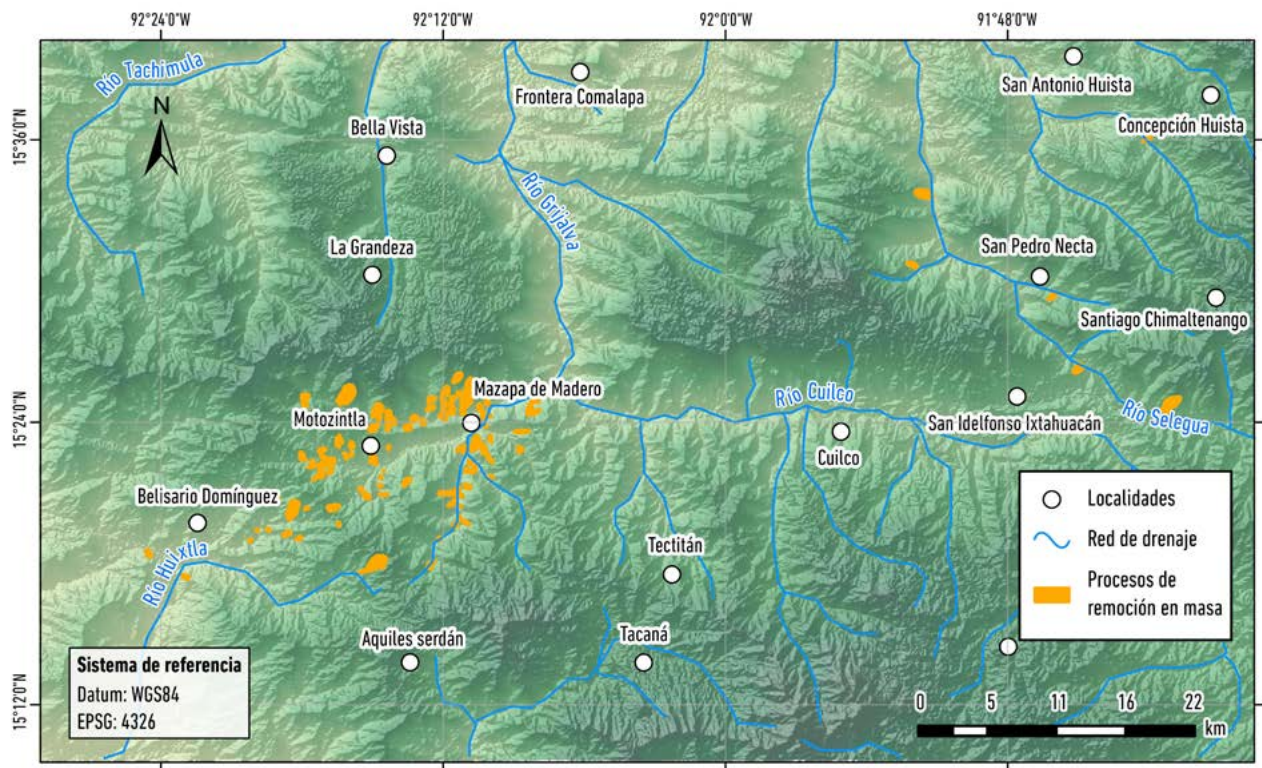


Figura 3. Inventario de deslizamientos de la región Motozintla-Huehuetenango.

Datos: elaboración propia a partir de Sánchez-Núñez et ál. (2011); Oropeza y Figueroa (2013); INSIVUMEH (1991).

Factor condicionante pendiente (sr)

Mora y Vahrson (1994) utilizan la variable “relieve relativo”, pero Salazar (2007) modificó el método e

implementó la variable “pendiente”, ya que es más práctico obtenerla de manera automatizada mediante el uso de los sistemas de información geográfica. En este trabajo,

se obtiene el factor pendiente (Sr), introduciendo un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución de 15 metros, descargado desde el continuo de elevaciones mexicano del INEGI (2024). Se utilizó la herramienta

“slope” del ArcTool Box de ArcGIS, donde se establecieron rangos (en grados) para realizar la interpolación de la información, mismos que se sustentaron con la frecuencia de los PRM, como muestra la Figura 4.

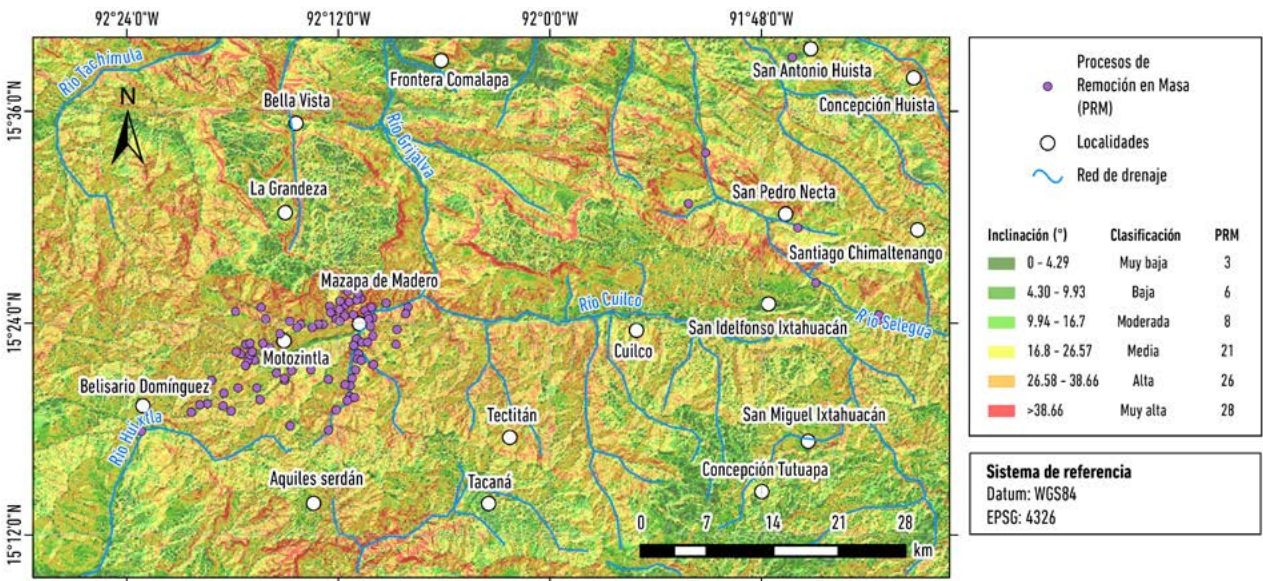


Figura 4. Pendientes de la región Motozintla-Huehuetenango. Datos: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2022) y CONABIO (2024).

La morfometría de las pendientes muestra con colores cálidos las zonas con pendientes más abruptas y con colores fríos las zonas con pendientes de menor inclinación (véase figura 4). Se aprecia una predominancia de valores de pendientes media (34,3 %) y alta (21,3 %). Las mayores pendientes coinciden con las zonas de fallas y de fracturación de las rocas metamórficas, calcáreas y terrígenas, que se presentan sobre todo en los contactos entre los principales bloques morfotectónicos y estructuras geomorfológicas.

Factor condicionante geólogo-estructural (SGE)

El factor condicionante geológico-estructural representa el nivel de influencia de los tipos de materiales en la activación de los PRM. También intenta representar espacialmente las zonas de influencia (*buffers*) de los rasgos estructurales. La representación de la litología, las fallas y las estructuras, se realizó a partir de la información del mapa geológico de México (Ferrari-Pedraglio, Morán-Zenteno y González 2007; SGM 2019). Los patrones de bloques morfotectónicos se obtuvieron mediante un proceso de discriminación de fallas basado en datos geológicos, ya fueran expresados o no en el relieve, y mediante

el análisis del espectro de sus superficies cumbrales, lo que indica una estrecha correlación con los aspectos morfométricos del relieve (Hernández-Santana et ál. 1995).

La agrupación y ponderación de los suelos y rocas (Figura 5) se realizó en función de la predisposición a sufrir PRM litologías similares (Caballero et ál. 2006; Paz et ál. 2011; SEDESOL 2011 y Sánchez-Núñez 2012) y a sus propiedades geotécnicas (Tabla 1). En este caso, se consideraron cuatro propiedades geotécnicas: (i) resistencia a la compresión, (ii) peso volumétrico, (iii) cohesión y (iv) ángulo de fricción interna, que permitieron asignar pesos al factor litológico (SGE) reflejados en la columna de la derecha de la Tabla 1. Es importante destacar que los valores fueron tomados de diferentes fuentes bibliográficas (González de Vallejo et ál. 2002; Ramírez y Alejano 2004; Duncan, Wright y Brandon 2014; CENAPRED 2019). No obstante, para fases de investigación posteriores se recomienda acceder a muestras del sitio y su procesamiento en laboratorio. Teniendo en cuenta que el área de estudio es relativamente amplia (1.400 km²), se sugiere priorizar para el muestreo geotécnico aquellos sitios que en este trabajo se identifiquen con los niveles más altos de susceptibilidad a los PRM.

Tabla 1. Clasificación de susceptibilidad en función de la litología

Litología	Resistencia a la compresión (MPa)	Peso volumétrico kN/m³	Cohesión (kN/m²)	Ángulo de fricción interna (°)	Clasificación de susceptibilidad	Factor (SGE)
Aluvión	<1	24	35	30	Muy alta	5
Tobas	5-25	27	70	40	Alta	4
Esquistos	25-50	25	29	31	Media	3
Areniscas	10-120	24	35	30	Media	3
Calizas	50-200	24	50	25	Baja	2
Mármol	50-100	27	70	40	Muy baja	1
Gneis	80-100	25	29	31	Muy baja	1
Gabro	150-250	26	80	40	Muy baja	1
Granito	120-290	26	80	40	Muy baja	1

Datos: elaborado a partir de González de Vallejo et ál. (2002); Ramírez y Alejano (2004); Duncan, Wright y Brandon (2014) y CENAPRED (2019).

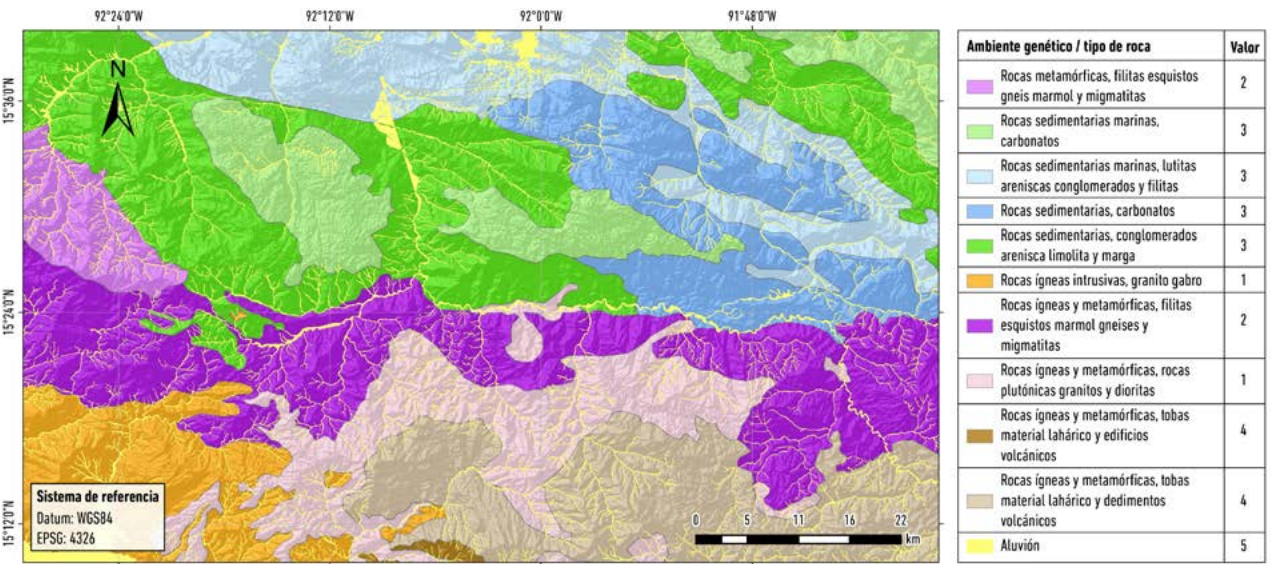


Figura 5. Litología de la región Motozintla-Huehuetenango.

Datos: elaboración propia a partir de las propuestas cartográficas de Ortega-Gutiérrez et ál. (1992); Ferrari, Morán y González (2007) y SGM (2019).

De acuerdo con Cueto, Estévez y Ordaz (2019), un alto grado de deformación y fracturación del macizo rocoso, expresado en grietas, estructuras de foliación y fallas, debilitaría considerablemente la resistencia, y facilitaría la ocurrencia de deslizamientos. En este sentido, se realizó la clasificación de susceptibilidad en niveles de influencia según la cercanía a las diferentes estructuras de dislocación tectónica, y se identificaron cinco áreas de influencia, como muestra la Figura 7.

En la revisión bibliográfica realizada, se consultaron trabajos que proponen una zona de influencia de 3.000 metros (Rodríguez, Tapia y Albornoz 2014); mientras que

otras investigaciones restringen la influencia a 500 m (Viltres-Milán, Guardado-Lacaba y Alfonso-Olivera 2019), en ambos casos dividiéndolos en cinco rangos equitativos. Es evidente que, en las zonas cercanas a las fallas, los procesos de fracturación se intensifican (meteorización física), lo que amplía la superficie de contacto, especialmente con el agua, y favorece los procesos de meteorización química, lo que tiene impacto negativo sobre las propiedades geotécnicas (véase tabla 1). Sin embargo, la intensidad de estos procesos depende del régimen tectónico particular y de las características ambientales de cada región.

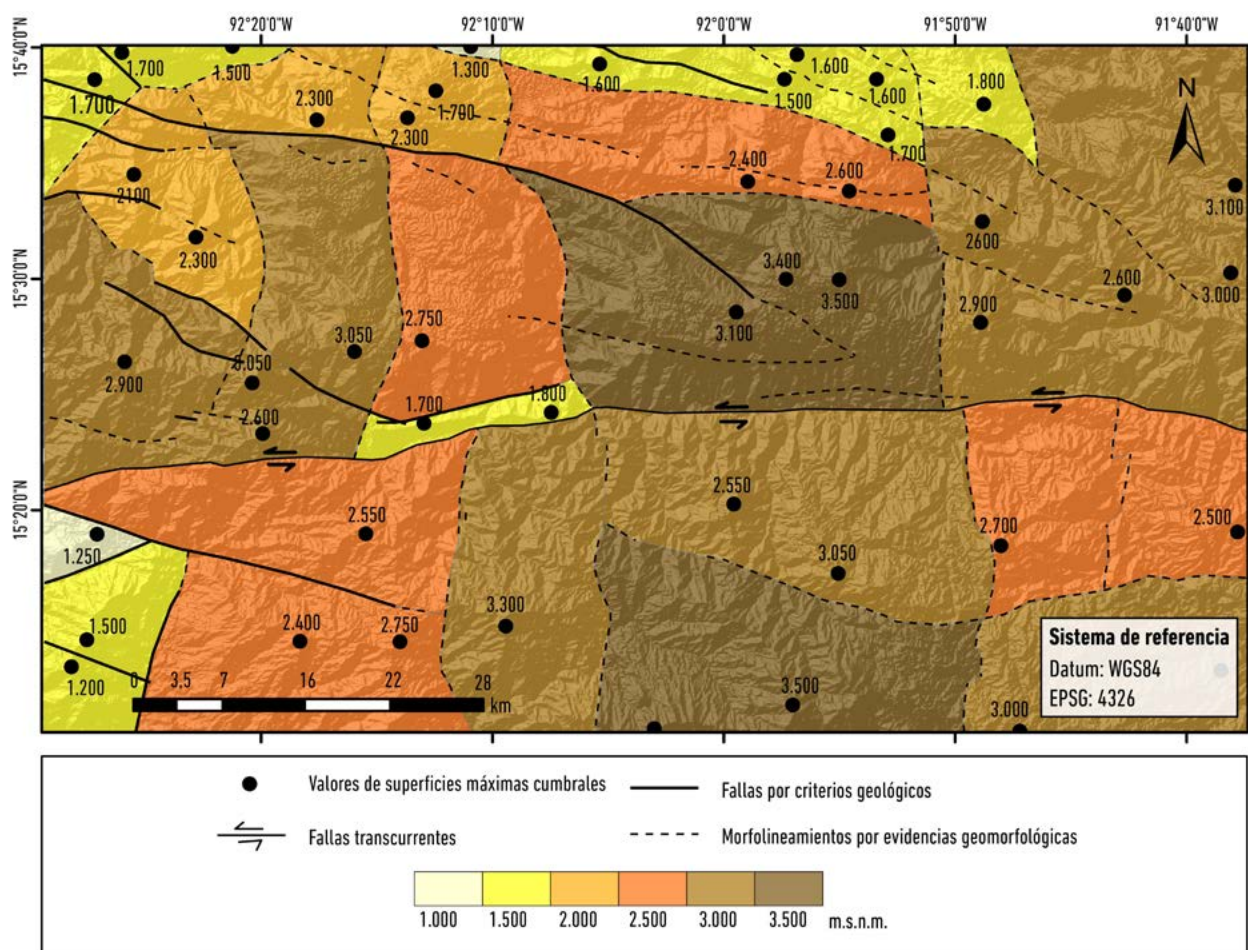


Figura 6. Unidades morfotectónicas de la región Motozintla-Huehuetenango, mostrando estructuras geológicas, morfolineamientos y restos de superficies cumbreles máximas del relieve.

Datos: elaboración propia con datos de INEGI (2022).

Lo anterior justifica plenamente la propuesta de un proyecto futuro en la región Motozintla-Huehuetenango, en el que se tome como base la cartografía de unidades morfotectónicas de la Figura 6. De forma orientativa, la Secretaría del Desarrollo Social en México (SEDESOL 2011)

sugiere enmarcar una zona de influencia de 500 m, dividida en cinco intervalos de 100 m cada uno (aplicado en esta investigación, Figura 7), similar al criterio que posteriormente aplicaron Viltres-Milán, Guardado-Lacaba y Alfonso-Olivera (2019).

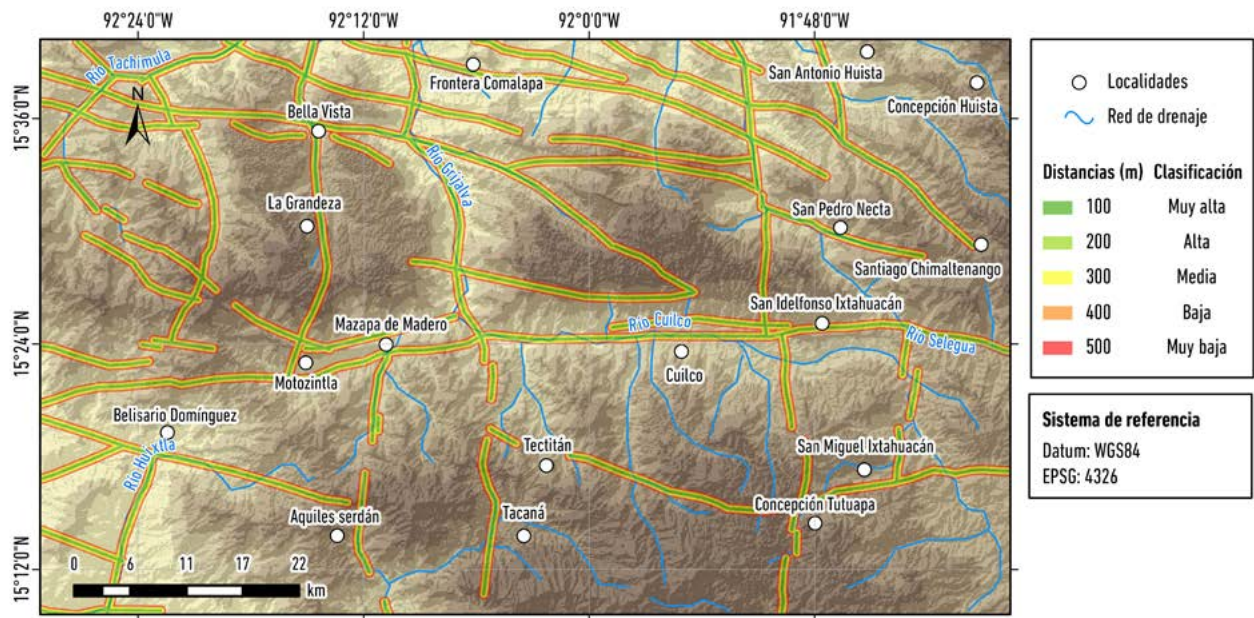


Figura 7. Zona de influencia de morfolineamientos y su clasificación de susceptibilidad a PRM. Datos: elaboración propia con datos de INEGI (2022).

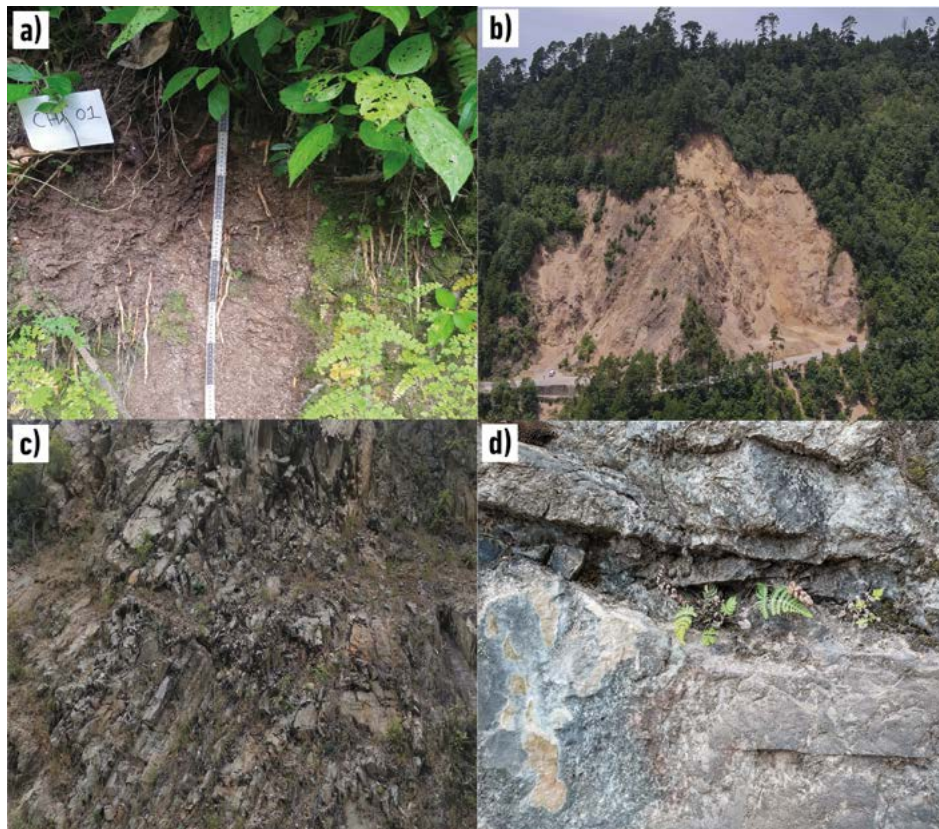


Figura 8. Ejemplos de afloramientos de diferentes tipos litológicos, donde (a) sedimentos fluviales, (b) afloramiento de esquistos, (c) deslizamiento sobre areniscas y (d) afloramiento de rocas intrusivas. Fotografías de Bello Carranza, julio de 2022.

Los materiales menos estables que se han verificado en campo son los sedimentos fluviales, que presentan baja cohesión y están constituidos por materiales altamente intemperizados o muy frágiles debido a la dinámica fluvial. La Figura 8a muestra un corte realizado en las cercanías del río Huixtla, en el suroeste, donde se puede observar esta condición.

La región está cubierta en aproximadamente un 30 % por materiales con susceptibilidad media pertenecientes a rocas sedimentarias como lutitas y areniscas. Según los datos recopilados (González de Vallejo et ál. 2002), estos materiales tendrían valores de cohesión de entre 30 y 350 kp/cm³ y ángulos de fricción interna de entre 30° y 60°. En la Figura 8c se muestra un deslizamiento de grandes dimensiones ocurrido sobre este tipo de material.

Otro tipo de material con susceptibilidad media son los metamorizados representados en este caso representados por esquistos, que se distribuyen en la porción central del área y cuyos valores de cohesión oscilan entre los 250 kp/cm³, con ángulos de fricción interna de hasta 30°. En la Figura 8b se muestra un afloramiento de esquistos cuyo buzamiento coimcide con la dirección de la pendiente, cortado por un talud y en cuya base se observan fragmentos de rocas desprendidos.

En la región, los materiales litológicos de más baja susceptibilidad son las rocas intrusivas (Figura 8d), como los gabros, los granitos y las dioritas. Estos materiales pueden alcanzar valores de cohesión cercanos a los 500 kp/cm³, con ángulos de fricción interna de hasta 58°, y se observa que, a pesar de ser materiales resistentes, presentan fracturas y/o fisuras que debilitan su estructura.

Factor condicionante humedad del suelo (sh)

El incremento de la humedad en el suelo sugiere un aumento de la masa del material potencialmente deslizable. Para climas que clasifican como tropical húmedo, similares al del sur de México y los países centroamericanos según las condiciones de evapotranspiración, se estima que, a partir de 40 mm de lluvia acumulados en diez días (aproximadamente 125 mm al mes), se podría considerar una infiltración significativa (Quesada y Feoli 2018). Con base en la información descrita, se estimará la influencia de la humedad (Factor sh) siguiendo el procedimiento descrito en Mora y Vahrson (1994). Cabe señalar que los intervalos de valores de precipitación media mensual propuestos por Mora y Vahrson (Tabla 2) y su influencia sobre los deslizamientos (Tabla 3) se contrastaron con casos de deslizamientos investigados ocurridos, especialmente, en Chiapas (Hinojosa-Corona

et ál. 2011; Mora-Ortiz y Rojas-González 2012; CENAPRED 2021).

El valor de la humedad del suelo (Sh) se cuantifican los valores promedio de precipitación mensual. Para ello, se consideraron los registros de siete estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2024), distribuidas en el área de estudio (Figura 9). De las estaciones meteorológicas consideradas, la que menos intervalo de tiempo consideró fue la Estación Belisario Domínguez con 27 años (1962-1989), y la que más años abarca fue la Estación Huixtla, con 64 años (1954-2018).

Se reclasificaron los datos de “precipitación media mensual” asignándoles un valor según la Tabla 2. Posteriormente, se sumaron los valores de los doce meses del año y se catalogaron según la Tabla 3, obteniendo el factor sh. Posteriormente, se realizó la interpolación de la información en ArcGIS (Figura 9) mediante la herramienta “Interpolation” del Arctoolbox, con el método de distancia inversa ponderada (IDW), que estima los datos de la celda calculando el promedio de los valores “muestra” en la vecindad de cada celda del procedimiento. Es decir que, la cercanía al punto del centro de la celda calculada determina la influencia en el cálculo del promedio (ESRI 2024).

Tabla 2. Clasificación de valores de precipitación media mensual

Precipitación promedio (mm/mes)	Valor
<125	0
125-250	1
>250	2

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

Tabla 3. Factor de humedad resultante de la clasificación de valores acumulados de los índices promedio de precipitación mensual

Valor acumulado de los índices de precipitación	Calificación	Factor (sh)
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

La Tabla 4 muestra un ejemplo de clasificación del factor sh para la estación meteorológica “El porvenir”. Como primer paso, se asignan valores del 0 al 2 para cada mes, según la precipitación media mensual en mm, de acuerdo

con la Tabla 2. Posteriormente, se suman los valores obtenidos, que en el caso del ejemplo da como resultado un total de 4. Este último valor se clasifica según la Tabla 3, que asigna a este valor un factor $Sh=1$, correspondiéndole la clasificación “muy baja”. Este procedimiento se replicó para las seis estaciones meteorológicas restantes.

Tabla 4. Ejemplo de clasificación del factor sh para la estación meteorológica “El Porvenir” de un total de siete estaciones

1961-2018			
Mes	Precipitación media mensual (mm)	Valor	Factor sh
Enero	6,86	0	
Febrero	2,34	0	
Marzo	4,94	0	
Abril	15,94	0	
Mayo	76,80	0	
Junio	170,89	1	
Julio	130,23	1	
Agosto	137,29	1	
Septiembre	159,29	1	
Octubre	96,45	0	
Noviembre	16,37	0	
Diciembre	6,19	0	
Total	823,59	4	$sh=1$

Datos: elaboración propia con datos de SMN (2024).

Se puede observar que el factor humedad, que depende de las precipitaciones mensuales, fluctúa entre valores medios y bajos, de forma concéntrica: valores

medios en la parte externa del mapa y valores muy bajos en la parte central, precisamente en el valle tectónico de Huehuetenango (eje estructural de la región).

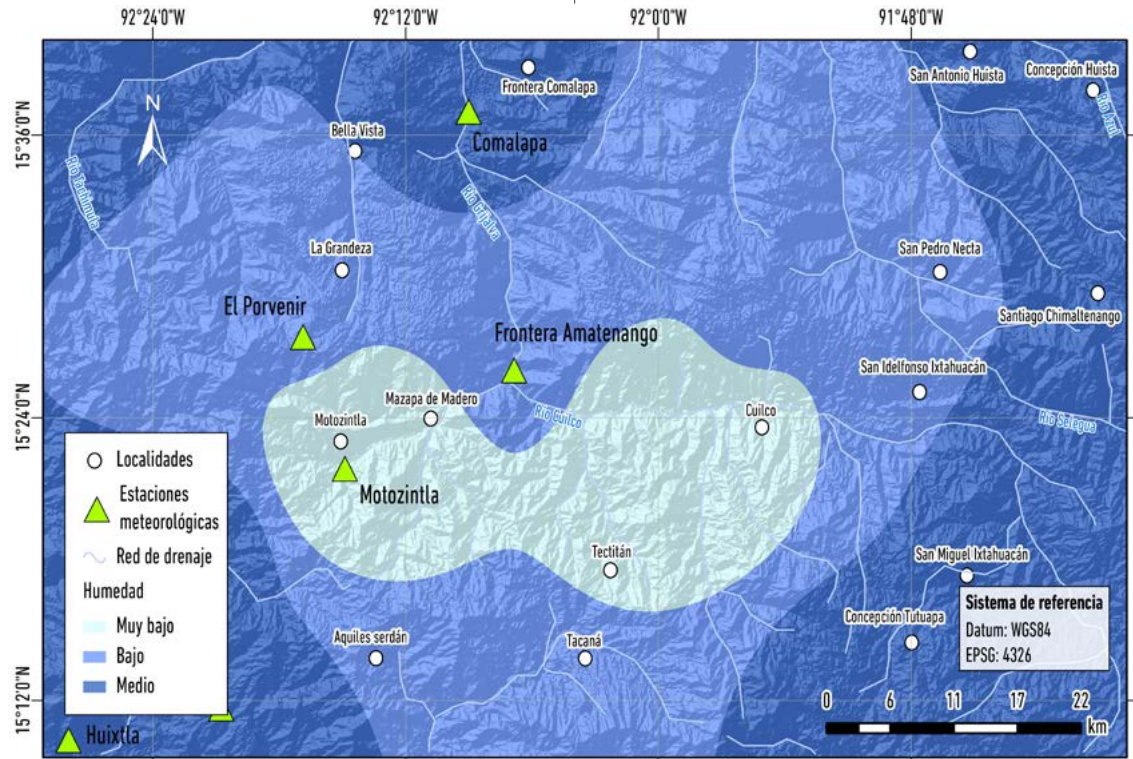


Figura 9. Humedad del suelo de la región Motozintla-Huehuetenango.
Datos: elaboración propia con datos de SMN (2024).

Factor condicionante uso de suelo (tu)

La información relacionada con el uso del suelo, caminos y carreteras se descargó en formato SHP del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO 2024). Atendiendo a las modificaciones geométricas de los taludes de carreteras y caminos, a estos, se les aplicó un buffer de influencia de 100 m.

En general, se obtuvieron cinco tipos principales de uso, y se clasificaron como se muestra en la Figura 10. La influencia antrópica en la ocurrencia de PRM es evidente, ya que modifican y/o alteran la geometría de las laderas, lo que provoca una sobrecarga o un debilitamiento de su estructura y, por tanto, se desencadenan deslizamientos.

La cobertura vegetal, en general, actúa como un estabilizador del terreno, ya que ayuda a mitigar la infiltración y saturación del agua, aunque también puede llegar a favorecer la actividad gravitacional. El análisis realizado revela que aproximadamente 1.100 km² se ven afectados por la actividad forestal y agrícola.

La cobertura vegetal de la región ocupa aproximadamente 2.213 km² y está compuesta por bosques, entre los cuales destacan los siguientes:

1. Bosque de coníferas: es un tipo de vegetación con una amplia variedad florística y ecológica que se encuentra en regiones templadas y semifrías, siendo el bosque de pino el más relevante.
2. Bosque de encinos: este tipo de vegetación se caracteriza por tener árboles muy altos (entre 8 y 30 metros). Se distribuye ampliamente en regiones cálidas, templadas húmedas y secas.
3. Bosque mesófilo de montaña: se desarrolla en regiones con climas templados y húmedos. Son ecosistemas delicados y se componen de especies como el Quercus, Tilia, Podocarpus reichei y Nephelea mexicana.

Adicionalmente, existe una amplia red vial de aproximadamente 84,57 km e infraestructura urbana que ocupa 320 km² aproximadamente. La influencia del uso del suelo y la vegetación sobre los PRM se discute ampliamente en los trabajos de Cuanalo, Oliva y Gallardo (2011), Suárez (2012), y otros más recientes, como Valdez et ál. (2022) y León et ál. (2024), que sirvieron como sustento para adjudicar los pesos al factor uso del suelo (Tu) (Figura 10).

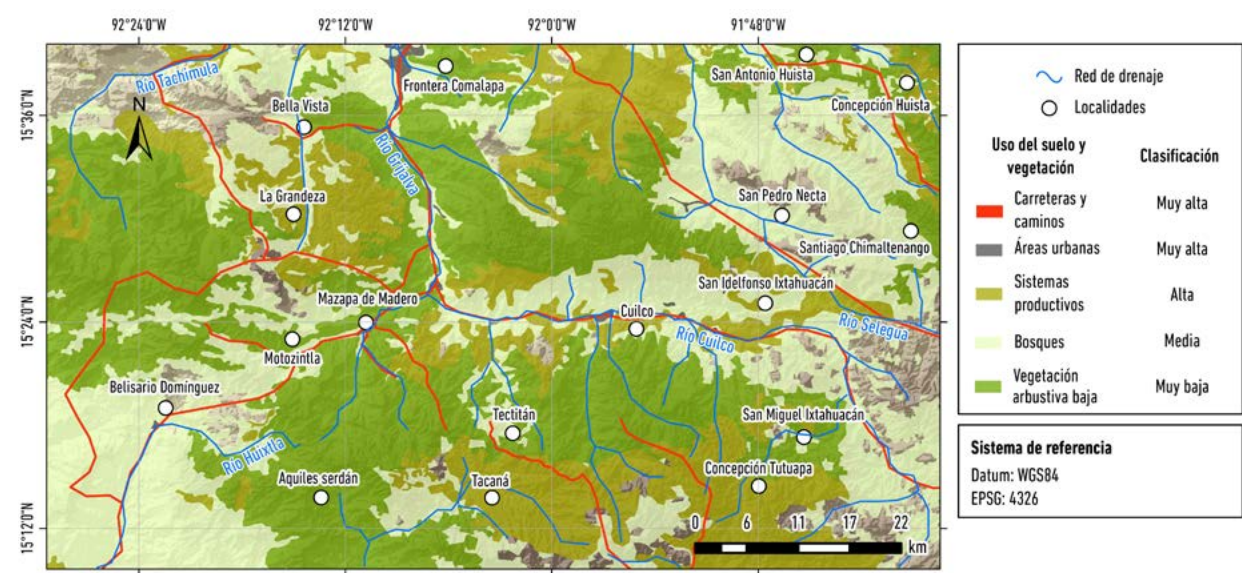


Figura 10. Clasificación de susceptibilidad a PRM de los usos del suelo y vegetación de la región Motozintla-Huehuetenango. Datos: elaboración propia a partir de CONABIO (2023).

Factor desencadenante intensidad Sísmica (ts)

Los terremotos de mayor magnitud registrados en los últimos 150 años en la región corresponden a los sismos del 24 de mayo de 1947 y del 7 de septiembre de 2017, ambos al suroeste de Pijijiapan, con una magnitud de 8,2 grados. El primero tuvo una profundidad de 45,9 km y el segundo, de 58,0 km (SMN 2024). De acuerdo

con el SSN (2024), la intensidad sísmica del evento ocurrido el 7 de septiembre de 2017, se clasifica como fuerte (Figura 11), con aceleraciones máximas del suelo entre los 90,0 y 150,0 cm/s²). Según las correlaciones (PGA vs intensidad) de Trifunac y Brady (1975), esta intensidad se ubicaría en el grado VII grados de la escala de Mercalli modificada. Este estimado se corrobora con un trabajo

previo realizado por Jaimes, Niño y Reinoso (2013), en el que se utilizó el programa CRISIS 2007 desarrollado por Ordaz, Aguilar y Arboleda (2007), que calcula la aceleración máxima del suelo para el sitio de estudio, cercana al 40 % de g (gravedad), y la ubica en una intensidad de VII grados (Tabla 5). De igual forma, se valida con los valores plasmados en el Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED 2022); donde la capa de información Geológicos/Indicadores/Global de Intensidades ubica la región con intensidades históricas entre VII y VIII.

Es importante señalar que, con el propósito de asignar pesos al factor desencadenante por sismicidad (factor Ts), atendiendo al inventario de deslizamientos elaborado para este caso de estudio, estadísticamente no es posible establecer la relación entre las aceleraciones del terreno y los deslizamientos tabulados. Ante esta carencia, el Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED 2019) emplea la propuesta de Mora et ál (1994), que adjudica pesos entre 0 y 10. Dicha propuesta se simplificó a cinco clases con el propósito de homogeneizar todas las variables entre el valor 0 y 5 (Tabla 5).

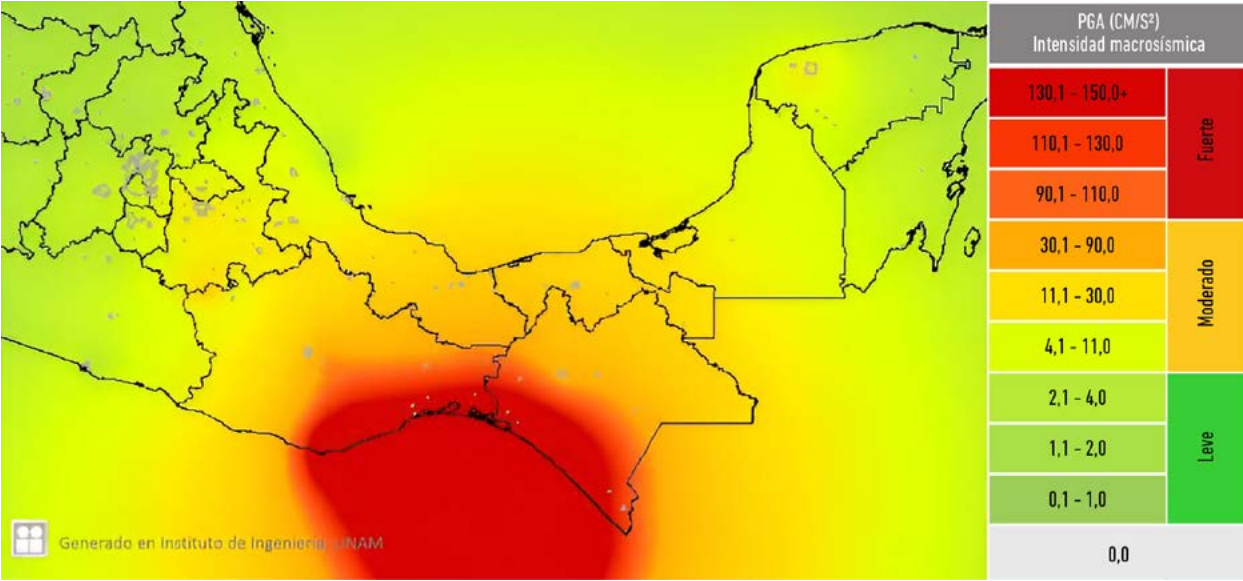


Figura 11. Esquema de intensidades macrosísmicas del sismo del 7 de septiembre de 2017 al suroeste de Pijijiapan. Fuente: SSN (2024).

Tabla 5. Clasificación de valores de intensidad sísmica. Los valores aplicados a la región Motozintla-Huehuetenango (México-Guatemala) están subrayados

Intensidad (MM)	Aceleración PGA %g	Clasificación	Factor TS
III a IV	1-20	Muy bajo	1
V a VI	21-37	Bajo	2
VII a VIII	38-55	Medio	3
IX a X	56-73	Alto	4
XI a XII	>74	Muy alto	5

Fuente: modificado a partir de la propuesta de Mora et ál (1994) y CENAPRED (2019).

Factor desencadenante intensidad de lluvias (tp)

La “intensidad de lluvias” se calculó considerando eventos extraordinarios de precipitaciones. Se tomaron en cuenta los datos de precipitación máxima en 24 horas, para un periodo de retorno de 100 años, y se clasificaron con la Tabla 6.

Para esta investigación, se tomó información de siete estaciones meteorológicas, teniendo en cuenta los años: 1987-2015 para la estación de “Finca Germania”; 1954-2018 para la estación de “Huixtla”; 1962-1989 para la estación de “Belisario Domínguez”; 1980-2014 para

la estación “El Porvenir”; 1961-2018 para la estación “Motozintla”; 1967-2003 para la estación “Comalapa”; y 1961-2017 para la estación “Frontera Amatenango”, que se encuentran en la región Motozintla-Huehuetenango (Figura 9). No obstante, para las estaciones meteorológicas citadas no se dispone de información para 100 años, por lo que se realizó el análisis de distribución de probabilidad de Gumbel. En todos los casos, se obtuvieron valores superiores a 400 mm, por lo que se clasificó el factor de lluvias con un valor “muy alto” (Tp=5) como muestra la Tabla 7.

Tabla 6. Clasificación del factor de intensidad de la precipitación

Lluvias máximas en 24 horas T=100 años (mm)	Clasificación	Valor (Tp)
<100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
201-300	Medio	3
301-400	Alto	4
>400	Muy alto	5

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

Tabla 7. Clasificación de intensidad de lluvias para la región Motozintla-Huehuetenango

Estación meteorológica	Lluvias máximas en 24 horas T=100 años (mm)	Valor (Tp)	Clasificación
Motozintla	435,56	5	Muy alto
Frontera Amatenango	615,95	5	Muy alto
Comalapa	846,94	5	Muy alto
El Porvenir	708,45	5	Muy alto
Belisario Domínguez	755,39	5	Muy alto
Finca Germania	1.637,18	5	Muy alto
Huixtla	976,85	5	Muy alto

Datos: elaboración propia con datos de SMN (2024).

Análisis y discusión de resultados

Susceptibilidad a PRM

Para el cálculo y la representación cartográfica, se realizó la combinación de factores empleando la ecuación 2, mediante la herramienta raster calculator del Arctool Box de ArcGIS, y se generó el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Figura 12). Esta figura representa en colores fríos la susceptibilidad muy baja y

baja, que representan el 41,6 % y el 30,3 % del área de estudio, respectivamente. En color amarillo se indica la susceptibilidad media (17,8 % del área total) y, con colores cálidos, las zonas con valores de susceptibilidad alta (8 %) y muy alta (2 %).

La región muestra una predominancia de áreas con baja susceptibilidad a la ocurrencia de PRM, en relación con la superficie del terreno ocupada por cada clasificación (Figura 13). Dicho nivel de susceptibilidad se debe principalmente a las morfologías subhorizontales,

como valles, altiplanos y superficies cumbrales areales del relieve, que debido a su poca inclinación son poco susceptibles a procesos de ladera. De la misma forma, existen sectores al sur de la región que, debido al tipo de material con altas resistencias, como el granito y el gabro, resultan poco proclives a los procesos de erosión y meteorización.

Los sitios clasificados con niveles de susceptibilidad “media” se presentan como áreas de transición entre las regiones de susceptibilidad “alta” y “baja”, distribuidas especialmente en zonas de pie de monte a lo largo de toda el área de estudio. Estas áreas también se caracterizan por estar localizadas entre las regiones

de dinámica estructural, debido a morfolineamientos y cortes de carretera.

Las zonas con alta susceptibilidad se encuentran principalmente en áreas con materiales sedimentarios en el noroeste y noreste, donde afloran rocas terrígenas y calcáreo-carbonatadas, y en el sureste, con materiales laháricos y volcánicos. También se encuentran en las escarpas tectónicas, entre las principales estructuras geológicas.

Estas áreas corresponden a bloques morfotectónicos con pendientes de entre 26° y 38° , y reciben acumulados mensuales de lluvia superiores a los 125 mm/mes (véase figura 6).

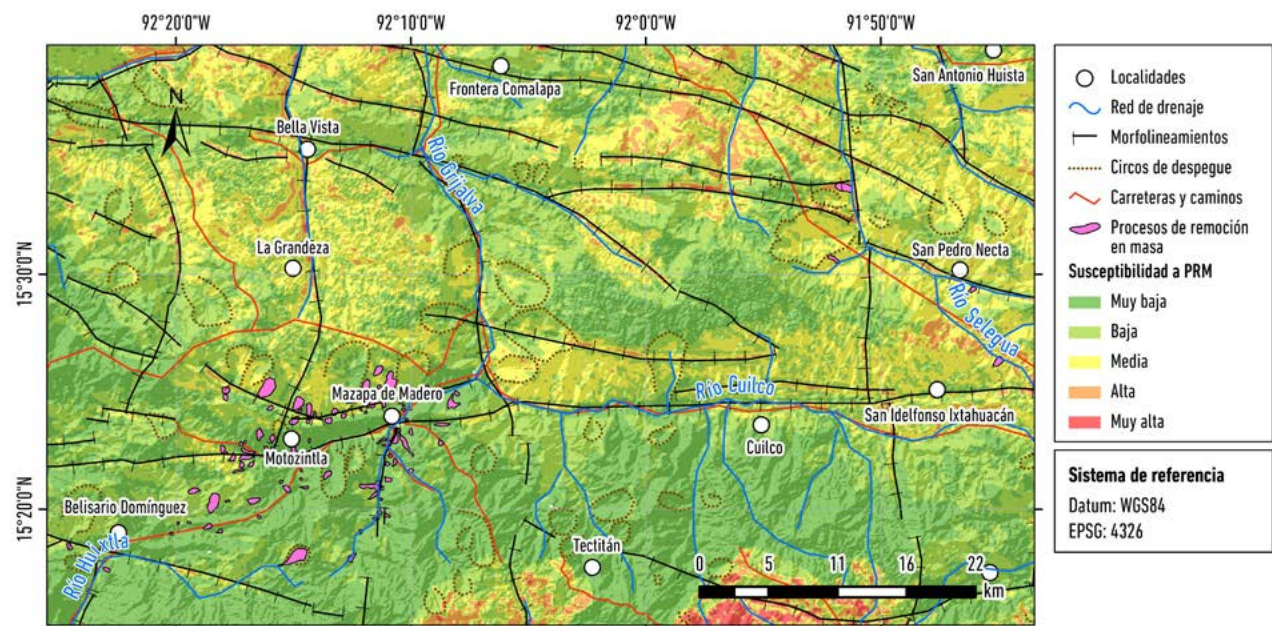


Figura 12. Susceptibilidad a PRM de la región Motozintla-Huehuetenango.

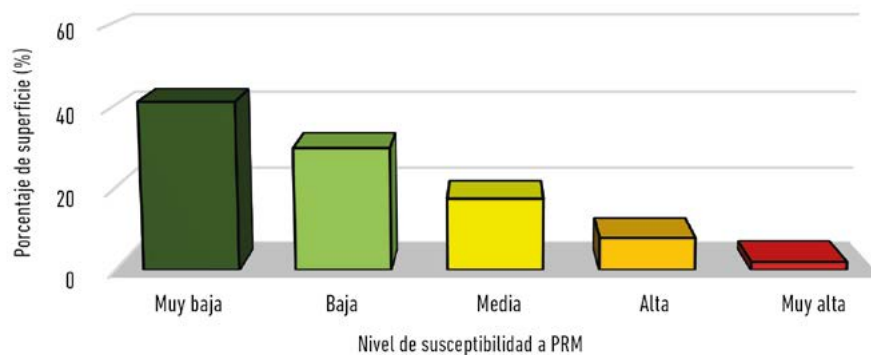


Figura 13. Porcentaje de superficie ocupada por cada nivel de susceptibilidad a los PRM.

De la misma forma, mediante la fotointerpretación se revelaron circos erosivos de despegue que denotan posibles paleodeslizamientos (Figura 12), Estos dejan cicatrices en el terreno con formas semicirculares, con laderas cóncavas y escarpadas (Lugo-Hubp 2011), que pudieron estar inducidos por eventos sísmicos. Espacialmente, los circos se ubican sobre materiales sedimentarios, como conglomerados, arenisca, marga y limolita, ubicados en la parte septentrional de la falla transcurrente que divide la región, sobre todo en los márgenes de los altiplanos regionales de calizas. La distribución de estas paleoformas del relieve gravitacional indica que estos procesos han continuado a lo largo del tiempo geológico más moderno, fundamentalmente durante el Cuaternario.

En la Figura 14 se observa de cerca la región de Motozintla, donde se comprueba visualmente la coincidencia espacial de PRM ocurridos en el pasado con los

niveles medios y altos de susceptibilidad. De la misma forma, se aprecia la correspondencia con las carreteras y los morfolineamientos representados en la Figura 6, lo que denota una influencia significativa de estos factores en el desencadenamiento de los procesos gravitacionales.

La mayor parte de las carreteras de la región se encuentran sobre áreas con baja susceptibilidad a la ocurrencia de PRM (Tabla 8). Sin embargo, aproximadamente 32 km de carreteras se emplazan sobre niveles de susceptibilidad media, alta y muy alta. Esta información es relevante, ya que al menos 50 PRM ocurridos en el pasado en la región se vinculan a carreteras, y señala lugares prioritarios para adoptar medidas de estabilidad de taludes y realizar un seguimiento. Esta información es una advertencia a la comunidad ingenieril para perfeccionar los taludes y los diseños planimétricos de las vías de comunicación.

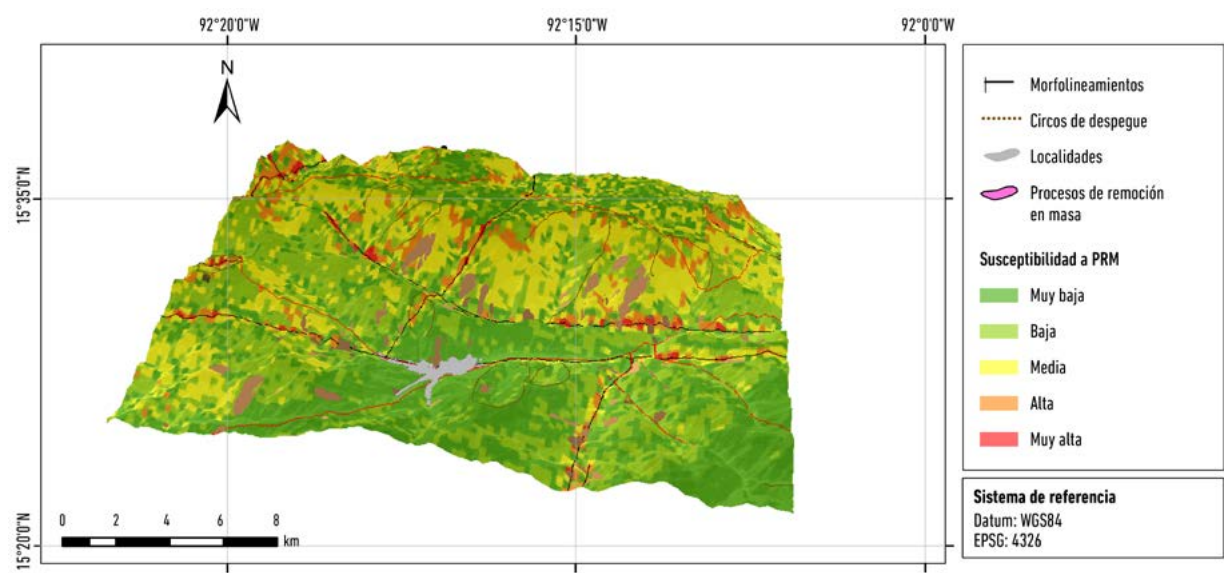


Figura 14. Validación visual: acercamiento del mapa de susceptibilidad a PRM con la superposición de movimientos de laderas ocurridos en el pasado.
Datos: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2022) y CONABIO (2024).

Tabla 8. Kilómetros de carretera por nivel de susceptibilidad a PRM en la región Motozintla-Huehuetenango

Kilómetros de carretera por nivel de susceptibilidad				
Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
28,70	23,34	19,39	10,02	3,12

Finalmente, como método de validación estadístico del modelo de esta investigación, se realizó la correlación entre los procesos de remoción en masa ocurridos en el pasado y el mapa de susceptibilidad (Figuras 12 y 15). De los 92 procesos identificados en el inventario de deslizamientos, 57 coinciden en zonas de susceptibilidad muy baja, veinticuatro en zonas de susceptibilidad baja, siete en susceptibilidad media, tres en zonas de susceptibilidad alta y una en zonas de susceptibilidad muy alta.

Los 92 PRM inventariados ocupan un área total de 21 km², de los cuales el 45,5 % corresponden a áreas de susceptibilidad muy baja, el 31,6 % a áreas con susceptibilidad baja, el 16 % a áreas de susceptibilidad media, el 6 % a áreas de susceptibilidad alta y el 0,5 % a áreas de susceptibilidad muy alta. Estos datos, junto con las correlaciones espaciales entre el mapa de susceptibilidad y el inventario de PRM, demuestran la predominancia del efecto del uso del suelo, es decir, de zonas con intervenciones antrópicas intensivas (carreteras, crecimientos urbanos y deforestación).

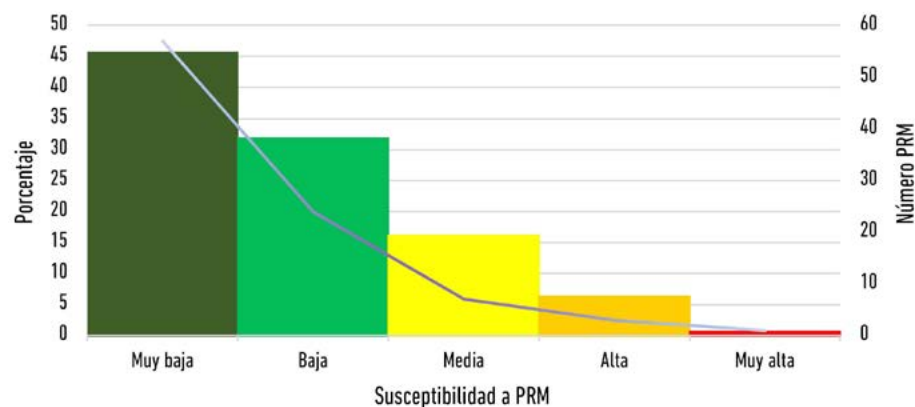


Figura 15. Relación entre el número de procesos de remoción en masa inventariados y el porcentaje del área ocupada por cada nivel de susceptibilidad.

Conclusiones

La región sismotectónica de Motozintla-Huehuetenango presenta un grado significativo de susceptibilidad a los PRM, debido a que cerca del 30 % del territorio presenta susceptibilidades medias y altas a los PRM, mientras que el 70 % se encuentra localizado sobre áreas con valores bajos, fundamentalmente en los morfoelementos menos energéticos del relieve de los valles tectónicos y en las superficies de planación cumbres de tipo areal en las montañas.

La validación estadística del modelo indica que las áreas con valores medios, altos y muy altos de susceptibilidad coinciden aproximadamente un 22 % con los PRM ocurridos en el pasado. Se revela que el 37 % de los deslizamientos inventariados se asocian espacialmente a intervenciones antrópicas, especialmente a carreteras.

El método Mora y Vahrson es una herramienta sencilla y de viable para el análisis de los PRM; sin embargo, en esta investigación se demuestra que puede mejorarse

incorporando otros factores (principalmente desencadenantes), teniendo en cuenta las particularidades geotectónicas y geográficas de cada región. Por ejemplo, en este caso de estudio, se han incluido aspectos morfoestructurales y de uso del suelo que no se habían contemplado con anterioridad. Esta adición enriquece el nivel de análisis de carácter multivariado y holístico durante el proceso analítico de la investigación.

El análisis integrado litoestratigráfico, morfotectónico y morfoestructural revela las zonas más débiles e inestables del relieve, tanto ante intensos periodos pluviales, como ante fuertes estremecimientos durante eventos sísmicos, lo que, unido a los efectos de las modificaciones antropogénicas inadecuadas, incrementa la probabilidad de desencadenamiento de los procesos gravitacionales.

La cuantificación de la susceptibilidad a los PRM y su representación cartográfica, basada en las regularidades regionales de los factores condicionantes y desencadenantes en Motozintla-Huehuetenango, aporta una

contribución científica de incalculable valor práctico y social a las autoridades, académicos, a la sociedad civil y otros actores territoriales, ya que permite reducir y gestionar los riesgos de este tipo de amenazas gravitacionales, así como optimizar los modelos de ocupación sectorial del territorio.

Referencias

- Alcántara Ayala, Irasema. 2000. "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología". *Investigaciones Geográficas* 1 (41): 7-25. <https://doi.org/10.14350/rig.59101>
- Authemayou, Christine, Gilles Brocard, Christian Teyssier, T. Simon-Labric, Axel Gutiérrez-Orrego, Noé Cacao Chiquín y Sergio Morán-Ical. 2011. "The Caribbean-North America-Cocos Triple Junction and the Dynamics of the Polochic-Motagua Fault Systems: Pull-Up and Zipper Models". *Tectonics* 30 (3). <https://doi.org/10.1029/2010tc002814>
- Ávila Velásquez, Dariana Isamel. 2019. "Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la región sur este de la Reserva Biológica Montecillos a través del método Mora-Vahrson". Tesis de grado en Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas.
- Barrantes Castillo, Gustavo, Omar Barrantes Sotela y Oscar Núñez Roman. 2011. "Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica". *Revista Geográfica de América Central* 2 (47): 141-162.
- Bitrán Bitrán, Daniel. 2001. *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99*, vol. 1 de la serie *Impacto socioeconómico de los desastres en México*. México D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).
- Burkart Burke, B. C. Deaton 1978. "Offset Across the Polochic Fault of Guatemala and Chiapas, Mexico". *Geology* 6 (6): 328-332. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1978\)6%3C328:OATPFO%3E2.o.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1978)6%3C328:OATPFO%3E2.o.CO;2)
- Burkart Burke, B. C. Deaton, Carlos Dengo y Guillermo Moreno. 1987. "Tectonic Wedges and Offset Laramide Structures along the Polochic Fault of Guatemala and Chiapas, Mexico: Reaffirmation of Large Neogene Displacement". *Tectonics* 6 (4): 411-422. <https://doi.org/10.1029/tcoo6ioo4p00411>
- Caballero L., J. L. Macías, A. García-Palomo, G. R. Saucedo, L. Borselli, D. Sarocchi y J. M. Sánchez. 2006. "The September-8-9, 1998 Rain-Triggered Flood Events at Motozintla, Chiapas, México". *Natural Hazards* 39: 103-126. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-4987-7>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2019. *Análisis de deslizamiento de laderas por sismo*. Ciudad de México: Subdirección de Riesgos Sísmicos, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Consultado el 09 de marzo de 2024. https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2020/1er_Trimestre/FRACCION_XLI/RS/DeslizamientoSismo_CENAPRED_Final_Formato-Nuevo.pdf
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2020. "A 3 años del sismo de mayor magnitud en casi cien años". Gobierno de México. 7 de septiembre, 2020. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/a-3-anos-del-sismo-de-mayor-magnitud-en-casi-cien-anos>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2021. *Análisis de umbrales de lluvia en municipios de alta marginación, expuestos a inestabilidad de laderas. Casos de Chiapas y Oaxaca*. Ciudad de México: Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Consultado el 10 de marzo de 2024. https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2022/XLI/DS/2021_Analisis_umbrales_lluvia_municipios_alta_marginacion.pdf
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2022. "Atlas Nacional de Riesgos". Ciudad de México: Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Consultado el 10 de marzo de 2024. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2024. "Portal de Geoinformación". Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Consultado el 10 de marzo de 2024. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cuanalo Campos, Oscar Andrés, Aldo Onel Oliva González y Romel Gallardo Amaya. 2011. "Inestabilidad de laderas. Influencia de la actividad humana". *Elementos* 84: 39-46.
- Cueto Gil, Carlos Javier, Elmidio Estévez Cruz y Alexis Ordaz Hernández. 2019. "Zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la cordillera de Guanaguanico, Cuba. Un aporte al ordenamiento del territorio". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 39 (1): 11-38. <https://doi.org/10.5209/aguc.64675>
- Duncan, J. Michael, Stephen G. Wright y Thomas L. Brandon. 2014. *Soil Strength and Slope Stability*. Hoboken: Wiley.

- ESRI. 2024. Caja de herramientas de Spatial Analyst. Consultado el 10 de marzo de 2024. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm>
- Ferrari-Pedraglio Luca, Dante Morán-Zenteno y Enrique Alejandro González-Torres. 2007. *Actualización y adaptación de la Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2.000.000*. Instituto de Geología de la UNAM, Consejo de Recursos Minerales. <https://www.geologia.unam.mx/igl/pubs/cgm/actualizacion2007.pdf>
- González de Vallejo, Luis I., Mercedes Ferrer, Luis Ortuño y Carlos Oteo. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Guzmán-Speziale, Marco y Enrique Molina. 2022. "Seismicity and Seismically Active Faulting of Guatemala: A Review". *Journal of South American Earth Sciences* 115: 103740. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103740>
- Hernández Moreno, María Guadalupe. 2011. "Procesos de remoción en masa en Motozintla de Mendoza, Chiapas". Tesis de licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Hernández Santana, José Ramón, Mario Arturo Ortiz Pérez y José J. Zamorano Orozco. 1995. "Clasificación morfoestructural (tipológica) y morfotectónica (regional) del relieve oriental cubano: modelo insular de transición interplacas". *Investigaciones Geográficas* 1 (31): 13-35. <https://doi.org/10.14350/rig.59036>
- Hinojosa-Corona, Alejandro, Víctor Manuel Rodríguez-Moreno, Luis Munguía-Orozco y Octavio Meillón-Menchaca. 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. <https://doi.org/10.18268/bsgm2011v63n1a2>
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). 2018. "Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México". Consultado 14 de abril de 2024. <https://www.derechomunicipal.org.mx/single-post/2018/07/24/enciclopedia-de-los-municipios-y-delegaciones-de-m%C3%A9xico>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2022. "División política municipal, 1:250.000". Catálogo de metadatos geográficos. Consultado el 2 de mayo de 2023. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/dipol/mupal/mun22gw
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2024. "Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación". Consultado el 2 de mayo de 2023. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala). 1991. *Inventario de los principales deslizamientos ocurridos en la República de Guatemala*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de comunicaciones, transporte, y obras públicas.
- Jaimes Téllez, Miguel A., Mauro Niño Lázaro y Eduardo Reinoso Angulo. 2013. "Una aproximación para la obtención de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos". *Revista Ingeniería Sísmica*, no. 89, 1-24. <https://doi.org/10.18867/ris.89.162>
- Kanamori, Hiroo y Gordon S. Stewart. "Seismological Aspects of the Guatemala Earthquake of February 4, 1976". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 83 (B7): 3427-3434. <https://doi.org/10.1029/jbo83ibo7p03427>
- León González, Brian, Alexis Ordaz Hernández, José Emilio Baró Suárez y Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo. 2024. "Análisis de los movimientos de laderas en el municipio de Ecatepec de Morelos". *Acta Universitaria* 34: 1-18. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3997>
- Lodolo, Emanuele, Marco Menichetti, M. Guzmán-Speziale, G. Giunta y C. Zanolli. 2009. "Deep Structural Setting of the North American-Caribbean Plate Boundary in Eastern Guatemala". *Geofísica Internacional* 48 (3): 263-277. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2009.48.3.25>
- López, Ruth E., Amat D. Zuluaga, Felipe Gómez y Luis Tapia. 2020. "Aplicación del método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manauare, Cesar, Colombia". *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER* 4 (2): 57-70. <https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.50>
- Lugo Hubp, José. 2011. *Diccionario geomorfológico*. Ciudad de México: Instituto de Geografía UNAM.
- Mendoza López, Manuel J., Leobardo Domínguez Morales, Ignacio Noriega Rioja, Enrique Guevara. 2002. *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. México D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Gobernación.
- Mendoza, Manuel J. y Leobardo Domínguez Morales. 2006. "Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas". En *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos Geológicos*, 135-178. México D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Sistema Nacional de Protección Civil, Secretaría de Gobernación.
- Mora Chinchilla, Rolando, Sergio Mora Castro, Wilhelm Günther Vahrson y Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales de América Central. 1994. *Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. San José: Centro de coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central (CEPRENAC).

- Mora, Sergio y Wilhelm-Günther Vahrson. 1994. "Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination". *Bulleting of the Association of Engineering and Geologist* 31 (1): 49-58. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxxi.1.49>
- Mora-Ortiz, René Sebastián y Eduardo Rojas-González. 2012. "Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas". *Ingeniería, investigación y tecnología* 13 (1): 55-68. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n1.006>
- Ordaz, M., A. Aguilar y J. Arboleda. 2007. "CRISIS 2007: Program for Computing Seismic Hazard". Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Consultado el 10 de marzo de 2024. <https://ecapra.org/es/topics/crisis-2007#:~:text=CRISIS%202007%20es%20el%20m%C3%B3dulo,para%20la%20evaluaci%C3%B3n%20del%20riesgo>
- Oropeza, O. y Figueroa, J. M. 2013. *Atlas de factores de riesgos de la cuenca de Motozintla, Chiapas*. Coordinador General del Proyecto D. A. Novelo. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Paz Tenorio, Jorge Antonio, Raúl González Herrera, Francisco Félix Domínguez Salazar y Mario Gómez Ramírez. 2011. "Los procesos de remoción en masa en Chiapas: Una revisión de los últimos cinco años 2006-2011". *LACANDONIA* 5 (1): 113-122.
- Plafker, George. 1976. "Tectonic Aspects of the Guatemala Earthquake of 4 February 1976". *Science* 193 (4259): 1201-1208. <https://doi.org/10.1126/science.193.4259.1201>
- Popescu, Mihail E. 2002. "Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options". Presentado en *3rd International Conference on Landslides. Slope Stability and Safety of infrastructures*. Singapur. Del 11 al 12 de julio de 2002.
- Quesada Román, Adolfo y Sergio Feoli-Boraschi. 2018. "A Comparison of the Mora-Vahrson Methodology and the Morphometric Method to Determine Areas Susceptible to Landslides in the Macho River Microbasin, Costa Rica". *Revista Geográfica de América Central* 2 (61): 17-45. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Ramírez Oyanguren, Pedro y Leandro R. Alejano Monge. 2004. *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid: Universidad Politécnica.
- Rodríguez Solano, Juan Gabriel, César David Quintana Cabeza, Héctor Uriel Rivera Alarcón y Jemay Mosquera Tellez. 2013. "Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: estudio de caso". *Revista ambiental agua, aire y suelo* 4 (1): 13-22. <https://doi.org/10.24054/aaas.v4i1.2013>
- Rodríguez Valdivia, Alan, Alejandro Tapia Tosetti y Cristián Albornoz Espinoza. 2014. "Susceptibilidad de movimientos en masa en el valle de Socoroma, precordillera andina de Arica y Parinacota". *Diálogo andino*, no. 44, 25-39. <https://doi.org/10.4067/s0719-26812014000200004>
- Ruiz Rivera, Naxhelli, José María Casado Izquierdo y María Teresa Sánchez Salazar. 2014. "Los atlas de riesgo municipales en México como instrumentos de ordenamiento territorial". *Investigaciones Geográficas*, no. 88, 146-162. <https://doi.org/10.14350/rig.46476>
- Salazar, Luis Guillermo. 2007. "Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico ILWIS utilizando el método Mora & Vahrson, 1991". San José Costa Rica. https://www.researchgate.net/publication/242369529_MODELAJE_DE_LA_AMENAZA_POR_DESLIZAMIENTO_MEDIANTE_EL_PROGRAMA_ILWIS_Y_LA_IMPLEMENTACION_DE_UN_SISTEMA_DE
- Sánchez-Núñez, Juan Manuel. 2012. "Procesos de remoción en masa en la cuenca de Motozintla, Chiapas: inventario y recurrencia". Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México.
- Sánchez-Núñez, Juan Manuel, María Elena Serrano Flores, Dora Ma. Sangermán Jarquín, Agustín Navarro Bravo, Germán Raúl Vera Alejandre, Jesús Axayacatl Cuevas Sánchez y José Luis Macías Vázquez. 2011. "Extreme Hydro-meteorological Events and Disasters in Urban and Rural Communities in Motozintla, Chiapas". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, no. 2, 167-181.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2011. *Atlas de riesgos naturales del municipio de Motozintla*. Chiapas: Gobierno Federal. https://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_07057_AR_MOTOZINTLA.pdf
- Segura, Gustavo, Elena Badilla y Luis Obando. 2011. "Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba". *Revista Geológica de América Central*, no. 45, 101-121. <https://doi.org/10.15517/rgac.voi45.1908>
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). 2019 "Carta geológica de la república mexicana". Gobierno de México. Consultado en febrero de 2025. <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2024. "Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)". Gobierno de México. Consultado en julio de 2024. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- SSN (Servicio Sismológico Nacional). 2024. "Catálogo de sismos". Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Consultado en febrero de 2024. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Suárez, Jaime. 2012. *Deslizamientos*. Bucaramanga: Ediciones UIS.

- UNISDR (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas). 2009. *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra: Naciones Unidas. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Valdez, Jesús Ezequiel, Alexis Ordaz Hernández, Luis Miguel Espinosa Rodríguez y José Emilio Baro Suárez. 2022. "Susceptibilidad a deslizamientos en Malinalco, Estado de México, México. Un aporte a la reducción de riesgos de desastres a escala municipal". *Investigaciones Geográficas*, no. 109, 1-20. <https://doi.org/10.14350/rig.60626>
- Viltres-Milán, Yexenia, Rafael Guardado-Lacaba y Lázaro D. Alfonso-Olivera. 2019. "Cartografía de la peligrosidad por deslizamientos en el municipio de Mayarí, Holguín". *Minería y Geología* 35 (2): 126-146.
- White, Randall A. 1984. "Catalog of Historic Seismicity in the Vicinity of the Chixoy-Polochic and Motagua Faults, Guatemala". *U. S. Geological Survey Open-File Report*, no. 84-88. <https://doi.org/10.3133/ofr8488>
- White, Randall A. 1985. "The Guatemala Earthquake of 1816 on the Chixoy-Polochic". *Bulletin of the Seismological Society of America* 75 (2): 455-473. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750020455>
- White, Randall A. y David H. Harlow. 1993. "Destructive Upper-Crustal Earthquakes in Central America since 1900". *Bulletin of Seismological Society of America* 83 (4): 1115-1142. <https://doi.org/10.1785/BSSA0830041115>

Víctor Bello Carranza

Licenciado en Geografía, magíster en Geografía. Estudiante del Doctorado en Geografía del Riesgo en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Alexis Ordaz Hernández

Doctor en Ciencias Técnicas, profesor investigador de la Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. Línea de investigación Estudios del espacio geográfico para la resiliencia y sustentabilidad del territorio.

José Ramón Hernández Santana

Doctor en Ciencias Geográficas, investigador titular del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Línea de investigación Geomorfología general y cartografía geomorfológica.

Luis Miguel Espinoza Rodríguez

Doctor en Geografía, profesor investigador de la Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. Línea de investigación Geografía Física.