



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Aplicación de los vehículos aéreos  
no tripulados en el cálculo de  
volumen de deslizamientos**

**TESINA**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geomático**

**P R E S E N T A**

Mictlan Sacbé Pérez Moreno

**DIRECTOR DE TESINA**

Dr. Gabriel Legorreta Paulín



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026**



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito APLICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS EN EL CÁLCULO DE VOLUMEN DE DESLIZAMIENTOS que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

MICTLAN SACBE PÉREZ MORENO  
Número de cuenta: 317223259

# Índice general

<b>Introducción</b> .....	2
<b>Zona de estudio</b> .....	8
<b>Metodología</b> .....	12
<b>Resultados</b> .....	20
<b>Discusión y conclusiones</b> .....	23
<b>Financiamiento y agradecimientos</b> .....	30
<b>Referencias</b> .....	33

## Introducción

Los deslizamientos superficiales (DS) y de asentamiento profundo (DAP) dentro de los procesos de remoción en masa (PRM) tienen lugar cuando las capas de suelo, escombros y/o roca de una pendiente se desprenden por diversos factores (intrínsecos y extrínsecos) y se mueven cuesta abajo. Estos procesos son uno de los principales fenómenos naturales que producen enormes pérdidas económicas, de patrimonio y de vidas cada año a nivel mundial (Red Cross and Red Crescent Societies, 2022; Singh y Sepúlveda; 2025). Los DS a su vez incluyen flujos de escombros y deslizamientos de escombros (Forest Practices Division, WSDNR, 2006), donde la principal diferencia entre ambos radica en la forma en que se desplazan los materiales, pues el primero es un movimiento rápido y fluido de material saturado de agua, y el segundo implica el movimiento de una masa a lo largo de una superficie (CONRED, 2025).

Estos PRM son fundamentales en la formación del relieve y pueden generarse a partir de factores geológicos como la sismicidad y actividad volcánica, hídricos como lluvias intensas e inundaciones, y antrópicos como la minería, cambio de uso de suelo, cortes de pendientes, deforestación e introducción de tuberías (Legorreta-Paulín et al., 2017, Lazzari y Piccarreta, 2018; Mizutori, 2020; Legorreta-Paulín et al., 2023). Por su parte, la magnitud de los PRM se mide por el volumen total de material desplazado hacia un área de deposición, mismo que causa pérdidas humanas y representan un riesgo a las actividades socioeconómicas.

Ejemplos a nivel mundial de estas pérdidas a raíz de los PRM son:

1) Los deslizamientos provocados por el terremoto de Sichuan en China de 2008, donde cerca de 70.000 personas murieron, de ellas, 20.000 fueron producto de los deslizamientos, al haber sido arrastradas o sepultadas (Yin et al., 2009).

2) El tifón Morakot que azotó la República de China en 2009, provocó una acumulación de 3000 mm de lluvia en cinco días en la isla de Taiwán, lo que generó graves DAP, flujos de escombros y lodo que dejaron sin vida a más de 500 personas y cientos de desaparecidos, además de dejar sepultadas viviendas, escuelas, y varios poblados en las zonas montañosas (Lin y Chen, 2020).

3) En 2014, en Nepal durante la temporada de monzones murieron 113 personas, 129 desaparecieron y cientos más resultaron afectados o heridos a causa de deslizamientos en las localidades cercanas a la región del Himalaya. Aunado a lo anterior, los daños a la infraestructura y a la ganadería, de la cual dependen muchas de ellas para sostener su economía, llegaron hasta los 24 millones de rupias en pérdidas (DWIDP, 2015; Pathak, 2016).

4) A principios de noviembre de 2020, el huracán Eta impactó en Centroamérica como categoría 4, causando deslizamientos, inundaciones y fuertes vientos en Panamá, por lo que miles de personas se vieron obligadas a abandonar sus hogares (Red Cross and Red Crescent Societies, 2022).

5) El 24 de mayo de 2024, un deslizamiento de gran magnitud en la provincia de Enga, Papúa Nueva Guinea, sepultó varias aldeas y dejó alrededor de 670 personas fallecidas, convirtiéndose en uno de los desastres más severos registrados en ese país en los últimos años (CRED, 2025).

A nivel nacional, hasta hace apenas unos años los PRM han empezado a ser estudiados a detalle. Algunos ejemplos son:

1) En la cuenca La Ciénega, perteneciente al volcán Nevado de Toluca en el Estado de México, las características geomorfológicas y geológicas crean condiciones que la hacen susceptible a procesos gravitacionales. Aquí se han realizado estudios que han permitido obtener un mapa geomorfológico, un inventario de procesos gravitacionales y la relación con el cambio de uso de suelo (García-Reyes et al., 2018).

2) En el estado de Guerrero se llevó a cabo un modelo de susceptibilidad a PRM que incluyó la interpretación de factores físicos caracterizados por distintos mapas temáticos. La generación del modelo consistió en la acumulación final de los aportes individuales de cada factor que representó una zonificación por índice de susceptibilidad. Para corroborar los datos se realizó un inventario de deslizamientos generado a través de interpretación de imágenes de Google Earth. Los resultados del modelo de susceptibilidad a PRM, permitieron identificar y categorizar las zonas

de riesgo, con ello se determinó que los factores litológicos, estructurales, topográficos y eventos hidrometeorológicos fueron los que provocaron la incidencia de la mayoría de los deslizamientos registrados (Romero-Rojas et al., 2019).

3) En 2020, el huracán Eta, de categoría 4, propició en cinco días de lluvia la acumulación de 632.5 mm en distintos municipios de Chiapas, lo que desencadenó numerosos deslizamientos. En la región Zoque, por ejemplo, se registraron 95 zonas afectadas, con un saldo de tres personas fallecidas y sesenta viviendas destruidas. En esta región, además de la intensa precipitación, el cambio de uso de suelo y la pérdida de vegetación en sitios de mayor pendiente influyeron de manera determinante en la ocurrencia de los deslizamientos. A partir de este evento, se realizó un estudio orientado a evaluar las comunidades zoques afectadas, identificar posibles áreas de reubicación y apoyar en la planificación para la prevención y mitigación del riesgo (Iglesias-Carreño et al., 2025).

Para analizar el tipo, distribución y susceptibilidad a deslizamientos, así como para el cálculo de volúmenes de materiales aportados por los PRM es fundamental la elaboración de inventarios de deslizamientos, que no son más que el registro sistemático de la ubicación y características de estos. Para ello se utilizan técnicas y datos de teledetección como imágenes satelitales, interferometría y LiDAR (Light Detection and Ranging), mediciones *in situ* y estudios de campo que incrementen el conocimiento de un área y que permitan y mejoren la recolección de datos de deslizamientos, hecha previamente mediante fotointerpretación u otras fuentes de percepción remota. Sin embargo, esta metodología no garantiza una representación exhaustiva de los procesos gravitacionales (Lissak et al., 2020). Adicional a ello, estas técnicas son costosas cuando se utilizan para evaluar cambios en los PRM en áreas de pocos kilómetros cuadrados y, por consiguiente, se requieren realizar algunas concesiones y compensaciones de calidad en los trabajos, de acuerdo con la resolución y escala de los productos obtenidos (Liucci et al., 2017). Además, su aplicación es limitada cuando los investigadores quieren monitorear cambios a corto plazo en un área, debido a la demanda de tiempo y recursos económicos (Ray et al., 2020). Por ejemplo, en 2010, un grupo de seis personas que utilizó GPS

diferencial y rappel requirió tres sesiones de dos días de trabajo de campo para medir un solo DAP de 1744 m<sup>2</sup> en el volcán Pico de Orizaba (Legorreta-Paulín et al., 2021). A escala local, la evaluación de los deslizamientos y sus volúmenes es compleja por factores como: la combinación y mezcla de diversos tipos de deslizamientos, el acceso limitado a laderas de pendiente escarpada, la cartografía poco detallada y la resolución inadecuada o deficiente de los modelos digitales de elevación (MDE) (Liucci et al., 2017).

En los últimos años, la aparición, el desarrollo y evolución de vehículos aéreos no tripulados (VANT) y sus productos como fotografías aéreas, MDE, ortofotos y nubes de puntos, han brindado una nueva oportunidad para satisfacer las necesidades del investigador (Escobar-Villanueva et al., 2017).

En específico, la evaluación del volumen de deslizamientos como indicador de su movilidad y magnitud, es fundamental para medir su posible efecto en el desarrollo del paisaje natural y cultural (Ramírez-Díaz, 2025). Además, el volumen aportado por los deslizamientos se utiliza en simulaciones numéricas para evaluar el análisis de estabilidad y predecir el riesgo potencial de flujo de escombros (Alanis-Anaya, 2022). Existen múltiples métodos y técnicas para estimar el volumen de deslizamientos: utilizando la superposición entre un MDE previo y uno posterior al fenómeno (Tang et al. 2020; Flynn et al., 2024), con mediciones de campo de la forma física del deslizamiento (Wenske et al. 2012), por medio de simulaciones numéricas y métodos probabilísticos (Lin y Chen, 2020; Berber et al., 2025), con observaciones analógicas de laboratorio (Tang et al., 2020), con estadística que vincula las mediciones geométricas del área del deslizamiento con el volumen del mismo (Massey et al., 2020), y empleando lenguaje de programación para calcular una interpolación (Manocha et al., 2025), entre otros.

Determinar el volumen de un deslizamiento es una tarea compleja que requiere información sobre la geometría superficial y subterránea, la cual es difícil y costosa de recabar (Ya et al., 2023). La cantidad de material también influye en la distancia del deslizamiento, que son generalmente más altas con eventos más grandes, como

resultado de una mayor propagación y movimiento de un mayor volumen de material.

En México, se han realizado esfuerzos aislados para evaluar y cartografiar deslizamientos a través de los VANT, los cuales han sido usados para sobrevolar áreas afectadas por deslizamientos de difícil acceso, obtener cartografía, fotografías aéreas, MDE, curvas de nivel, analizar los deslizamientos y su morfología a escalas poco detalladas y para evaluar escenarios de susceptibilidad (CENAPRED, 2017; Ruiz et al., 2017; Legorreta-Paulín et al., 2023).

En 2024 un grupo de investigadores analizaron la distribución de los deslizamientos y caracterizaron las formas del terreno propensas a la inestabilidad de laderas a lo largo de la cuenca del Río Xopanac mediante un mapa de inventario de deslizamientos creado a partir de imágenes obtenidas de Google Earth, capas temáticas (geología, pendiente, orientación) y fotografías aéreas multitemporales, y que posteriormente fueron verificados en trabajo de campo. Una vez realizada la comprobación, se realizó un mapa de riesgo en un SIG con base en el Protocolo de Zonificación de Peligro de Deslizamientos de Tierra de la División de Prácticas Forestales del Departamento de Recursos Naturales (DNR) del Estado de Washington (Forest Practices Division, WSDNR, 2006). El análisis clasificó la cuenca hidrográfica en 13 formas de relieve, cuyo riesgo de estabilidad de laderas fue catalogado desde bajo a muy alto. El trabajo concluyó que la clasificación de riesgo para la cuenca era muy alta (Legorreta-Paulín et al., 2024).

Para la determinación de la geometría y el volumen de los deslizamientos son necesarios la generación de MDE detallados, para ello existen programas comerciales especializados en procesos fotogramétricos que producen inicialmente Modelos Digitales de Superficie (MDS) para, en post-procesos, de manera semiautomática o automática, obtener el MDE (Arenas-Medina, 2024). En este caso, el usuario discrimina de manera semiautomática, mediante polígonos de selección, elementos como vegetación, edificios, vehículos, etc., y el programa rellena los vacíos que deja dicha eliminación, para reconstruir y generar el MDE. De manera automática, el usuario define parámetros como ángulos, distancias o alturas

mínimas de un punto en la nube para reclasificar la nube de puntos en dos clases: puntos que representan el terreno y el resto (Escobar-Villanueva et al., 2017). No obstante, a pesar de que el uso de VANT en México como instrumentos eficientes para la adquisición de ortofotos, datos 3D y MDE de la cartografía de deslizamientos es muy prometedor, no existe una metodología sólida para el procesamiento, modelación y obtención de volúmenes de materiales, aportados por deslizamientos, en un periodo de tiempo específico. Para abordar esta carencia, el presente estudio tiene como objetivo ofrecer un procedimiento estandarizado dentro de un SIG que permita calcular los volúmenes parciales y totales en intervalos cortos de tiempo de los sedimentos por deslizamientos, utilizando exclusivamente datos obtenidos mediante el empleo de un VANT equipado con RTK; esto contribuirá a la mitigación de riesgos y planificación territorial. Para ello se seleccionó como área de estudio el SE de la localidad de Santa María Nepopualco, en el municipio de Huejotzingo, en el estado de Puebla, México. La zona no cuenta con cartografía detallada y es afectada por flujos de escombros y deslizamientos de escombros generados a partir del sismo del 19 de septiembre del 2017 (magnitud 7.1), acentuados por el cambio de uso del suelo y lluvias. A diferencia de trabajos previos (Legorreta-Paulín et al., 2023; Sestras et al., 2025), la innovación de este método radica en dos aspectos: 1) el monitoreo de cambios volumétricos parciales mediante dos vuelos consecutivos sobre el mismo deslizamiento en periodos cortos, y 2) la estimación del volumen total mediante la reconstrucción por interpolación de la superficie pre-deslizamiento, sin requerir insumos LiDAR ni fuentes externas. Esta estrategia reduce costos, simplifica el flujo de trabajo y amplía la aplicabilidad en contextos con recursos limitados.

En el área de estudio, la mayor parte de los trabajos se centran en la historia eruptiva y los depósitos del volcán Iztaccíhuatl (García-Tenorio, 2008, Sánchez-García, 2018). También existe un atlas de riesgos naturales del municipio de Huejotzingo, en el cual se incluyen PRM que afectan las faldas de este volcán, con el problema de que no es detallado (SEDATU, 2016). En específico, en la cuenca del río Xopanac, se ha creado un inventario de deslizamientos y un mapa de zonificación de peligro de deslizamientos por unidad de relieve (Legorreta-Paulín et al., 2024).

Este inventario hace la representación de 362 deslizamientos existentes, mostrando que los deslizamientos superficiales son el tipo predominante (86,7%), seguidos de los deslizamientos profundos (incluyendo flujos de tierra) (13,3%).

## **Zona de estudio**

La zona de estudio es un deslizamiento de escombros activo que afecta el extremo SE de la localidad de Santa María Nepopualco dentro de la cuenca hidrográfica del río Xopanac, localizada en el flanco oriental del estratovolcán inactivo Iztaccíhuatl, en el estado de Puebla, México (Figura 1), y en la parte central de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Trans Mexicano (CVTM). El Iztaccíhuatl es la tercera elevación volcánica más alta de México (5230 m.s.n.m.). El volcán forma parte de la Sierra Nevada, que divide la cuenca hidrográfica de la Ciudad de México, al oeste, de la cuenca de Puebla-Tlaxcala, al este. El río Xopanac es un afluente del río Atoyac, que desemboca en el océano Pacífico.

La zona de estudio ocupa un área de ~0.6 km<sup>2</sup> dentro de las coordenadas 19°08'53.54"-19°09'06.56" N y 98°28'45.45"-98°28'51.97" W. La elevación del área de estudio varía de 2527.6 a 2389.8 m.s.n.m. Las laderas de fuerte pendiente y los valles profundamente disectados, con pendientes superiores a 89°, son propensos al desarrollo de deslizamientos. Los valles interiores presentan llanuras relativamente planas, y los interfluvios residuales no disectados, con las mismas características de los anteriores, muestran pendientes menores a 7°. El principal uso de suelo a lo largo de la cuenca es la agricultura de subsistencia con tracción animal, la cual ha introducido cambios significativos en la estabilidad de laderas.

La litología expuesta a lo largo de la cuenca hidrográfica de Xopanac consiste en un depósito basal de avalancha volcánica del Cuaternario con fragmentos de roca y clastos angulares de bloques soportados por una matriz de flujos de piedra pómez. Este depósito de avalancha está cubierto por secuencias de flujos piroclásticos, depósitos de caída, pequeños flujos de ceniza y capas de lahares (Figura 2) (Macías et al., 2012).

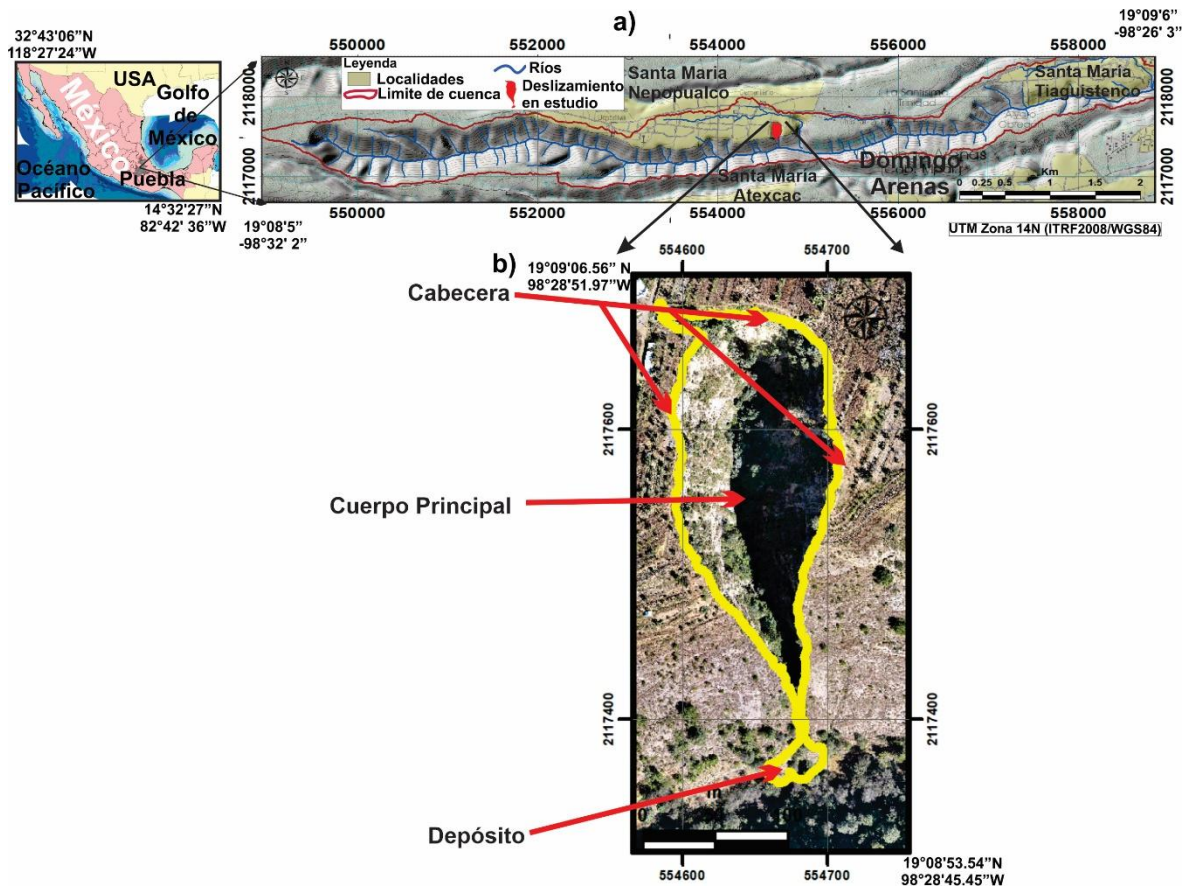


Figura 1. (a) Área de estudio correspondiente a la cuenca del río Xopanac, municipio de Huejotzingo, estado de Puebla, México. Fuente de datos: CONABIO. (b) Estructura del deslizamiento de estudio dentro de la cuenca.

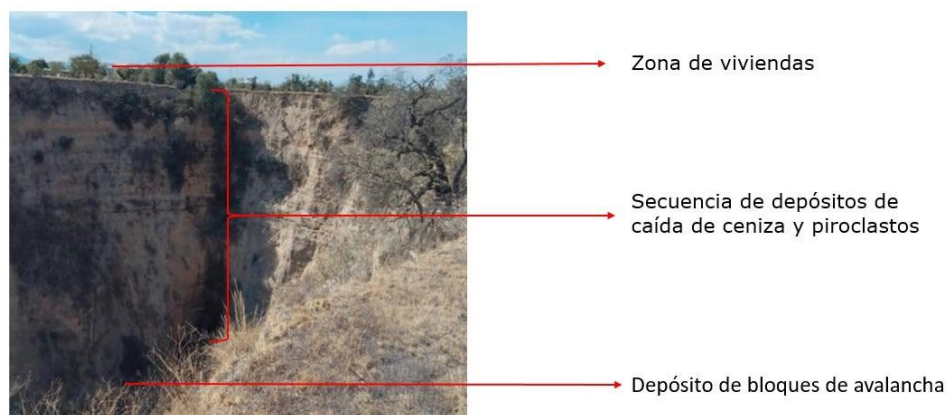


Figura 2. Fotografía tomada del deslizamiento de estudio en Santa María Nepopualco durante trabajo de campo en abril de 2024, que muestran la secuencia de depósitos piroclásticos.

El clima predominante en la región es el subtropical frío (Cwc) y subtropical templado subhúmedo (Cwb) (INEGI, 2008). La precipitación media anual de la zona es de ~1055 mm, y gran parte de esta cae durante las tormentas estacionales entre mayo y noviembre (Gobierno de México, 2024). De acuerdo con el resumen mensual de lluvia que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) junto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2024 la lluvia total mensual acumulada en la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio (Huejotzingo) fue de 1165.46 mm. Esto representa un incremento de 334.65 mm respecto al año anterior (830.81 mm). Lo anterior responde a la aparición de lluvias atípicas, tormentas tropicales, ciclones y huracanes (Figura 3). Así, por ejemplo, la tormenta tropical “Alberto”, y el huracán “John” provocaron mayores precipitaciones mensuales a mediados del 2024, los cuales a su vez ocasionaron deslaves y escorrentías de escombros (CONAGUA, 2024).

La importancia de considerar la precipitación radica en el decremento de la estabilidad del suelo ante las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento y cualquier PRM (Legorreta-Paulín et al., 2025). El volumen de agua infiltrada en los suelos aumenta la susceptibilidad al deslizamiento y, generalmente, el tiempo para evacuar a las personas cercanas al sitio y poner a salvo sus pertenencias es limitado. Por ello, la intensidad y duración de la lluvia está directamente relacionada en la posibilidad de que ocurra el deslizamiento, máxime cuando el suelo está poco consolidado y la pendiente de la ladera es pronunciada (Domínguez-Morales y De León-Escobedo, 2021).

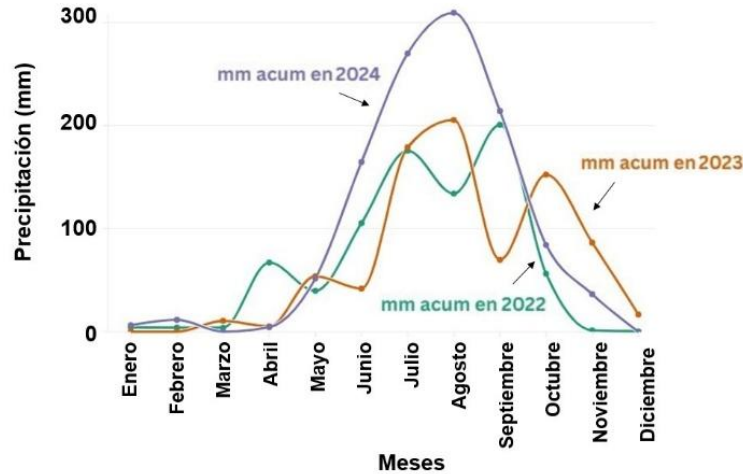


Figura 3. Precipitación total anual entre 2022 y 2024 en Huejotzingo, Puebla.  
Fuente de datos: CONAGUA.

Las condiciones que predisponen este sitio a la ocurrencia de deslizamientos incluyen las fuertes pendientes, la presencia de material volcanoclástico deleznable, la sismicidad de la región, las prácticas de agricultura de subsistencia, la deforestación y las elevadas precipitaciones. La interacción de estos factores deriva en volúmenes significativos de sedimentos removilizados asociados a DS y DAP, los cuales afectan directamente al sistema fluvial al provocar evacuaciones periódicas de material. Esta dinámica representa una situación de riesgo para más de siete mil personas que habitan y desarrollan actividades en torno al sistema fluvial (Tabla 1) (INEGI, 2020).

Tabla 1. Localidades situadas en Huejotzingo dentro de la cuenca del río Xopanac (Fuente de datos: INEGI, 2020).

Nombre de la localidad	Población
Santa María Nepopualco	3796
Santa María Tianguistenco	830
San Miguel Tianguizolco	2618
Álvaro Obregón	421
<b>Total</b>	<b>7665</b>

En 2018, durante un proyecto financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), se realizaron levantamientos topográficos y muestreos de suelo en una barranca de más de 50 m de profundidad ubicada en Santa María Nepopualco, donde previamente se habían registrado derrumbes. Este proyecto tuvo como propósito generar indicadores que permitieran priorizar la atención de diversas laderas críticas, integrando la variabilidad de las propiedades del suelo y las características de la lluvia en un enfoque probabilístico. A través del cálculo de la probabilidad de falla y de la estimación del impacto potencial de una eventual inestabilidad, el estudio buscó establecer criterios objetivos para la toma de decisiones en la gestión del riesgo (De León-Escobedo, 2018).

A pesar de estos avances, en la zona aún no se han realizado estudios sistemáticos de cálculo de volúmenes de material removilizado, y tampoco se cuenta con un Modelo Digital de Elevación (MDE) de alta resolución. El único disponible es el proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) —con una resolución de 15 m y correspondiente al año 2013—, el cual resulta insuficiente para identificar deslizamientos pequeños debido a su limitada capacidad de detalle.

## **Metodología**

Para la obtención del MDE y la cartografía de procesos gravitacionales en el área de estudio, la metodología comprende cinco etapas (Fig. 4).

Etapa 1: Proceso para la selección del área de estudio. Se seleccionó un deslizamiento activo ubicado en la localidad de Santa María Nepopualco por ser representativo y contar con escenarios idóneos para estudiar los volúmenes de deslizamientos en una subcuenca ubicada en terrenos volcánicos que, al mantener condiciones antrópicas (cambio de uso del suelo) y físicas (pendientes abruptas, material volcanoclástico deleznable, precipitaciones abundantes, etc.), facilitan los PRM. El trabajo de campo se llevó a cabo a lo largo del cauce principal y se seleccionó un deslizamiento de escombros del inventario creado de la cuenca (Legorreta-Paulín et al., 2024). El deslizamiento cubre un área importante, y debido a su cercanía a la población de Santa María Nepopualco tiene el potencial para afectarla. Una vez seleccionado, mediante uso del software ArcMap versión 10.7 se

creó un polígono del deslizamiento, al cual se le asignó en su tabla de atributos un código único de identificación (ID), ubicación geográfica, tipo de deslizamientos, actividad, tipo de suelo, pendiente del terreno y mecanismos que los ocasionan, lo anterior de acuerdo a los criterios de la División de Prácticas Forestales del Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington (Forest Practices Division, WSDNR, 2006). Sobre el deslizamiento se realizaron dos vuelos fotogramétricos. El primero se llevó a cabo el 6 de abril de 2024 y el segundo el 4 de diciembre del mismo año, esto con la finalidad de verificar los rasgos del terreno y del propio deslizamiento, para establecer así un análisis multitemporal de volúmenes.

Etapa 2: Selección de instrumentos. Para ambos vuelos, el VANT utilizado fue un DJI Mavic 3E con posicionamiento cinemático en tiempo real (en inglés *Real Time Kinematic*, RTK), acompañado de una estación D-RTK2, lo que garantizó una precisión horizontal y vertical de  $\pm 0.1$  m durante el vuelo, sin requerir puntos de control terrestres (en inglés *Ground Control Points*, GCP) adicionales. Este sistema permitió fijar coordenadas (latitud, longitud y elevación) de manera muy precisa, brindando así una conexión estable durante el levantamiento. El VANT cuenta con una cámara con sensor CMOS 4/3 de 20 megapíxeles, un zoom híbrido de hasta 56x, módulo RTK para precisión centimétrica y posee una duración de vuelo de hasta 45 minutos, tiempo en el cual puede cartografiar aproximadamente 2 km<sup>2</sup> (DJI, 2024, 2025a).

Etapa 3: Planeación del vuelo y captura de datos. Se realizó con el programa DJI Fly, el cual permite guiar al VANT, capturar, editar y compartir imágenes (DJI, 2025b). Se realizaron dos vuelos de captura de datos, con duración cada uno aproximadamente de 35 minutos; tiempo en el cual se adquirieron 1229 y 1225 imágenes aéreas para los meses de abril y diciembre respectivamente. La altura promedio de los vuelos fue de aproximadamente 111.7 m, a una velocidad de 15 m/s. lo que permitió capturar imágenes con un tamaño de celda proyectado en superficie de 3 cm. La superposición frontal y lateral entre las fotografías aéreas fue del 80 % y su ángulo de rumbo de 270°.

Etapa 4: Post-procesamiento. Con la finalidad de generar el MDE correspondiente a cada fecha, las imágenes obtenidas fueron trabajadas en el software Agisoft Metashape, versión 2.2.0. Para ello se siguieron los siguientes pasos: 1) Alineación: El programa rastrea puntos característicos en las imágenes, ubica la posición de la cámara para cada una y refina los parámetros de calibración. 2) Construcción de nube de puntos densa: La nube de puntos densa es un conjunto de puntos de elevaciones generado a partir de las posiciones estimadas de la cámara. Ambos procesos se realizaron con calidad media para permitir la eficiencia en el cálculo, y obtener la calidad suficiente requerida en los resultados. En el vuelo de abril se obtuvo una densidad promedio de 8.5 puntos/m<sup>2</sup>, mientras que en el vuelo de diciembre la densidad fue de 7.99 puntos/m<sup>2</sup>. 3) Creación del MDS y del MDE (Fig. 5). A partir de la nube de puntos densa, se construyó el MDS con una proyección UTM zona 14N y datum ITRF2008. El MDS es la representación tridimensional de la superficie terrestre que engloba tanto la topografía del terreno como los elementos que se encuentran sobre ella, tales como vegetación, cultivos, copas de árboles, viviendas y otros elementos. Este modelo se generó automáticamente a partir de la nube de puntos densa, que contiene puntos inicialmente en una categoría denominada “sin clasificar” (Ouédraogo et al., 2014; PhotoScan, 2018; ASPRS, 2019; Roncancio, 2021). El modelo se genera automáticamente tanto con la superficie del terreno como de otros elementos no deseados como los ya mencionados, por lo anterior se requirió hacer un filtrado de elementos a través de la combinación de procedimientos automáticos y semiautomáticos en Metashape (ASPRS, 2019). Para obtener el MDE, se aplicó un proceso de clasificación automática y manual en Agisoft Metashape, utilizando únicamente los valores del terreno (Dong y Chen, 2017; Arenas-Medina, 2024).

Para la clasificación automática se utilizaron los siguientes parámetros predefinidos para separar puntos de la topografía del terreno de otros elementos no deseados: 1) el ángulo máximo de inclinación (15°) para identificar y excluir elementos verticales o inclinados que no cumplen con la geometría esperada del terreno, 2) la distancia máxima entre puntos (1 m) para definir la variación máxima permitida en la elevación del terreno en un área determinada, 3) el tamaño de celda (5 m) que

fue determinado en función del área más grande sin puntos de terreno, y 4) el radio de erosión (0 m) para definir el tamaño del área local de búsqueda alrededor de cada punto que el algoritmo considera al decidir si pertenece al terreno (Anderson y Gaston, 2013; Dubbini et al., 2016; Escobar-Villanueva et al., 2017). Posteriormente sobre la clasificación resultante, se realizó una revisión manual para corregir errores en áreas de vegetación densa o construcciones, empleando polígonos de selección y análisis visual por color y elevación. Se utilizaron ocho clases predefinidas en Agisoft Metashape: creado/nunca clasificado, sin clasificar, suelo (topografía del terreno), vegetación baja, vegetación media, vegetación alta, construcciones y puntos bajos. Una vez realizada la clasificación, se recalcularon los modelos conservando únicamente las clases de “suelo” y “puntos bajos”, así el software rellena los huecos dejados por la eliminación y arroja el MDE. Posteriormente este último y la ortofoto fueron exportados en formato geo-TIFF con un tamaño de celda de 3 cm. (Dong y Chen, 2017; Arenas-Medina, 2024).

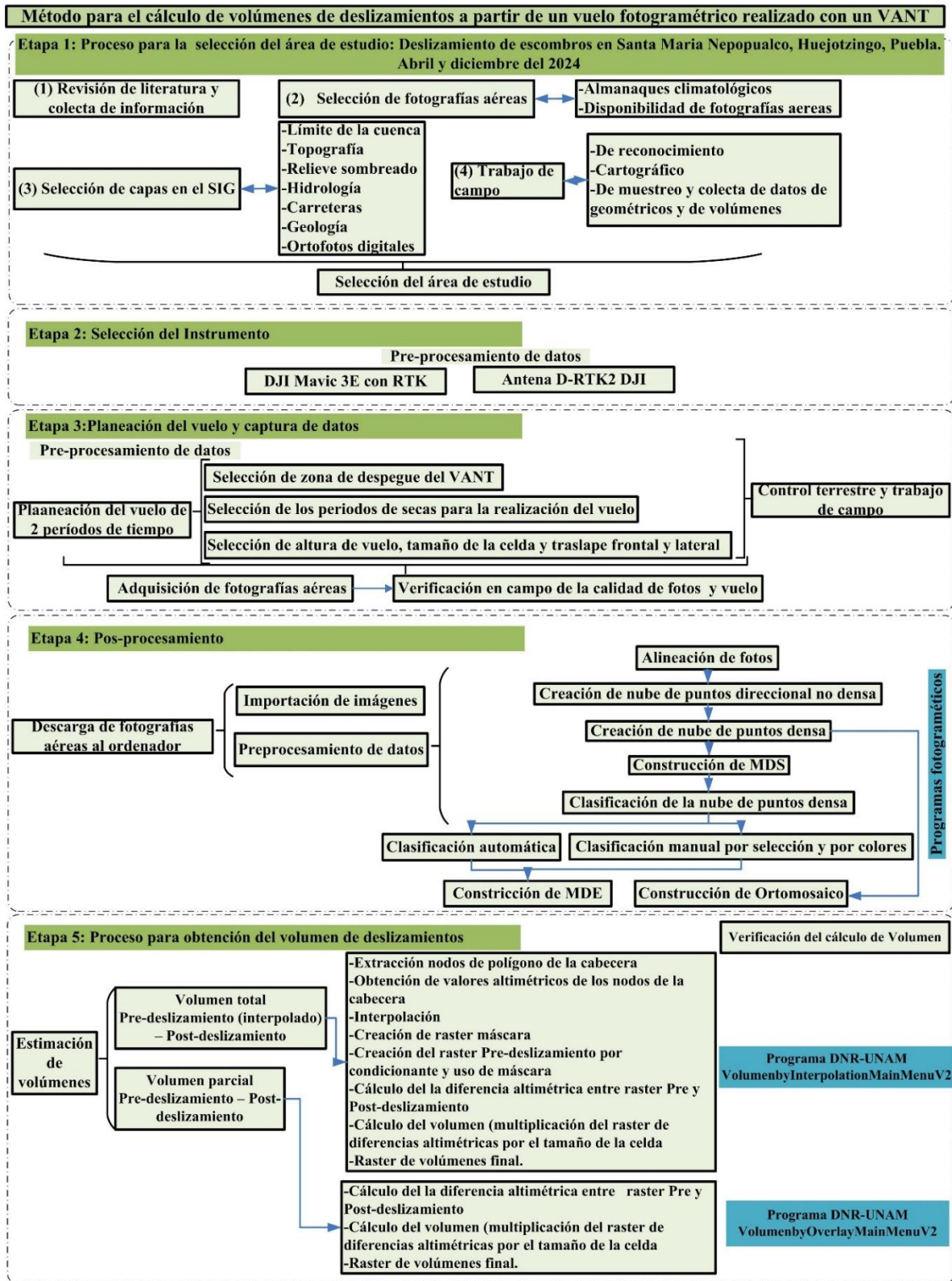


Figura 4. Flujo de trabajo para la obtención, procesamiento de fotografías obtenidas con un VANT y cálculo de volúmenes.

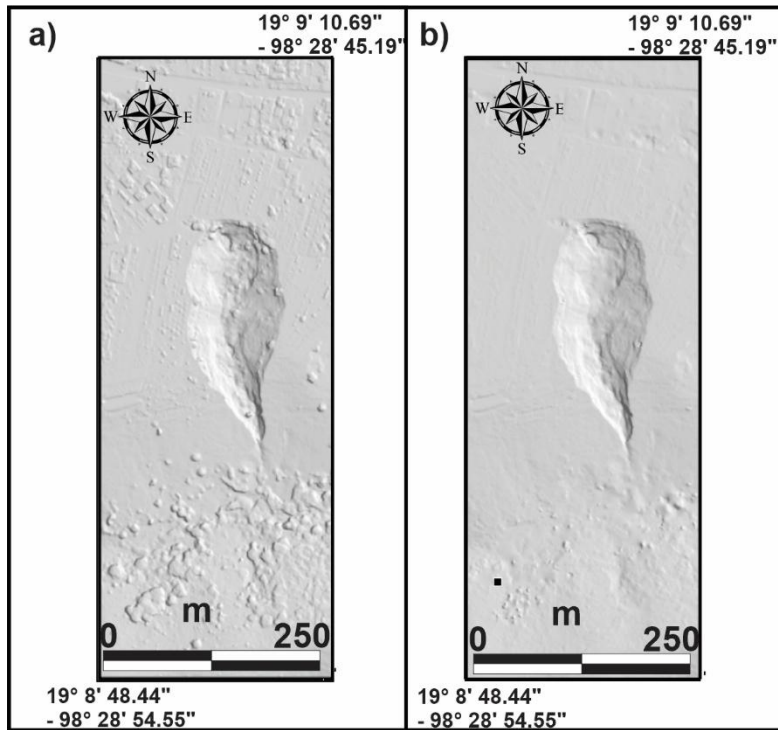


Figura 5. a) MDS. b) MDE.

Etapa 5. Proceso para obtención del volumen de deslizamientos. En el software ArcMap versión 10.7, a partir de la ortofoto de los vuelos generados en Agisoft y los productos derivados del MDE como el sombreado, se digitalizaron dos polígonos que envolvieron los límites del deslizamiento en abril y diciembre, a los cuales se les asignó una proyección UTM zona 14N y datum ITRF2008. Lo anterior permitió detectar cambios en la geometría del deslizamiento.

Posteriormente, se realizaron dos cálculos de volúmenes: el primero que aquí llamamos modelo1, consistió en el volumen total entre la topografía correspondiente a diciembre del 2024 y una superficie teórica pre-deslizamiento, obtenida mediante interpolación. El segundo cálculo, que aquí llamamos modelo2, fue el volumen parcial entre el mes de abril y diciembre.

En el modelo1, el procedimiento para estimar el volumen pre y post-deslizamiento consistió en primer lugar en utilizar el límite externo del deslizamiento, digitalizándolo como polígono vectorial, para recortar el MDE al tamaño del deslizamiento. De esta manera los procesos de cálculo no se ven ralentizados por

la extensión del ráster. Posteriormente, se emplearon los nodos que conforman el polígono del deslizamiento, a los cuales se les asignaron sus valores altimétricos mediante la herramienta Extract de ArcMap. Con estos valores altimétricos, se realizó una interpolación para reconstruir la superficie previa al evento dentro del área afectada, utilizando el método de ponderación de distancia inversa (en inglés *Inverse Distance Weighted*, IDW), elegido tras una comparación preliminar con los interpoladores Kriging y Topo to Raster (ANUDEM) disponibles de igual forma en ArcMap. IDW generó una superficie homogénea muy similar al obtenido con Kriging con patrones de drenaje internos menos exagerados que con los obtenidos con ANUDEM. Además, las diferencias en el volumen calculado entre los métodos fueron mínimas (Fig. 6).

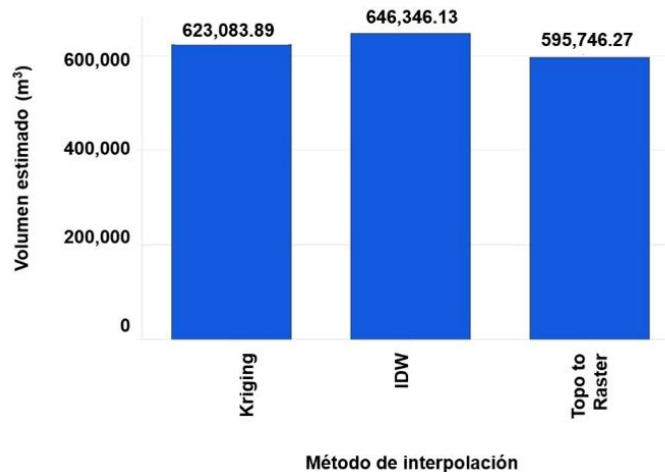


Figura 4. Comparación del volumen obtenido por tres métodos de interpolación.

El polígono también sirvió para crear un ráster como máscara. Este ráster contenía valores de 1 para el área del deslizamiento y valores nulos para el área externa al deslizamiento. La máscara permitió filtrar los píxeles basados en una condición y así generar el ráster pre-deslizamiento. La condición consistió en que el área externa al deslizamiento tomara los valores altimétricos del MDE post-deslizamiento de diciembre (Fig. 7a); en el caso contrario, la condición asignó los valores interpolados al interior de la zona del deslizamiento. El resultado fue un MDE donde la zona de afectación del deslizamiento está rellena con valores interpolados y el

área externa al deslizamiento mantiene los valores altimétricos del MDE de diciembre (Fig. 7b).

Para determinar la diferencia altimétrica entre este mapa y el MDE de diciembre, se restó el segundo del primero, y se obtuvo un ráster de diferencias altimétricas (Fig. 7c) y su volumen (Fig. 7d) se obtuvo multiplicándolo por el área de la celda (0.0009 m<sup>2</sup>).

Para el modelo2 se utilizaron los rústeres de abril y diciembre de 2024. La diferencia altimétrica se calculó mediante la resta del ráster de diciembre (Fig. 8a) respecto al de abril (Fig. 8b), obteniendo el mapa de cambios altitudinales (Fig. 8c). Posteriormente, este mapa se multiplicó por el área de celda para derivar el volumen resultante (Fig. 8d).

Para ambos modelos no se aplicaron umbrales de ruido ni filtros en los mapas de diferencias altimétricas. El cálculo de volúmenes se realizó directamente sobre los MDE generados a partir de la nube de puntos clasificada, sin emplear procesos de suavizado ni herramientas, que rellenan huecos o eliminan irregularidades. Esto se llevó a cabo para conservar la altimetría original y evitar la introducción de artefactos ficticios que pudieran alterar la estimación real del volumen.

Para verificar los resultados en ambos casos, se aplicaron dos herramientas en ArcMap que buscan estimar el material que aportan los deslizamientos superficiales y profundos a los arroyos y cuencas. Estas herramientas fueron desarrolladas a partir de un proyecto de investigación entre el Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington, el Servicio Geológico de Washington y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Geografía, 2025).

La herramienta requiere los MDE que muestren la topografía pre y post-deslizamiento y el polígono de la forma de este. Para estimar los volúmenes, la tabla de atributos del inventario de deslizamiento debe poseer dos campos, ambos de tipo entero corto.

- a) El primer campo es el número de identificación único del deslizamiento.

- b) El segundo campo es el número de identificación de las partes del deslizamiento: 1 para la cabecera, 2 para el cuerpo principal y 3 para el depósito.

La primera herramienta, *VolumebyInterpolationMainMenuV2*, selecciona el polígono del deslizamiento y extrae los nodos que lo conforman, los cuales posteriormente son transformados en puntos que se usan para asignar los valores altimétricos del límite de la superficie inicial interpolada por el método IDW, a fin de rellenar el hueco del MDE. El modelo superpone la superficie pre y post-deslizamiento para obtener las diferencias de elevación, que se multiplican por el área del píxel para obtener el volumen potencial del deslizamiento y su correspondiente distribución (Instituto de Geografía, 2025), el cual se asigna en el inventario, así como el volumen acumulado y perdido, que posee valores negativos y positivos respectivamente. Las unidades para el volumen de deslizamiento estimado se expresan en metros cúbicos.

La segunda herramienta, *VolumebyOverlayMainMenuV2*, calcula los volúmenes de deslizamiento, restando de la superficie actual la superficie pre-deslizamiento, misma que se estima a partir del MDE, para posteriormente multiplicarlo por el área del píxel. De igual manera, el volumen arrojado se asigna al inventario con valores positivos representando pérdida, y negativos señalando acumulación de material. Ambos modelos aplican para deslizamientos superficiales (escarpes) y profundos (escarpes y/o depósitos) (Instituto de Geografía, 2025).

## **Resultados**

A partir del inventario de deslizamientos (Legorreta-Paulín et al., 2024) y del trabajo de campo realizado en un área de aproximadamente 0.6 km<sup>2</sup> donde se localiza el deslizamiento de estudio, se identificaron tres tipos de procesos de remoción en masa presentes en la zona: deslizamientos superficiales someros, flujos de escombros y deslizamientos de escombros (Tabla 2). En términos de recurrencia, los flujos de escombros constituyen el tipo más frecuente, con 17 eventos registrados, mientras que los deslizamientos superficiales someros y los deslizamientos de escombros presentan 13 y 7 casos, respectivamente. No

obstante, el mayor aporte en el área afectada corresponde a los deslizamientos de escombros, que en conjunto abarcan 58,577.57 m<sup>2</sup>. Entre estos, se seleccionó uno debido a su cercanía inmediata a la localidad de Santa María Nepopualco y a su dimensión. Este deslizamiento cubre un área de 21,442.99 m<sup>2</sup>, y su cabecera activa se encuentra situada a menos de 20 m de las primeras construcciones de la localidad de Santa María Nepopualco.

Tabla 2. Procesos de remoción que afectan al área de estudio a partir del inventario de deslizamientos.

<b>Tipo de proceso</b>	<b>Número de deslizamientos</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Deslizamiento superficial somero</b>	13	1917.99
<b>Flujo de escombros</b>	17	6827.50
<b>Deslizamiento de escombros</b>	7	58577.57

El mapa de diferencia altimétrica (Fig. 7c), correspondiente al modelo1, permite observar que la acumulación de materiales se da en celdas cuyos valores oscilan entre -5.97 m y cercanas a 0 m; y que las zonas de pérdida de volúmenes se observan en celdas con valores positivos de hasta 71.88 m en diferencia altimétrica. Este modelo muestra que el volumen total neto de materiales es de 646,346.13 m<sup>3</sup>, de los cuales 646,794.87 m<sup>3</sup> representan pérdida de materiales que afectó un área de 20,782.79 m<sup>2</sup> y una acumulación de tan solo 448.74 m<sup>3</sup> en un área de 660.20 m<sup>2</sup> (Tabla 3). El mapa de volúmenes (Fig. 7d), indica que todas las celdas en color verde con rangos entre -0.004 a 0 m<sup>3</sup> sumadas dan el volumen total de acumulación y la suma de todas las celdas en color rojo con rangos de 0.01 a 0.06 m<sup>3</sup> representan la pérdida.

De la misma manera, el mapa de diferencia altimétrica correspondiente al modelo2 (Fig. 8c y Tabla 3), muestra con valores negativos aquellas celdas que tuvieron acumulación de material y con valores positivos celdas con pérdida de material.

En un periodo de ocho meses, hubo un volumen total de  $43,799.08 \text{ m}^3$ , con una pérdida de volumen parcial de  $57,196.13 \text{ m}^3$  (suma de celdas rojas) que abarcan un área de  $16,047.23 \text{ m}^2$  dentro del deslizamiento y una acumulación de  $13,397.05 \text{ m}^3$  (suma de celdas verdes) que afectan un área de  $5,395.76 \text{ m}^2$ . La suma de todas las celdas en color verde con rangos entre  $-0.019$  a  $0 \text{ m}^3$ , dan el volumen total de acumulación; y la suma de todas las celdas en color rojo con rangos de  $0.001$  a  $0.026 \text{ m}^3$ , representan la pérdida (Fig. 8d).

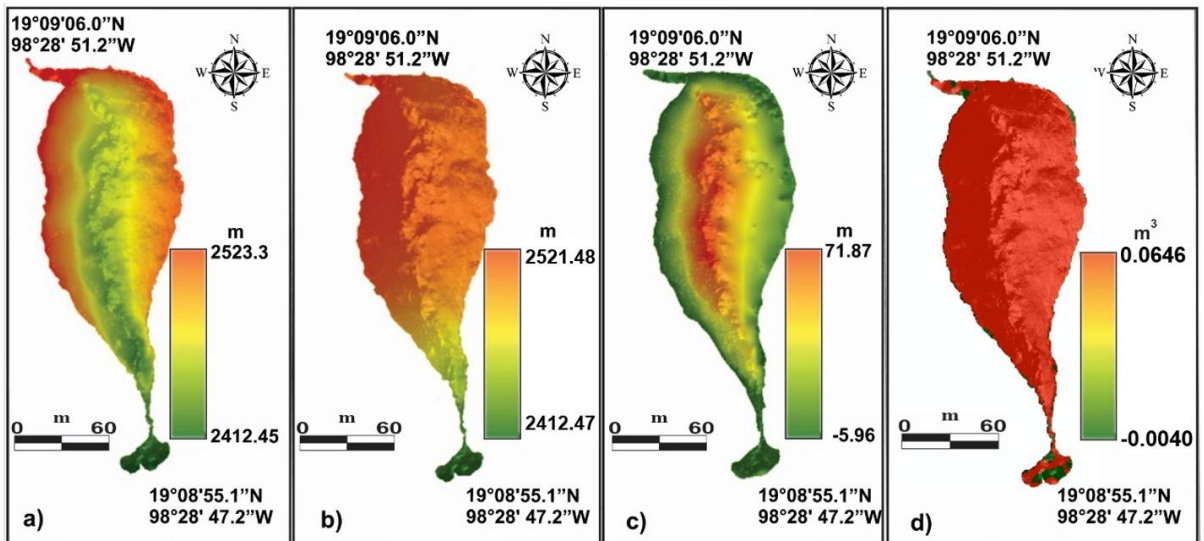


Figura 7. a) Modelo digital de elevación correspondiente al mes de diciembre de 2024. b) Modelo digital de elevación correspondiente a la superficie teórica pre-deslizamiento. c) Mapa de diferencia altimétrica, clasificada con base en la distribución de sus valores dentro del histograma. d) Mapa de volumen total acumulado y perdido.

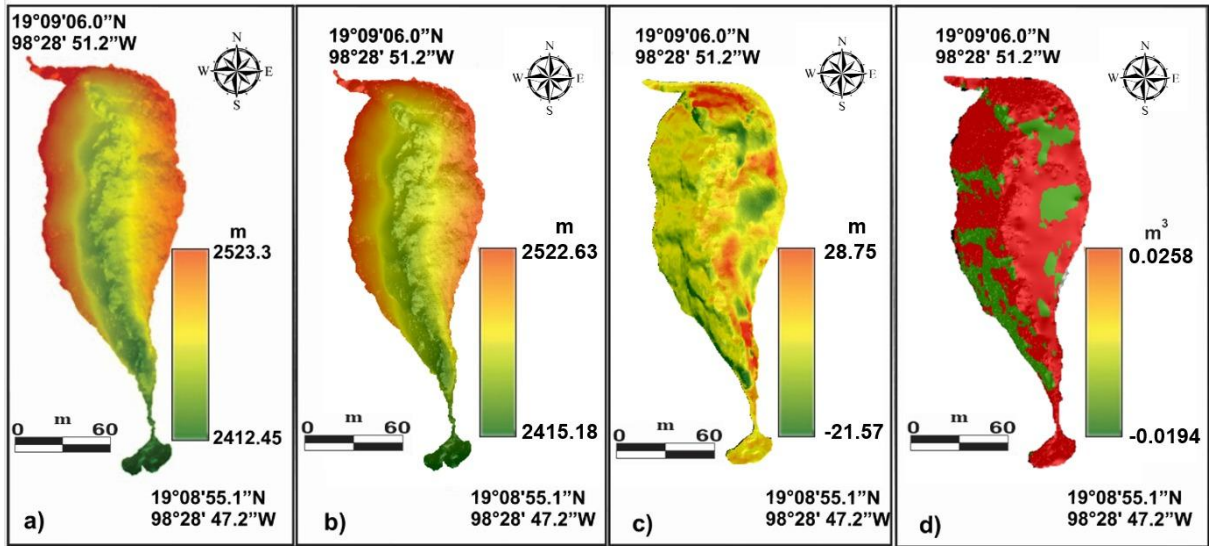


Figura 8. (a) Modelo digital de elevación correspondiente al mes de diciembre de 2024. (b) Modelo digital de elevación correspondiente al mes de abril de 2024. (c) Mapa de diferencia altimétrica. (d) Mapa de volumen total acumulado y perdido.

Tabla 3. Comparación de métricas de precisión y volumen entre modelos.

MDE/Métricas de precisión	Área(m <sup>2</sup> )	Volumen(m <sup>3</sup> )		
		Acumulado	Perdido	Total
Modelo1	21,442.99	448.74	646,794.87	646,346.13
Modelo2		13,397.05	57,196.13	43,799.08

## Discusión y conclusiones

En el área de estudio, los tres tipos de deslizamientos identificados mediante el inventario y el trabajo de campo —deslizamientos superficiales someros, flujos de escombros y deslizamientos de escombros— muestran comportamientos y alcances distintos en términos de su contribución al riesgo local. Aunque los flujos de escombros son el tipo más frecuente, los deslizamientos de escombros son los que abarcan las mayores superficies afectadas (Tabla 2), lo que incrementa su relevancia desde la perspectiva del impacto potencial. Esta diferencia entre recurrencia y extensión es especialmente significativa para la gestión del riesgo, ya que sustentó la selección de un deslizamiento de escombros como caso de estudio, el cual resulta particularmente relevante por su proximidad a la localidad de Santa María Nepopualco, su tamaño y la actividad que presenta en relación con las lluvias

y la intervención antrópica. Su superficie total asciende a 21,442.99 m<sup>2</sup> y su cabecera activa se localiza a menos de 20 m de las primeras viviendas, lo cual subraya la necesidad de un análisis detallado y de acciones orientadas a su monitoreo y mitigación. El área de afectación y la distribución de los deslizamientos sugieren que estos PRM surgen como consecuencia de la combinación de lluvias intensas y cambios en la cobertura y el uso de suelo, más que a la geología, pues el trabajo de campo mostró una geología homogénea en el área de estudio. Los habitantes de Santa María Nepopualco informaron que algunos deslizamientos se desencadenaron durante el terremoto de 2017, y que aumentaron en tamaño por la lluvia y el desbordamiento de las tuberías de aguas residuales de las casas.

En el área que abarca la cuenca, la agricultura es el uso predominante del suelo (49.21%), seguido del bosque de coníferas y caducifolio (35.92%), matorrales y pastizales (8.32%) y los asentamientos humanos y las vías de comunicación (6.55%) (Fig. 9) (CONABIO, 2020). Esta distribución del uso de suelo ayuda a explicar la localización de los PRM: más del 65% se concentran en la margen izquierda del río, donde la intensidad de la actividad humana —infraestructura, tala, desmonte y expansión de parcelas— ha reducido la cobertura vegetal y, con ello, la capacidad de interceptación e infiltración, factores que favorecen el desencadenamiento de procesos gravitacionales. En contraste, la margen derecha, con mayor presencia de bosque y matorral, muestra una menor intervención y, por consiguiente, una menor concentración de inestabilidad. A nivel de proceso, la coexistencia de flujos de escombros y deslizamientos —con predominio numérico de los primeros, pero mayor área afectada de los segundos— sugiere una dinámica en la cual las perturbaciones antrópicas locales (p. ej., surcos trazados a favor de la pendiente y descarga de aguas residuales hacia escarpes) actúan como disparadores eficaces tras eventos de lluvia, facilitando la movilización y encauzamiento de materiales sueltos en laderas ya condicionadas por fuertes pendientes y materiales deleznable. Por tanto, la gestión del riesgo no debería basarse únicamente en la frecuencia de los procesos, sino en su magnitud y en el grado de exposición, orientando medidas específicas como la corrección de la

labranza en ladera, el control de escorrentía y aguas residuales, y la conservación o recuperación de la cobertura vegetal en la margen izquierda.

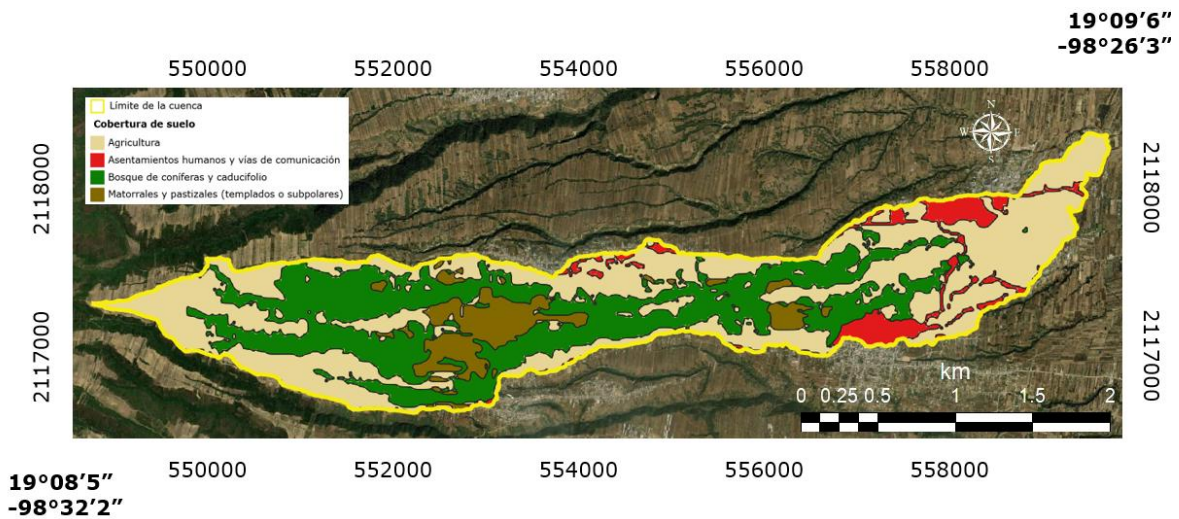


Figura 9. (a) Mapa de cobertura de suelo en la cuenca del río Xopanac, municipio de Huejotzingo, estado de Puebla, México. Fuente de datos: CONABIO.

En este trabajo se propone una metodología sistematizada para la evaluación de volúmenes de deslizamientos utilizando la sobreposición de MDE obtenidos mediante el uso de VANT y SIG. El método calcula el volumen del deslizamiento a partir de la resta de los MDE de alta resolución pre y post-deslizamiento, considerando dos escenarios para obtener el volumen: 1) donde el usuario no cuenta con un MDE inicial pre-deslizamiento para compararlo con el post-deslizamiento, llamado modelo1, y 2) donde el usuario cuenta con un MDE inicial pre-deslizamiento y final post-deslizamiento, llamado modelo2. Ambos modelos se implementaron manualmente y sus resultados fueron avalados por medio de programas existentes desarrollados para estimar volúmenes.

El modelo1 puede ayudar a evaluar la secuencia de la actividad de deslizamientos al imitar aproximadamente la probable forma topográfica general en áreas donde se desconoce la previa al deslizamiento. La ventaja de la interpolación usada es que brinda una idea general de la topografía sin afectación por el deslizamiento. Sin embargo, para realizarla, no se contó con remanentes internos originales y, por consiguiente, el interpolador sólo consideró los bordes del deslizamiento de diciembre para generar la topografía interna, incrementando con ello la

incertidumbre del volumen calculado. El procedimiento manual empleó la interpolación IDW a fin de comparar los resultados con el modelo desarrollado por la División de Prácticas Forestales (Forest Practices Division, WSDNR, 2006).

Los modelos obtenidos del software Agisoft Metashape pudieron ser utilizados porque contaban con una buena georreferencia gracias a que el vuelo fotogramétrico se llevó a cabo con un dron con RTK y una estación base, minimizando así los errores en X, Y y Z, con ello se evitó un posible desfase entre celdas al realizar la sobreposición de MDE de distinta fecha. La clasificación y depuración semi-manual y automatizada de puntos correspondientes a vegetación, cultivos, construcciones y pastizales, entre otros, permitió llevar a cabo el análisis de forma adecuada para distinguir la topografía del terreno.

El deslizamiento muestra una actividad dinámica al perder material en las zonas del escarpe y del cuerpo principal NE, centro-este y SE, mientras que las porciones oeste del deslizamiento tendieron a acumular material. Tanto para las diferencias altimétricas como para los volúmenes, los valores negativos representan acumulación, y los positivos representan pérdida. El significado de estos valores se puede alternar según la preferencia del investigador restando la superficie pre de la post-deslizamiento. En este caso se prefirió restar la superficie post de la pre-deslizamiento ya que se asumió una superficie intacta (MDE del mes de abril), sin sufrir más pérdida de material por deslizamientos y cuya topografía y volumen se modificó posteriormente (MDE del mes de diciembre).

Otros métodos de interpolación como ANUDEM o Kriging, disponibles en el software ArcMap podrían resultar igual de efectivos; sin embargo, el primero arrojó un llenado con imperfecciones como pequeños huecos y rayones en la superficie (Fig. 10a), lo mismo ocurrió con Kriging, con mayor o menor cantidad de deficiencias (Fig. 10b). Al llevar a cabo la interpolación con IDW, el resultado mostró un relleno más favorable, resaltando la zona de evacuación del material desprendido. Estas discrepancias podrían provocar una predicción excesiva o insuficiente del volumen, dependiendo de la magnitud del deslizamiento. La comparación cuantitativa mostró que, respecto a Kriging, las diferencias en el volumen calculado son de 3.6% y de

18.4% al usar IDW y ANUDEM respectivamente. Estas variaciones indican que, aunque Kriging ofrece resultados cercanos, ANUDEM introduce una discrepancia significativa que podría afectar la interpretación morfológica. En consecuencia, la elección del interpolador dependerá de la experiencia del investigador y del conocimiento que tiene sobre la zona de estudio, ya que estos factores son determinantes para garantizar una reconstrucción coherente de la superficie previa al deslizamiento.

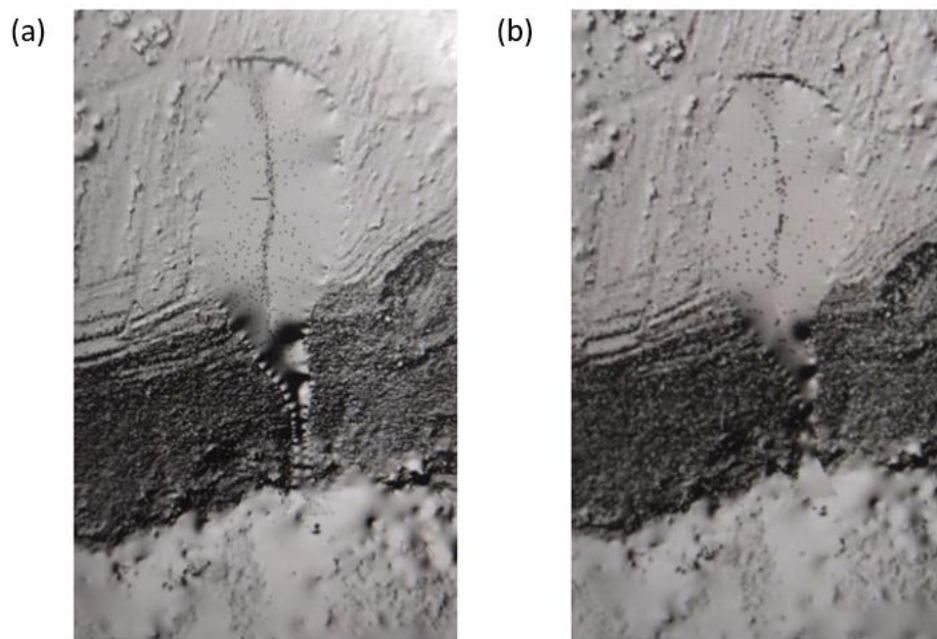


Figura 10. (a) Llenado del deslizamiento con el método Topo to Raster. (b) Llenado del deslizamiento con el método Kriging.

El modelo2 proporciona una buena aproximación al volumen, la distribución y la dinámica de deslizamientos superficiales y profundos en un área, permitiendo evaluar cambios a corto plazo, dentro y fuera del deslizamiento. El llevar a cabo un vuelo fotogramétrico en abril y otro en diciembre, tuvo como ventaja observar y estimar cómo en un periodo de tiempo relativamente corto, las lluvias tienen impacto en el desprendimiento de material. Sin embargo, los resultados deben interpretarse con cautela, pues el tipo de interpolación afectará los resultados e introducirá artefactos que podrían confundir la interpretación del volumen. El modelo1 utiliza el interpolador IDW para reconstruir la paleotopografía y utiliza únicamente la

información altimétrica del perímetro del deslizamiento. No considera los relictos topográficos internos ni la topografía contigua que puedan existir, cuya consideración podría mejorar la representación. La consideración de relictos internos requiere un trabajo más específico y detallado, que está fuera del alcance de este estudio.

Los resultados volumétricos obtenidos muestran una pérdida neta de aproximadamente 43,799.08 m<sup>3</sup> en un periodo de ocho meses, aunque los vuelos fotogramétricos se realizaron en meses secos, donde la acumulación de lluvia no fue significativa (en abril apenas se rebasaron los 4 mm y en diciembre fue nula), la precipitación acumulada en 2024 fue mayor que la del 2023 (133 mm más). Durante julio y agosto se registraron acumulaciones superiores a 300 mm en un solo mes, las cuales estuvieron asociadas a tormentas tropicales como “Alberto” y huracanes como “John” que, si bien, tuvo mayor impacto en la costa del Océano Pacífico, las lluvias torrenciales también se extendieron a la zona de estudio (CONAGUA, 2024), lo que sugiere que posiblemente la mayor pérdida de materiales ocurrió en ese periodo. Estas precipitaciones probablemente favorecieron la saturación del material volcanoclástico, incrementando la inestabilidad y el desplazamiento de sedimentos. Además, durante el trabajo de campo se identificaron prácticas inadecuadas de uso y manejo del suelo que contribuyen a la inestabilidad del terreno. La combinación de estos factores climáticos y antrópicos podría explicar la magnitud del retroceso y la redistribución del volumen observada en el deslizamiento.

Dado que la estimación volumétrica depende directamente de la calidad del MDE, es importante considerar los factores que influyen en su precisión: tamaño de la celda, la limpieza de los datos de la superficie del terreno y la correcta referencia espacial. El emplear un MDE generado a partir de VANT con RTK, permitió mayor detalle y precisión en la obtención del volumen. Un MDE con baja resolución como LiDAR a 1 o 5 metros o los Modelos Continuos de Elevación (MCE) de 30 m de INEGI no habrían sido adecuados para el estudio, pues el deslizamiento seleccionado perdería detalle y si se estudiaran deslizamientos superficiales

pequeños, por su tamaño, ya no tendrían representación cartográfica al ocupar 1 o 2 celdas, imposibilitando su visualización y, por consiguiente, una comparación de los MDE.

En cuanto a la calidad de los datos fotogramétricos, las densidades obtenidas en ambos vuelos para las nubes de puntos fueron de 8.5 puntos/m<sup>2</sup> en abril y 7.99 puntos/m<sup>2</sup> en diciembre, valores adecuados para la generación de MDE de alta resolución en estudios geomorfológicos (Ouédraogo et al., 2014). Los vuelos se realizaron sin el uso de GCP, por lo que la precisión del modelo generado, según el reporte de Agisoft, presenta errores horizontales y verticales en el rango de 8–10 cm. Este intervalo coincide con las especificaciones del fabricante DJI para operaciones con RTK sin GCP (DJI, 2024, 2025a). Aunque esta limitación introduce incertidumbre en el cálculo de volúmenes, se considera aceptable en este estudio debido a las características del área analizada, donde la topografía accidentada dificulta el acceso para la recolección de puntos mediante GPS diferencial. La implementación de GCP en estas condiciones implicaría un incremento significativo en tiempo y recursos, lo que resulta poco práctico para evaluaciones rápidas orientadas a la planeación de susceptibilidad y riesgo y cálculo de volúmenes por deslizamientos (Galve et al., 2025). Adicionalmente, se realizó una clasificación y depuración semi-manual y automatizada de puntos correspondientes a vegetación, cultivos, construcciones y pastizales, entre otros, lo que permitió llevar a cabo el análisis de forma adecuada para distinguir la topografía del terreno.

El método propuesto, basado en vuelos con VANT con RTK y procesamiento fotogramétrico en Agisoft Metashape, demostró ser una herramienta eficiente para estimar volúmenes de deslizamientos mediante dos enfoques: interpolación (Modelo1) y superposición (Modelo2). Ambos modelos son replicables en otras zonas con relieve abrupto o llano, lo que amplía su aplicabilidad a estudios de erosión, minería, procesos volcánicos, fluviales y planificación territorial. Sin embargo, la precisión final está condicionada por factores como el tamaño del píxel, la calidad y limpieza de la nube de puntos para generar los MDE, y la integración de información auxiliar. A pesar de estas limitaciones, la metodología ofrece una base

sólida para realizar estudios reproducibles en México y en regiones con características similares, contribuyendo a la gestión de riesgos y al análisis de la dinámica de procesos naturales y antrópicos. A partir de la presente investigación se espera definir una ruta de trabajo sólida para futuros proyectos referentes al cálculo de volúmenes de deslizamientos a partir de un MDE creado con fotografías tomadas en un vuelo fotogramétrico.

A futuro se recomienda llevar a cabo vuelos fotogramétricos en deslizamientos aledaños para permitir identificar aún más, el grado de riesgo para las localidades cercanas y el grado de dinámica que tiene las laderas por estos procesos.

## **Financiamiento y agradecimientos**

Este proyecto fue financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM, no. IN100223, permitiendo así la realización del trabajo de campo y manejo de dron y, por consiguiente, la elaboración de este escrito.

Debido a restricciones y errores burocráticos, me remito a esta sección a llevar a cabo los correspondientes agradecimientos y dedicatorias.

Como aquella canción de la legendaria banda de rock de Chile, Los Prisioneros, dedico este trabajo a todos los que se mueven al ritmo del baile de los que sobran. A quienes el sistema educativo les falló, a los que la universidad les cerró las puertas, los enfrentó a un sinfín de obstáculos burocráticos, bloqueó sus ilusiones y sueños y no supo valorar su esfuerzo, dedicación y capacidad. Para los que no lograron ingresar, lo intentaron repetidas veces, siguen buscando un lugar e incluso para los que están en el camino que no deseaban, y se esfuerzan por enmendarlo.

Para quienes han lidiado con la soledad, el estrés, el agotamiento y la tristeza mientras debían cumplir con las exigencias que demanda pertenecer a una universidad para la cual el bienestar mental no es una prioridad, pues para los directivos, funcionarios, autoridades máximas y algunos profesores solo somos un número de cuenta más. Ninguna meta está por encima de la salud de quien la persigue.

Especialmente para todos los que han caminado en silencio y se han sentido apesadumbrados entre el bullicio y la vigorosidad de los pasillos y aulas, que se han cuestionado si se equivocaron, que estando en la carrera que soñaron desde niños o decidieron meses antes de aplicar, han sentido que no pertenecen. Que dudaron de sí mismos, a los que nunca se encontraron, que pasaron clases y días enteros solos, a los que fueron plurales siendo singulares, viendo la facilidad con que otros entablaban largas pláticas o forjaban amistades mientras ustedes seguían su propio camino, a los que en casa en algunas ocasiones no fueron escuchados. A quienes comenzaban a relacionarse y la llegada de una pandemia solo terminó por aislarlos aún más, haciendo que hablarle a una pantalla en lugar de personas se volviera una desgastante rutina.

Esta dedicatoria es para ustedes: estar solo no es sinónimo de fracasar, ahora sé que no fracasé, al final nacemos y vivimos solos, todos tenemos distintas formas de percibir el mundo y de interactuar con él, hay gente que no lo entiende a la cual hay que tenerle paciencia, ellos son todos iguales. Está bien estar mal. Con conciencia y empatía, para todos aquellos que siguen adelante, a pesar del intrincado camino. Y, sin embargo, aquí estamos.

Una vez asentadas las dedicatorias, procedo a los numerosos agradecimientos personales. Siete años después, cada vez que digo qué estudié, la pregunta sigue siendo la misma, ¿y qué es eso de Geomática?, muchas veces no sé cómo responder. Con el tiempo he entendido que describir qué es la Geomática es igual que explicar una canción de Ricardo Arjona: no hay que entenderla, hay que vivirla.

Este agradecimiento está siendo redactado desde mi escritorio en la oficina de la Coordinación Nacional de Protección Civil de la SSPC mientras remembro todo lo que me trajo aquí, decisiones y aprendizajes adquiridos por invaluable profesores, enseñanzas familiares y más.

Mencionar solo a los profesores universitarios sería una bajeza y algo deleznable. Gracias totales a los del CCA: Paty por esas tardes preparando el examen y tantas cosas más que ella y yo sabemos, Sonia que hace unos meses se cruzó un vagón entero del metro para saludar, Javier mi primer paso hacia la geografía sin saberlo

en ese entonces, Guillermo, Yudel, Ana, Angélica y el papirrín Hugo que ya chupa gladiolos desde hace una década. A los de la preparatoria del delfín: Evangelina y su recalcitrante insistencia de los puntos a las 'ies' y 'jotas', Otañez por mi confirmación hacia la ingeniería, Neyra por apoyarme en momentos difíciles, Cinthia por esas lecturas en clase fáciles de perderle el hilo por extraviarse en su rostro, e Israel por la forma tan dinámica de transmitir la física. Y desde luego, a los de la FI: Aldo por esa forma de enseñar que enamora, Rodrigo por esa primera oportunidad, un talento para dar cátedra que no supieron apreciar en la división, Javier por las cuatro asignaturas que me aguantó. A mis sinodales por aceptar la invitación, siendo aquellos con los que más afinidad tuve: al maestro Pizano, la Geomática personificada, los ingenieros Eriks por su paciencia a tantas preguntas, a la maestra Laura, a quien más molesté en cada clase y siempre estuvo dispuesta a aclararme el panorama, fue eso lo que me dio la confianza de importunar en cada ocasión, finalmente despertarse a las 4:30 am valía la pena. Y a Adri, por brindarme un oasis en medio del caos llamado Ingeniería y seguir presente, un remanso post pandémico.

A la familia por todo lo que me han soportado siendo el cretino que soy: Ayla, el Bob, Chiquis, los Kyubis, la Mokona que ya felpó, el Chilurcas, Elsa, Masita, Cecilia y mis seis tías y tíos me hicieron este hombre enreverado.

A los que se atravesaron y entablamos algo que llamaría amistad alternativa, aunque algunos se refirieran a mí como "mi amigo el comunista", nos vamos juntos. A los otros muchos que simplemente aparecieron, solo puedo decir que hay gente buena que pasa por mi vida que pierde contra mi libertad.

Especial agradecimiento al Instituto de Geografía y a la gente que allí conocí, al Dr Gabriel por su inconmensurable ayuda, paciencia, conocimiento brindado y cualquier otra cosa que esté pasando por alto ahora mismo, al Dr Fernando por estar tras bambalinas como la insigne foto de Juan Gabriel tras la palma, y a la Dra Olivia por la aceptación a participar en su momento en el diplomado. A la gente de la CNPC que ha hecho más digerible y transitable mi ingreso y que me apoyó en la

innecesaria cantidad de impresión y escaneo de oficios y documentos varios para entregar en la división, me han ahorrado varios pesos, saben quiénes son.

Por todo lo que recibí, estar aquí vale la pena. Me agradezco a mí el haber resistido y navegado contracorriente, no todos pueden estar al lado del camino.

Quizás sea un extenso apartado de agradecimientos y dedicatorias, por eso, si tuviera que sintetizarlo, me remitiría al de Luis Alberto Spinetta en su álbum Estrelia de 1997: agradezco y dedico esto a...todos y chau.

## Referencias

ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) (2019). LAS Specification 1.4-R15.

Anderson, K., Gaston, K. J. (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.

Alanis-Anaya, R.M. (2022). Susceptibilidad a inestabilidad de ladera en municipios de difícil acceso a servicios de emergencia en la subcuenca Copalita, Oaxaca, México. *Geographicalia*, no. 74 (December): 59-82. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.2022746082](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2022746082).

Arenas-Medina, L.F. (2024). Aplicación de las técnicas LIDAR y SFM en la cartografía de fallas potencialmente activas en Guerrero. Tesis. Instituto de Geografía, UNAM.

Berber, S., Ceryan, S., Ercanoglu, M. (2025). Comprehensive landslide hazard assessment using spatial, temporal and size probabilities combined with landslide density analysis in Çanakkale (NW Türkiye). *Advances in Space Research*, Volumen 76, Número 1, pp. 170-188, ISSN 0273-1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.04.048>.

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2017). Elaboración de escenarios de peligro por inundación y deslizamiento de laderas, mediante información obtenida por Vehículos aéreos no tripulados-drones (VANT). Informe

trimestral del ejercicio de recursos y el informe técnico del avance de proyecto. H00DG/0540/017. Ciudad de México. pp 13.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2020). Cobertura del suelo de México a 30 metros, 2020, escala: 1:100000. En línea: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/nalcmsmx20gw.html>. Último acceso: 20-04-2026

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2024). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia en 2024. En línea: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenesmensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Último acceso: 29-04-2025.

CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres de Guatemala) (2022). Incidentes por lluvias: diferencia entre deslizamiento de tierra, derrumbe y flujo de lodo. En línea: <https://conred.gob.gt/incidentes-por-lluvias-diferencia-entre-deslizamiento-de-tierra-derrumbe-y-flujo-de-lodo/>. Último acceso: 20-08-2025.

CRED (2025). CRED Crunch Newsletter, Issue No. 78 (May 2025): Disaster Year in Review 2024. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Publicado el 13 de mayo de 2025. Recuperado de ReliefWeb. [reliefweb.int]

De León-Escobedo, D. (2018). Métrica de vulnerabilidad de taludes críticos sujetos a lluvias extremas. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Campeche, México.

DJI. (2024). DJI Mavic 3 Enterprise Series – Specifications. <https://www.dji.com/global/mavic-3-enterprise/specs> Último acceso: 25-11-2025.

DJI (2025a). Specs - DJI Mavic 3 Enterprise. En línea: <https://enterprise.dji.com/es/mavic-3-enterprise/specs>. Último acceso: 29-04-2025.

DJI (2025b). DJI FLY. En línea: <https://www.dji.com/mx/dji-fly>. Último acceso: 29-04-2025.

Domínguez-Morales, L., De León-Escobedo, D. (2021). Comunidades amenazadas por deslizamiento de laderas. *Revista Ciencia AMC - Academia Mexicana de Ciencias*, octubre-diciembre de 2021, Vol. 72, Núm. 4.

Dong, P., & Chen, Q. (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>

Dubbini, M., Curzio, L. I., Campedelli, A. (2016). Digital elevation models from unmanned aerial vehicle surveys for archaeological interpretation of terrain anomalies: Case study of the Roman castrum of Burnum (Croatia). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8, 121-134.

DWIDP, 2015. Loss of lives by different Types of Disasters in Nepal. *Disaster Review-2014, Series XXII* pp. 8-16.

Escobar-Villanueva, J., Parrot, J-F., Ramírez-Núñez, C. (2017). Propuesta metodológica para la generación 317 de un DTM a partir de datos provenientes de RPAS, parámetros morfológicos e interpolación multidireccional como apoyo para la simulación de inundaciones en zonas urbanas. Ejemplo de la ciudad de Riohacha, Colombia. Primer Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional. Costa Rica.

Flynn, I.T.W., Williams, D.B., Ramsey, M.S. (2024). Quantifying volumes of volcanic deposits using time-averaged ASTER digital elevation models, *Science of Remote Sensing*. Volume 10, 100179, ISSN 2666-0172. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2024.100179>.

Forest Practices Division, WSDNR (2006). Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol, version 2.1, accessed at: [http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp\\_lhz\\_protocol\\_v2\\_1\\_final.pdf](http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp_lhz_protocol_v2_1_final.pdf)

Galve, J. P., Pérez-García, J. L., Ruano, P., Gomez-Lopez, J. M., Reyes-Carmona, C., Moreno-Sanchez, M., Jerez-Longres S. P., Ghadimi M., Barra A., Mateos R.M., Monserrat O., Azañón, J. M. (2025). Applications of UAV Digital Photogrammetry in landslide emergency response and recovery activities: the case study of a slope

failure in the A-7 highway (S Spain). *Landslides*, 22(5), 1383-1396.  
<https://doi.org/10.1007/s10346-024-02449-9>

García-Reyes, S., Legorreta-Paulín, G., Aceves-Quesada, F. (2018). Susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca. *Investigaciones geográficas*, (96). <https://doi.org/10.14350/riq.59613>

García-Tenorio, F. (2008). *Avalancha de escombros del pleistoceno tardío del cono Los Pies, complejo volcánico Iztaccíhuatl (Master thesis)*. Escuela Superior de Ingeniería, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional, México). 147 pp.

Gobierno de México (2024). Lluvia menor 500 mm. url: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/266747/LLUVIA\\_MENOR\\_1500\\_MM\\_OK\\_C.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/266747/LLUVIA_MENOR_1500_MM_OK_C.pdf). Último acceso: 13-08-2025.

Iglesias-Carreño, I.L., Salgado-Hernández, M. del C., Pérez-Gutiérrez, R. (2025). Analysis of the impact of land use and vegetation changes on landslide susceptibility in the Zoque region, northern Chiapas, Mexico. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (35), 1–23.  
<https://doi.org/10.21138/GF.875>

Instituto de Geografía (2025). *Proyectos de Investigación*. UNAM - Instituto de Geografía - Departamento de Geografía Física. En línea: <https://www.geografia.unam.mx/legorreta/zpd/modelado/modelos.php>. Último acceso: 05-05-2025.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. En línea: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>. Último acceso: 12-05-2025.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. En línea: [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos_abiertos). Último acceso: 13-08-2025.

Lazzari, M., Piccarreta, M. (2018). Landslide disasters triggered by extreme rainfall events: The case of Montescaglioso (Basilicata, southern Italy). *Geosciences*; 8(10):377. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100377>

Legorreta-Paulín, G., Bursik, M., Zamorano-Orozco, J.J., Lugo-Hubp, J., Martínez-Hackert, B., Bajo-Sánchez, J.V. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geofomas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Investigaciones geográficas*, (92). <https://doi.org/10.14350/rig.51113>

Legorreta-Paulín, G., Arana-Salinas, L., Miguel, R.C., Parrot, J-F.Y.P., Contreras, T.A. (2021). Assessing Landslide Volume for Landform Hazard Zoning Purposes. *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Volume 2 From Mapping to Hazard and Risk Zonation 5th*, 313-319. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7\\_35](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_35)

Legorreta-Paulín, G., Parrot, J.F., Alanís-Anaya, R.M., Arana-Salinas, L., Castro, R. (2023). Use of GIS to Assess Susceptibility per Landform Unit to Gravitational Processes and their Volume. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-39012-8\\_21](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-39012-8_21)

Legorreta-Paulín, G., Bursik, M., Arana-Salinas, L., Medina-Jaen, M. (2024). Assessing Landslide Distribution for Landform Hazard Zoning Purposes: A Case Study on the Western Flank of Iztaccíhuatl Volcano, Puebla, México. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-55120-8\\_25](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-55120-8_25)

Legorreta-Paulín, G., Arana Salinas, L., Aceves Quesada, F., & Castro Miguel, R. (2025). Cartografía y modelado de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la cuenca del río Xopanac, Puebla, México, utilizando regresión logística múltiple. *Investigaciones Geográficas*, (117). <https://doi.org/10.14350/rig.61057>

Lin, M.L., Chen, T.W. (2020). Estimating volume of deep-seated landslides and mass transport in Basihlan river basin, Taiwan. *Eng Geol* 278:105825. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105825>

Liucci, L., Melelli, L., Suteanu, C., Ponziani, F. (2017). The role of topography in the scaling distribution of landslide areas: A cellular automata modeling approach. *Geomorphology*, 290, 236-249. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.017>

Lissak, C., Bartsch, A., De Michele, M., Gomez, C., Maquaire, O., Raucoules, D., Roulland, T. (2020). Remote Sensing for Assessing Landslides and Associated Hazards. *Surv Geophys* 41, 1391–1435. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09609-1>.

Macías, J.L., Arce, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P.W., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., López-Pizaña, F., Avellán, D. (2012). Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico. In: *The southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field, Aranda-Gómez JJ, Tolson G, Molina-Garza RS (eds). Guide 25, 163-193.* [https://doi.org/10.1130/2012.0025\(08\)](https://doi.org/10.1130/2012.0025(08))

Manocha, A.R., Kumar, N., Kumar, A. (2025). Spline-Based Volume Estimation of landslides Using Different DEMs: Case Studies of the Kotropi and Prashar Lake Landslides, Northwestern Himalaya, *Natural Hazards Research*, ISSN 2666-5921. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.08.005>.

Massey, C.I., Townsend, D., Jones, K., Lukovic, B., Rhoades, D., Morgenstern, R., Olsen, M. (2020). Volume characteristics of landslides triggered by the MW 7.8 2016 Kaikōura Earthquake, New Zealand, derived from digital surface difference modeling. *J Geophys Res Earth Surf* 125(7):e2019JF005163. <https://doi.org/10.1029/2019JF005163>

Mizutori, M. (2020). Foreword for the Journal of the International Consortium on Landslides. *Landslides* 17(4):753.

Ouédraogo, M.M., Degré, A., Debouche, C., Lisein, J. (2014). The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to

generate DEMs of agricultural watersheds, *Geomorphology*, Volume 214, p 339-355, ISSN 0169-555X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.016>

Pathak, D. (2016). Remote sensing and GIS application in landslide risk assessment and management. *Nepalese Journal of Geoinformatics*; 15:52-57. <https://doi.org/10.3126/njg.v15i1.51186>

PhotoScan, A. (2018). User Manual: Professional Edition. Version 1.4. url: [https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_4\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf). Último acceso: 15-08-2024.

Ramírez-Díaz, J. W. (2025). La susceptibilidad a deslizamientos de los paisajes físico-geográficos de la Sierra Madre de Oaxaca (Master's thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas).

Ray, R.L., Lazzari, M., Olutimehin, T. (2020). Remote sensing approaches and related techniques to map and study landslides. *Landslides. Investig Monit* 2:1–25. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93681>

Red Cross and Red Crescent Societies (2022). World Disaster Report; International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies: Geneva, Switzerland.

Romero-Rojas, W., Vázquez-Jiménez, R., Ramos-Bernal, R.N. (2019). Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas geotecnológicas. *Revista cartográfica*, (98), 201-221. Epub 14 de marzo de 2022. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.147>

Roncancio A. (2021). Agisoft Metashape. UNICISO. Disponible en: [www.portaluniciso.com](http://www.portaluniciso.com). Último acceso: 27-04-2025.

Ruiz, C.R., Corominas, D.J., Hurlimann, Z.M. (2017). Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera. In IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (pp. 581-592). International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).

Sánchez-García, K. R. (2018). Cartografía geomorfológica del volcán de Iztaccíhuatl, México. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. En línea: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/175054>. Último acceso: 26-09-2025.

SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) (2016). Atlas de Peligros y/o Riesgos del Municipio de Huejotzingo 2015. H. Ayuntamiento Municipal de Huejotzingo, Puebla. de: [https://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2015/21074\\_Atlas\\_Huejotzingo.pdf](https://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2015/21074_Atlas_Huejotzingo.pdf). Último acceso: 13-08-2025

Sestras, P., Badea, G., Badea, A. C., Salagean, T., Oniga, V. E., Roşca, S., Bilasco S., Bruma S., Spalevic V., Kander S., Billi P., Nedevschi, S. (2025). A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regard to terrain feature. *Engineering Geology*, 346, 107890. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107890>

Singh, J., Sepúlveda, S.A. (2025). Assessing the landslide failure surface depth and volume: A new spline interpolation method, *Engineering Geology*, Volume 357, 108319, ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108319>.

Tang, C., Tang, J., Van Westen, C.J., Han, J., Mavrouli, O., Tang, C. (2020). Modeling landslide failure surfaces by polynomial surface fitting. *Geomorphology* 368:107358. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107358>

Wenske, D., Jen, C.H., Böse, M., Lin, J.C. (2012). Assessment of sediment delivery from successive erosion on stream-coupled hillslopes via a time series of topographic surveys in the central high mountain range of Taiwan: *Quaternary International*, 263, 14-25, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.02.018>

Ya K., Zhong L., Chaoying Z., Wei Q. (2023). Inferring slip-surface geometry and volume of creeping landslides based on InSAR: A case study in Jinsha River basin, *Remote Sensing of Environment*, Volume 294, 113620, ISSN 0034-4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113620>.

Yin, Y., Wang, F. & Sun, P. (2009). Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides* 6, 139–152.  
<https://doi.org/10.1007/s10346-009-0148-5>