

MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR SISMICIDAD EN MÉXICO: ¿POR QUÉ TAN POCOS?

Jorge Alán Salinas-Jasso^{1,*}

¹ *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Ex Hacienda de Guadalupe, C.P. 67700*

* jorge.salinasjs@uanl.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta una revisión de casos de movimientos en masa inducidos por sismicidad en México. Se presenta un análisis general de las características geológicas de los eventos documentados y las condiciones sísmicas que han detonado inestabilidades de ladera en el país. La mayoría de los casos se ha reportado para la zona central y sur del país, con algunos reportes para las zonas noreste y noroeste. Finalmente, se presenta una evaluación general del peligro asociado, considerando las causas y consecuencias de estos eventos en el territorio nacional.

Palabras clave

Movimientos en masa, terremotos, México, inventarios, peligro, riesgo

Abstract

This paper presents a review of earthquake-induced landslides in Mexico. An analysis of the geological features of the documented events and the seismic conditions that have triggered slope instabilities in the country. Most of the cases have been reported for the central and southern regions of Mexico, with some reports for the northeast and northwest zones. Finally, a general evaluation of the associated hazard is presented considering the causes and consequences of these events in the national territory.

Keywords

landslides, earthquakes, Mexico, inventories, hazard, risk

Introducción

Los terremotos son peligrosos eventos naturales que causan severas pérdidas y cuantiosos daños económicos alrededor del mundo anualmente. Las principales afectaciones ocasionadas por un terremoto se relacionan con la propia sacudida sísmica y su efecto en la estabilidad de la infraestructura civil, lo cual

puede llevar al colapso. Pero no es lo único. Existe una variedad de efectos secundarios que aumentan su impacto negativo asociado.

Los movimientos en masa constituyen el principal efecto secundario detonado por sismicidad en zonas montañosas o cercanas a estas. La conjunción de factores litológicos, estructurales, topográficos, hidrológicos, entre otros, definen el

Salinas-Jasso, J.A. (2023): Movimientos en masa inducidos por sismicidad en México: ¿por qué tan pocos? – en: Montalvo Arrieta, J.C., Ramírez Fernández, J.A., Aguilar-Madera, C.G., Jenchen, U., Salinas Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (eds.): Número especial en conmemoración del 90° Aniversario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del 40° Aniversario de la Facultad de Ciencias de la Tierra. – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, **9 (2023)**: 179-187.

grado de susceptibilidad ante la ocurrencia de estos fenómenos bajo condiciones dinámicas ligadas a sismos de moderada a elevada magnitud.

De manera general, el efecto generado por movimientos en masa inducidos por sismicidad (MMS) tiende a ser considerado dentro de las consecuencias totales provocados por el sismo detonante. En algunos casos los daños por MMS han sobrepasado los generados por la propia vibración del terreno (Marano et al., 2010; Daniell et al., 2017). El impacto por MMS se debe principalmente al bloqueo de vías de transporte o interrupción en la operación de redes de comunicación, limitando las actividades de rescate y la recuperación en zonas afectadas. Sin embargo, se han presentado casos donde el desplazamiento de materiales terrestres ha sepultado comunidades enteras ocasionando tragedias (Plafker et al., 1971; Keefer 1984; Bommer & Rodríguez, 2002).

La mayoría de las investigaciones de MMS se ha realizado en regiones tectónicamente activas y para sismos de moderada a elevada magnitud. Keefer (1984) presentó la primera documentación sistemática de MMS para 40 eventos históricos ocurridos entre 1811 y 1980. La principal aportación fue el análisis espacial entre los patrones de distancia, área de afectación y cantidad de movimientos en masa respecto a los parámetros de fuente de los terremotos estudiados (magnitud, hipocentro e intensidad macrosísmica). Rodríguez et al. (1999) presentó una documentación de casos para el periodo 1980 - 1997, donde se refinaron las relaciones propuestas por Keefer (1984). Posterior a esto, diversos trabajos se han centrado en documentar patrones espaciales y consecuencias de los efectos geomorfológicos a corto y largo plazo ocasionados por sismicidad (Keefer, 2002; Schiliro et al., 2023).

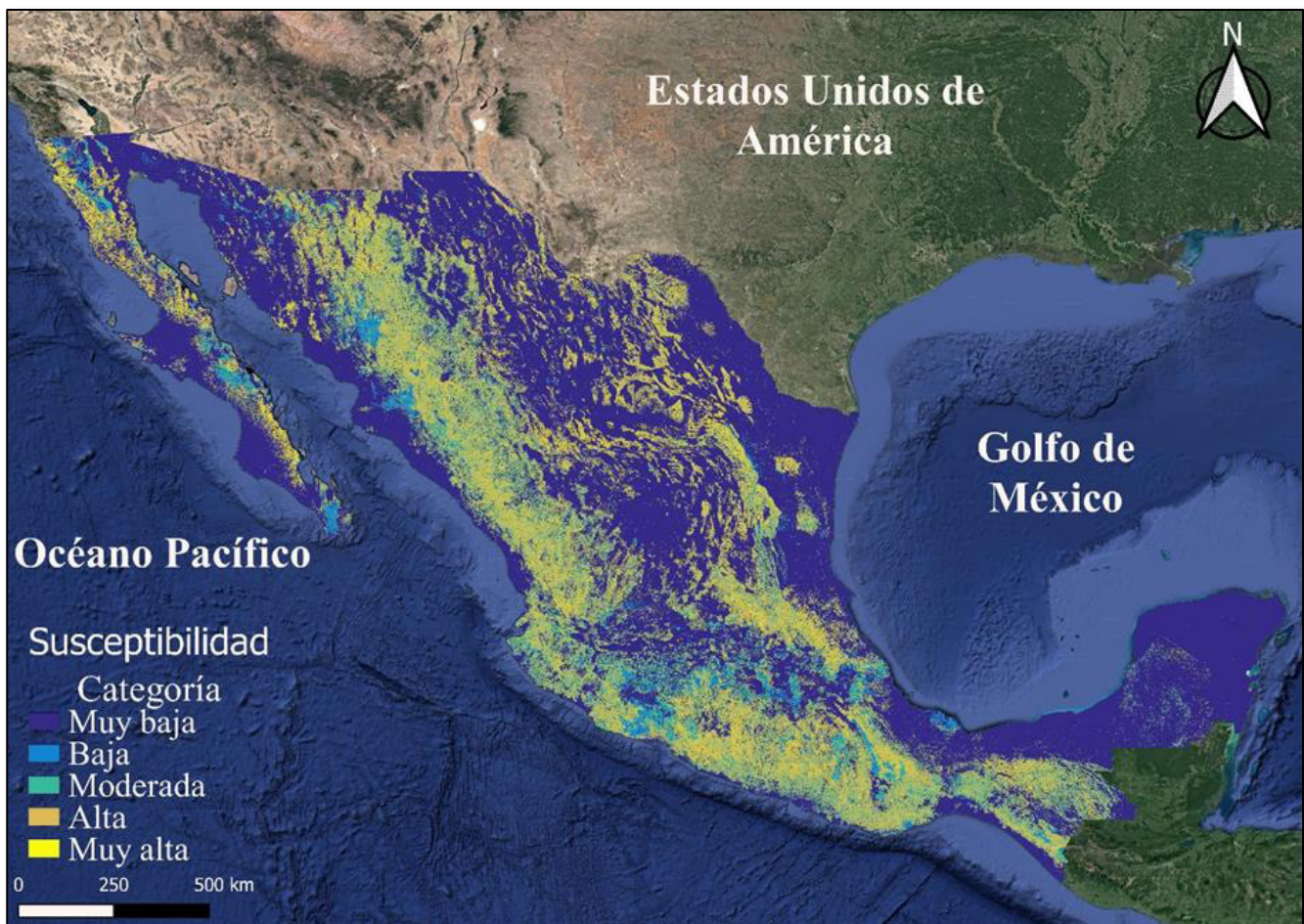


Figura 1: Susceptibilidad a movimientos en masa. Fuente: CENAPRED (2023).

En este trabajo se presenta una revisión del estudio de movimientos en masa inducidos por sismicidad en México. Se discuten las condiciones de susceptibilidad que propician la

ocurrencia de estos eventos en nuestro país partiendo del análisis de las condiciones geológicas, topográficas, climáticas y tectónicas. Posteriormente, se presentan algunos casos de MMS

reportados en la literatura, lo cual permite analizar el peligro asociado a estos eventos en el territorio nacional. Finalmente, se discuten áreas de oportunidad y trabajo a futuro que puede ser realizado para la documentación y análisis de MMS en México.

Movimientos en masa en México

México es un país de montañas, donde casi dos terceras partes del territorio nacional presentan rasgos orográficos muy distintivos. Las condiciones geológicas, estructurales, topográficas, hidrológicas y climáticas predisponen diferentes escenarios para el desarrollo de movimientos en masa en nuestro país (Figura 1). La mayor cantidad de estudios se ha desarrollado para eventos de inestabilidades de ladera detonados por precipitaciones extraordinarias, con una menor proporción de trabajos enfocados en otros agentes detonantes (Díaz et al., 2020). Fenómenos naturales y actividad antropogénica han activado diferentes tipos de movimientos en masa como caídos, deslizamientos, flujos y avalanchas en varias partes del país. Estas situaciones han ocasionado severos daños en

infraestructura, lesionados y pérdidas de vidas como consecuencia de estos eventos.

La documentación más abundante de movimientos en masa se ha generado para la porción central – oriental del país, con una notable carencia de reportes para la porción occidental (Figura 2). Los estados de Puebla, Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Guerrero tienen la mayor cantidad de reportes. En el norte el estado de Nuevo León es el estado con más casos. Los inventarios publicados se han concentrado principalmente en evento detonados por precipitaciones extraordinarias. En menor medida existen reportes de casos detonados por vulcanismo, actividades antropogénicas y sismicidad.

De manera general, los inventarios existentes documentan la cantidad y ubicación de los casos identificados, características geológicas, topográficas, así como el detonante principal y afectaciones asociadas. Estas bases de datos son sumamente importantes ya que constituyen evaluaciones requeridas en la implementación del análisis del riesgo por movimientos en masa (Guzzetti et al., 2012).

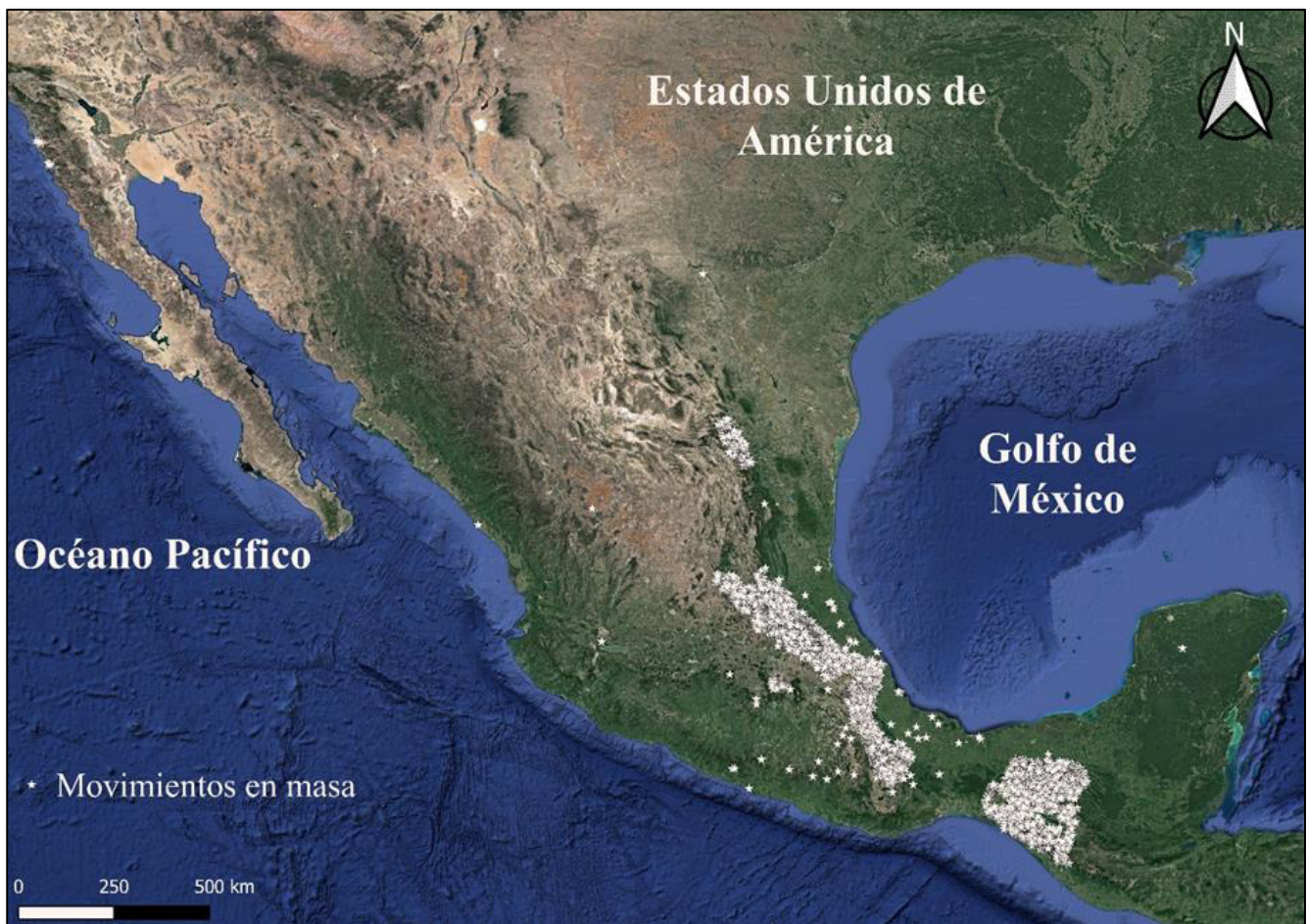


Figura 2: Inventario nacional de movimientos en masa. Fuente: INEGI (2023).

Movimientos en masa inducidos por sismicidad en México

El contexto tectónico de nuestro país se caracteriza por la interacción de 5 placas tectónicas: placa de Norteamérica, placa del Pacífico, placa de Rivera, placa de Cocos y placa del Caribe (Figura 3). La mayor tasa de sismicidad se presente en el sur, centro, poniente y noroeste del país, claramente asociada a los límites de placas. Además, procesos de deformación intraplaca se han documentado para las porciones norte-noreste de México, dando cuenta de la notable actividad sísmica en la mayor parte del territorio nacional.

En México el estudio de movimientos en masa inducidos por sismicidad sigue siendo limitado. Los casos de estudio se han centrado en eventos de moderada a alta magnitud ($M > 6.3$), principalmente para sismos ocurridos en el sur y centro del país. Fraustro (1999) identificó distintos tipos de MMS ocurridos

cerca del graben de Cuauhtepac, al norte de la Ciudad de México, para 40 sismos históricos ocurridos entre 1455 y 1995. En este trabajo sobresale un derrumbe de rocas asociado con un terremoto ocurrido el 29 de octubre de 1959 que ocasionó severos daños en los estados de Colima y Oaxaca.

- Iglesias Jiménez et al. (1999) y Cuanalo et al. (2006) documentaron el daño asociado por el sismo de Tehuacán, Puebla del 15 de junio de 1999. El sismo, con una magnitud $M 7.0$ y foco de 63 km, ocurrió en la zona de subducción de la placa de Cocos bajo la placa de Norteamérica. Los estados de Puebla, Oaxaca, Veracruz, Tlaxcala, Morelos y Guerrero concentraron la mayor cantidad de daños: cuarteaduras en casas de adobe, iglesias y colapso de recintos históricos. Vías de comunicación como carreteras y puentes fueron afectados por caídos de roca y suelos principalmente en la zona epicentral.

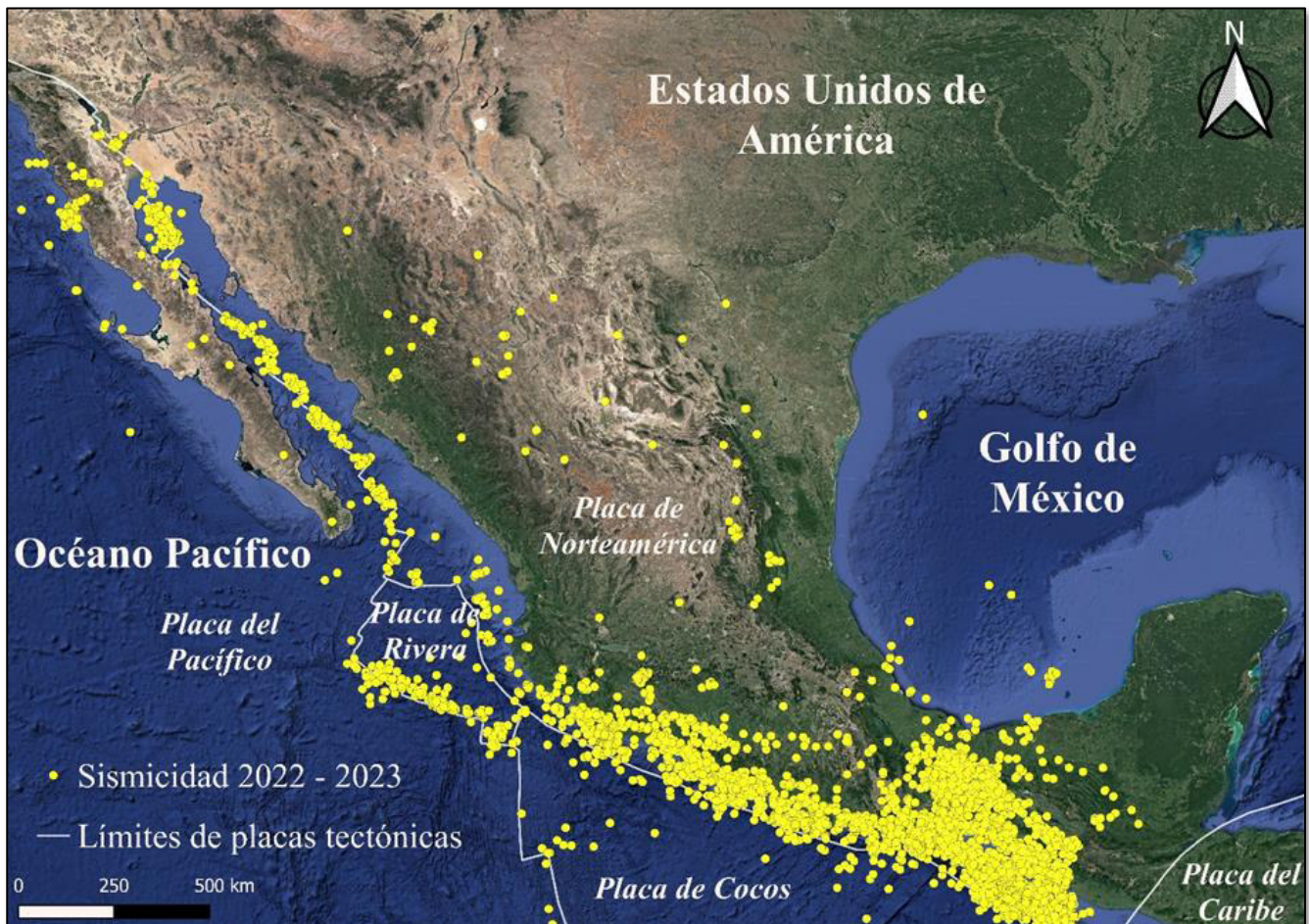


Figura 3: Sismicidad en México del 2022 al 2023. Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

- [Schuster & Highland \(2001\)](#) reportaron cuantiosos daños asociados a un sismo de magnitud M 6.4 ocurrido el 3 de enero de 1920 cerca de Orizaba, Veracruz. En su análisis resalta un flujo de detritos que ocurrió en la desembocadura del valle del Río Huitzilapan, cerca del pico de Orizaba. A su paso, el flujo dejó gran destrucción en la comunidad de Barranca Grande. Una situación similar se reportó para el sismo del 11 de enero de 1997 en Michoacán.
- [Herrera Castañeda \(2002\)](#) propuso una regionalización del país según el potencial de ocurrencia de movimientos en masa. Para esto, se tomaron en cuenta los factores que influyen en la generación del fenómeno en el territorio nacional: condiciones geológicas, climatológicas, topográficas y sismicidad.
- [Bommer & Rodríguez \(2002\)](#) presentaron un catálogo de movimientos en masa inducidos por sismicidad para América Central. De éste, se desprenden 12 sismos ocurridos entre 1912 y 1999 como desencadenantes de movimientos en masa para México. Además, se reportan los efectos geomorfológicos por sismos históricos, sobresaliendo eventos en 1447, 1496, 1634, 1800, 1828, 1865, 1880, 1887 y 1891.
- [Keefer et al. \(2006\)](#) analizaron las características de miles de movimientos en masa desencadenados por el terremoto de Tecmán, Colima ocurrido el 21 de enero del 2003. El sismo registró una magnitud M 7.6 con una profundidad hipocentral de 9 km. El sismo provocó el deceso de 30 personas y casi medio millar de habitantes fueron damnificados. Sus efectos se sintieron en los estados de Colima, Jalisco, Michoacán, así como en la Ciudad de México. La mayor cantidad de MMS ocurrieron en la región volcánica caracterizada por materiales no consolidados y tobas.
- [Ramírez-Herrera et al. \(2012\)](#) desarrollaron un análisis geomorfológico para caídos de roca detonados por el sismo M 7.0 de Acambay de 1912. Se propone que la magnitud del sismo y las características litológicas y de relieve condicionaron el origen, tamaño y distancia de transporte para los casos estudiados.
- [Niño et al. \(2014\)](#) elaboraron una aproximación nacional para caracterizar deslizamientos traslacionales inducidos por sismicidad, tomando como zona de referencia la zona de subducción del sur del país. Su análisis estima el desplazamiento de Newmark a partir de una relación empírica entre la aceleración crítica y la aceleración máxima del suelo esperada para diferentes periodos de retorno. Otros mecanismos como deslizamientos rotacionales, caídos de rocas, flujos, dispersiones laterales y avalanchas no fueron considerados.
- [Barlow et al. \(2015\)](#) revisaron la relación entre el flujo de sedimentación y la ocurrencia de movimientos en masa relacionados con el terremoto de magnitud M 7.2 ocurrido el 4 de abril del 2010 en la Sierra de Cucapah en Mexicali, Baja California. A partir de imágenes satelitales de alta resolución se elaboró un inventario de 452 movimientos en masa desencadenados por el sismo. Los resultados indican que los movimientos en masa sólo aportaron un pequeño volumen del flujo de sedimentación durante el sismo, siendo mayor la pérdida por subsidencia cosísmica del sistema montañoso.
- [Alcántara-Ayala et al. \(2017\)](#) reportaron 13 movimientos en masa desencadenados por un sismo M 7.2 y profundidad de 10 km, ocurrido el 18 de abril del 2014 en el estado de Guerrero. El terremoto fue sentido en 12 entidades del país y la Ciudad de México. Cerca de 1300 casas fueron damnificadas por el sismo y severos daños se reportaron para gran parte de la infraestructura del área.
- [Salinas-Jasso et al. \(2018\)](#) analizaron la ocurrencia de caídos y deslizamientos someros detonados por una secuencia sísmica de baja magnitud ($2.8 < M < 3.6$) ocurrida durante el segundo semestre del 2012 en la porción central del estado de Nuevo León. En este trabajo se identificó la ocurrencia de MMS que superaron los umbrales de distancia y área de afectación propuestos en la literatura internacional, resaltando que las condiciones de susceptibilidad de sitio influyen en la activación de estos casos, aún y cuando sean sismos de baja magnitud. Dicho trabajo constituye uno de los pocos casos a nivel mundial donde se ha estudiado la activación de MMS en zonas localizadas en interiores continentales.
- En septiembre del 2017, dos sismos importantes impactaron el territorio nacional. La noche del 7 de septiembre, un potente terremoto de magnitud M 8.2 sacudió el Golfo de Tehuantepec, frente a las costas de Chiapas. Casi dos semanas después, un terremoto de magnitud M 7.1 ocurría en el centro de México, en el límite de los estados de Morelos y Puebla. Además de la destrucción en infraestructura y casos social, ambos sismos detonaron cientos de movimientos en masa en la porción central y sur del país ([Salinas-Jasso et al., 2023](#)). [Montgomery et al. \(2020\)](#) fueron los primeros en documentar los movimientos en masa inducidos por el sismo del 19 de septiembre del 2017, identificando casos que afectaron infraestructura como carreteras y puentes. Posteriormente, [Coviello et al. \(2021\)](#) y [Prakash et al. \(2021\)](#) analizaron cientos de flujos de detritos y deslizamientos someros ocurridos como consecuencia del mismo terremoto en el volcán Popocatepetl. [Salinas-Jasso et al. \(2023\)](#) analizaron la influencia del contexto geológico, topográfico, tectónico e hidrológico en la activación de algunos casos detonados por este terremoto. La principal conclusión fue que la litología y las

características propias del evento controlaron la ocurrencia de caídos, deslizamientos someros y algunos flujos en esta zona del país.

- [Dávila-Hernández et al. \(2021\)](#) utilizaron un método semiautomatizado para mapear los eventos detonados por el sismo M 7.1 de La Crucecita, Oaxaca del día 23 de junio

del 2020 mediante el análisis de imágenes satelitales de muy alta resolución. [Velázquez-Bucio et al. \(2023\)](#) investigaron los efectos en el ambiente asociados con los sismos del 7 de septiembre de 2017 (M 8.2) y La Crucecita mediante la aplicación de un análisis de percepción remota.



Figura 4: Sismos históricos para los que se ha documentado movimientos en masa.

Análisis

La mayor cantidad de casos de MMS se ha desarrollado para la porción sur y central del país, donde se genera la principal actividad sísmica (Figura 4). Se han utilizado diversas metodologías para el estudio de estos eventos: recopilación de documentos históricos y relatos populares, reportes en medios de comunicación, notas en redes sociales, trabajo de campo y percepción remota. Esto ha permitido definir, al menos de manera aproximada, la ubicación de MMS. Para los casos más recientes se han desarrollado inventarios, análisis geoespaciales y modelado del origen e impacto de estos procesos y su relación con el sismo detonante.

La mayoría de los movimientos en masa detonados por sismos se han presentado en litologías volcánicas fuertemente fracturadas, lo cual coincide con análisis globales ([Keefer, 1984](#); [Rodríguez et al., 1999](#)). Andesitas, basaltos, dacitas, tobas y fragmentos piroclásticos constituyen los materiales más afectados por MMS en el país. Debido a su inherente susceptibilidad, los suelos constituyen materiales geológicos muy propensos a procesos de inestabilidad de laderas. En menor medida, rocas sedimentarias y complejos metamórficos se han visto afectados por movimientos en masa detonados por sismicidad.

Esto condiciona que las tipologías más frecuentes de MMS sean caídos y deslizamientos someros, tanto de rocas como de detritos. Sin embargo, cuando existen condiciones de saturación

por humedad en la pendiente, se presentan flujos y deslizamientos rotacionales. Un punto importante es que gran parte de los casos se originan en la cima de las montañas, lo cual puede resaltar efectos de sitio topográficos (Ashford et al., 1997). La distribución espacial de MMS depende del epicentro del terremoto y las condiciones geológicas del sitio. Aquellos lugares donde se presenten condiciones de elevada susceptibilidad requerirán una mínima aceleración sísmica para que se presenten inestabilidades de ladera.

Un punto importante por considerar es la influencia que tienen los procesos de precipitación. Cuando se presentan lluvias importantes antes del sismo se incrementan las condiciones de susceptibilidad ya que se disminuye la resistencia al corte de los materiales o bien por el aumento de peso sobre la pendiente. En estos casos se tienen laderas en condiciones críticas de equilibrio, donde la energía sísmica constituye solo el empuje para que se produzca el inminente desplazamiento, por lo que sismos de baja a moderada magnitud puede actuar como detonantes (Salinas-Jasso et al., 2018). Flujos, deslizamientos rotacionales o avalanchas son tipologías típicas de estas condiciones, sin descartar la ocurrencia de otros mecanismos.

A pesar de la constante ocurrencia de sismicidad, particularmente en la zonas sur y centro del país, los reportes de movimientos en masa por estos fenómenos son considerablemente escasos. Algunas áreas de oportunidad para trabajo futuro son: 1) desarrollo de inventarios, 2) análisis de características, procesos y mecanismos, 3) modelado físico y numérico, 4) caracterización de efectos secundarios (p.ej., formación de embalses naturales o reactivación de movimientos en masa), 5) comportamiento mecánico de los distintos materiales durante oscilaciones sísmicas (p.ej., efectos de sitio), 6) instrumentación para el monitoreo, predicción y sistemas de alerta y 7) evaluación de riesgo.

Discusión: peligro asociado

La sismicidad es un peligro latente en distintas zonas del país. Por lo tanto, la evaluación del riesgo sísmico implica entender la naturaleza de los efectos secundarios. Es evidente que el peligro por movimientos en masa inducidos por sismicidad se ha subestimado en México.

Se recomienda implementar análisis de estabilidad dinámicos con el fin de evaluar la influencia de la aceleración sísmica en la pendiente, considerando los criterios geológicos y geomecánicos de sitio. Análisis pseudoestáticos y el método de Newmark se enfocan en determinar el valor mínimo de aceleración sísmica capaz de detonar movimientos en masa por sismicidad (Jibson, 2011). De esta manera se tiene una aproximación del efecto de la sismicidad en la pendiente.

El peligro asociado es inminente principalmente en aquellas zonas donde coexiste zonas montañosas y frecuente actividad

sísmica en el país. La exposición de la población ante estas condiciones (sismicidad y zonas montañosas) es menor si se compara por ejemplo con otras zonas de la región como América Central donde gran parte de la población se concentra cerca de volcanes a lo largo de la costa del Pacífico (Bommer & Rodríguez, 2002). Aunque la mayor densidad de población se concentra en la parte central del país, las afectaciones por movimientos en masa inducidos por sismicidad son mínimas. Infraestructura como carreteras o comunidades rurales se pueden ver afectadas ante los efectos de estos procesos. Estrategias de prevención deben ser adecuadas para estos casos. Por lo tanto, las implicaciones de riesgo asociado deben contemplar estudios de exposición y vulnerabilidad social, estructural y económica con el fin de evaluar el potencial grado de afectación ocasionado por estos eventos.

Conclusiones

Se presenta una revisión de las características de movimientos en masa inducidos por sismicidad en México. La mayoría de los casos se han documentado para el centro y sur del país, resaltando el peligro relacionado con la ocurrencia de sismicidad e inestabilidades de ladera. Litologías volcánicas y fracturadas son las más propensas a desarrollar estos procesos, con una notable influencia de procesos de precipitación en las condiciones de susceptibilidad. Existen diversas áreas de oportunidad en la investigación de estos casos en nuestro país, desde la elaboración de inventarios, análisis de factores condicionantes y modelado. A medida que estas tareas sean atendidas la estimación del riesgo sísmico y por movimientos en masa será más completa. Dichas evaluaciones deben de ser contempladas en el plan nacional para el desarrollo de estrategias de prevención y mitigación por estos fenómenos.

Referencias

- Alcántara-Ayala, I., Garnica-Peña, R.J., Domínguez-Morales, L., González-Huesca, A.E. & Calderón-Vega, A. (2017): The La Pintada landslide, Guerrero, Mexico: hints from the Pre-Classic to the disasters of modern times. – *Landslides*, **14**(3): 1195-1205.
- Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J. & Deng, N. (1997): Topographic effects on seismic response of steep slopes. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**(3): 701-709.
- Barlow, J., Barisin, I., Rosser, N., Petley, D., Densmore, A. & Wright, T. (2015): Seismically-induced mass movements and volumetric fluxes resulting from the 2010 Mw=7.2 earthquake in the Sierra Cucapah, Mexico. – *Geomorphology*, **230**: 138-145.

- Bommer, J.J. & Rodríguez, C.E. (2002): Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering – Geology*, **63**: 189-220.
- CENAPRED (2023): Movimientos en masa. – Página web: <https://www.gob.mx/cenapred>
- Coviello, V., Capra, L., Norini, G., Dávila, N., Ferrés, D., Márquez-Ramírez, V.H. & Pico, E. (2021): Earthquake-induced debris flows at Popocatepetl volcano, Mexico. – *Earth Surface Dynamics*, **9**: 393-412.
- Cuanalo, O.A., Quezada, P., Aguilar, A., Olivan, A.M. & Barona, E. (2006): Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. – *e-Gnosis*, **4**: 1-14.
- Daniell, J.E., Schaefer, A.M. & Wenzel, F. (2017): Losses associated with secondary effects in earthquakes. – *Frontiers in Built Environment*, **3**: 1-30.
- Dávila-Hernández, N., Ariza-Pastrana, A., Caballero-García, L., Villagran-de Leon, J.C., Zaragoza-Alvarez, A., Dominguez-Morales, L., Antonio-Nemiga, X. & Dominguez-Posadas, G. (2021): Co-seismic landslide detection after M7.4 earthquake on June 23, 2020, in Oaxaca, Mexico, based on rapid mapping method using high and medium resolution synthetic aperture radar (SAR) images. – *Landslides*, **18**: 3833-3844.
- Díaz, S.R., Cadena, E., Adame, S. & Dávila, N. (2020): Landslides in Mexico: their occurrence and social impact since 1935. – *Landslides*, **17**: 379-394.
- Fraustro, O. (1999): Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuauhtepic: región sur de la Sierra de Guadalupe, en la Ciudad de México. – *Investigaciones Geográficas*, **38**: 15-29.
- Guzzetti, F., Mondini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. & Chang, K. (2012): Landslide inventory maps: New tools for an old problem. – *Earth-Science Reviews*, **112**: 42-66.
- Herrera-Castañeda, S.R. (2002): Regionalización de los deslizamientos en México. – *Academia de Ingeniería*: 20p.
- Iglesias-Jiménez, J., Iglesias-Villarreal, J., Ramírez-Centeno, M., Gómez-González, B., Guerrero-Correa, J.J., Ruiz-Acevedo, C. & Salgado-Salazar, I. (1999): Tehuacán, México, earthquake of June 15, 1999. – *Seismological Research Letters*, **70**(6): 698-704.
- INEGI (2023): Movimientos en masa. – Página web: <https://www.inegi.org.mx/>
- Jibson, R.W. (2011): Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes - a retrospective. – *Engineering Geology*, **122**: 43-50.
- Keefer, D.K. (1984): Landslides caused by earthquakes. – *Geological Society of America Bulletin*, **95**: 406-421.
- Keefer, D.K. (2002): Investigating landslides caused by earthquakes – A historical review. – *Surveys in Geophysics*, **23**: 473-510.
- Keefer, D.K., Wartman, J., Navarro Ochoa, C., Rodríguez-Marek, A. & Wieczorek, G.F. (2006): Landslides caused by the M 7.6 Tecoman, México earthquake of January 21, 2003. – *Engineering Geology*, **86**: 183-197.
- Marano, K.D., Wald, D.J. & Allen, T.I. (2010): Global earthquake casualties due to secondary effects: a quantitative analysis for improving rapid loss analyses. – *Natural Hazards*, **52**: 319-328.
- Montgomery, J., Candia, G., Lemnitzer, A. & Martínez, A. (2020): The September 19, 2017 Mw 7.1 Puebla-Morelos city earthquake: observed rockfalls and landslide activity. – *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **130**(105972).
- Niño, M., Jaimés, M.A. & Reinoso, E. (2014): Seismic-event-based methodology to obtain earthquake induced translational landslide regional hazard maps. – *Natural Hazards*, **73**: 1697-1713.
- Plafker, G., Erickson, G.E. & Fernández Concha, J. (1971): Geological aspects of the May 31, 1970, Perú earthquake. – *Seismological Society of America Bulletin*, **61**(3): 543-578.
- Prakash, N., Manconi, A. & Loew, S. (2021): A new strategy to map landslides with a generalized convolutional neural network. – *Scientific Reports*, **11**(9722).
- Ramírez-Herrera, M.T., Inbar, M. & Legorreta Paulín, G. (2012): One hundred years of the rock fall triggered by the 1912 Acambay earthquake, Mexico. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, **56**(4): 495-505.
- Rodríguez, C.E., Bommer, J. & Chandler, R. (1999): Earthquake-induced landslides: 1980-1997. – *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18**: 325-346.
- Salinas-Jasso, J.A., Montalvo-Arrieta, J.C. & Reinoso-Angulo, E. (2018): Landslides induced by a low magnitude seismic sequence at continental interiors: a case study of the Santa Rosa canyon, northeastern Mexico. – *Landslides*, **15**: 783-795.
- Salinas-Jasso, J.A., Montalvo-Arrieta, J.C. & Velasco-Tapia, F. (2023): Spatial patterns of shallow landslides induced by the 19 September 2017 Puebla-Morelos earthquake, Mexico. – *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **82**: 15.
- Schiliro, L., Rossi, M., Polpetta, F., Fiorucci, F., Fortunato, C. & Reichenbach, P. (2023): A web-based GIS (web-GIS) database for scientific articles on earthquake-triggered

- landslides. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **23**: 1789-1804.
- Schuster, R.L. & Highland, L.M. (2001): Socioeconomic impacts of landslides in the Western Hemisphere. – U.S. Geological Survey Open-File Report, **01-276**: 47 p.
- Velázquez-Bucio, M.M., Ferrario, M.F., Muccignato, E., Porfido, S., Sridharan, A., Chunga, K., Livio, F., Gopalan, S. & Michetti, A.M. (2023): Environmental effects caused by the Mw 8.2, September 8, 2017, and Mw 7.4, June 23, 2020, Chiapas-Oaxaca (Mexico) subduction events: comparison of large intraslab and interface earthquakes. – *Quaternary International*, **651**: 62-76.