



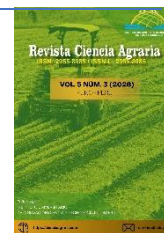
Revista Ciencia Agraria

revistas.inudi.edu.pe/rca

ISSN: 2955-8085 ISSN-L: 2955-8085

Editada por:

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú



ARTÍCULO ORIGINAL

Caracterización biogeofísica de una zona de deslizamiento mediante teledetección para la gestión de riesgos de desastres en el volcán San Vicente, El Salvador

Biogeophysical characterization of a landslide zone using remote sensing for disaster risk management at San Vicente Volcano, El Salvador

Caracterização biogeofísica de uma zona de deslizamento por meio de sensoriamento remoto para a gestão de riscos de desastres no vulcão San Vicente, El Salvador

Gerson Cornejo-Reyes¹

Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador

 <https://orcid.org/0000-0001-9617-1266>

gerson.cornejo@ues.edu.sv (correspondencia)

Carlos Funes-Guadrón

Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador

 <https://orcid.org/0000-0001-7878-0009>

carlos.funes@ues.edu.sv

DOI: <https://doi.org/10.35622/j.rca.2026.03.001>

Recibido: 28/05/2026 Aceptado: 13/07/2026 Publicado: 06/08/2026

PALABRAS CLAVE

deslizamiento de tierra,
fotogrametría,
geomorfología, gestión
de riesgos,
teledetección.

RESUMEN. Los deslizamientos de tierra representan una de las amenazas naturales más frecuentes en regiones montañosas y volcánicas, generando impactos significativos sobre la infraestructura, los ecosistemas y las comunidades humanas. El objetivo fue realizar la caracterización biogeofísica de una zona afectada por un deslizamiento mediante el uso de teledetección y fotogrametría con dron (UAV). Se adoptó un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo, orientado a la caracterización biogeofísica de un deslizamiento localizado en el volcán San Vicente, El Salvador. Para ello, se integraron la fotogrametría UAV y el análisis geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). A partir del procesamiento de imágenes aéreas obtenidas con dron, se generaron ortomosaicos, modelos digitales de superficie (DSM), modelos digitales de elevación (DEM), nubes de puntos y modelos tridimensionales. Complementariamente, se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), con el propósito de evaluar cambios en la cobertura vegetal asociados al evento. Los resultados permitieron identificar un deslizamiento con pendientes superiores a 70°, un área estimada de 9,570.50 m², un perímetro de 570.66 m y un volumen aproximado de 191,410 m³ de material movilizado. Los productos derivados de la fotogrametría UAV y el análisis de imágenes Sentinel-2 evidenciaron cambios en la cobertura vegetal, la evolución morfológica del deslizamiento y el transporte y depósito de material, asociados a condiciones topográficas y geomorfológicas que favorecen la inestabilidad de la ladera. Se concluye que la información

¹ Ingeniero Agroindustrial por la Universidad de El Salvador, El Salvador.



generada constituye un insumo para el fortalecimiento de las capacidades resilientes, las estrategias de monitoreo y la evaluación de amenazas.

KEYWORDS

geomorphology, landslide, photogrammetry, remote sensing, risk management.

ABSTRACT. Landslides represent one of the most frequent natural hazards in mountainous and volcanic regions, causing significant impacts on infrastructure, ecosystems, and human communities. The objective was to characterize the biogeophysical conditions of an area affected by a landslide using remote sensing and drone-based photogrammetry (UAV). A quantitative approach with a descriptive scope was adopted, aimed at the biogeophysical characterization of a landslide located on San Vicente Volcano, El Salvador. To this end, UAV photogrammetry and geospatial analysis using Geographic Information Systems (GIS) were integrated. Based on the processing of aerial images captured by drone, orthomosaics, digital surface models (DSM), digital elevation models (DEM), point clouds, and three-dimensional models were generated. Additionally, Sentinel-2 satellite imagery was used to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess changes in vegetation cover associated with the event. The results identified a landslide with slopes exceeding 70°, an estimated area of 9,570.50 m², a perimeter of 570.66 m, and an approximate volume of 191,410 m³ of mobilized material. The products derived from UAV photogrammetry and Sentinel-2 image analysis revealed changes in vegetation cover, the morphological evolution of the landslide, and the transport and deposition of material associated with topographic and geomorphological conditions that favor slope instability. It is concluded that the information generated provides input for strengthening resilience capacities, monitoring strategies, and hazard assessment.

PALAVRAS-CHAVE

deslizamento de terra, fotogrametria, geomorfologia, gestão de riscos, sensoriamento remoto.

RESUMO. Os deslizamentos de terra representam uma das ameaças naturais mais frequentes em regiões montanhosas e vulcânicas, gerando impactos significativos sobre a infraestrutura, os ecossistemas e as comunidades humanas. O objetivo foi realizar a caracterização biogeofísica de uma área afetada por um deslizamento por meio do uso de sensoriamento remoto e fotogrametria com drone (UAV). Adotou-se uma abordagem quantitativa de alcance descritivo, orientada à caracterização biogeofísica de um deslizamento localizado no vulcão San Vicente, El Salvador. Para isso, foram integradas a fotogrametria UAV e a análise geoespacial por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A partir do processamento de imagens aéreas obtidas com drone, foram gerados ortomosaicos, modelos digitais de superfície (DSM), modelos digitais de elevação (DEM), nuvens de pontos e modelos tridimensionais. Complementarmente, foram utilizadas imagens de satélite Sentinel-2 para o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), com o propósito de avaliar mudanças na cobertura vegetal associadas ao evento. Os resultados permitiram identificar um deslizamento com declividades superiores a 70°, uma área estimada de 9.570,50 m², um perímetro de 570,66 m e um volume aproximado de 191.410 m³ de material mobilizado. Os produtos derivados da fotogrametria UAV e da análise de imagens Sentinel-2 evidenciaram mudanças na cobertura vegetal, a evolução morfológica do deslizamento e o transporte e a deposição de material, associados a condições topográficas e geomorfológicas que favorecem a instabilidade da encosta. Conclui-se que as informações geradas constituem um subsídio para o fortalecimento das capacidades de resiliência, das estratégias de monitoramento e da avaliação de ameaças.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los peligros naturales más extendidos y destructivos a escala global, generando pérdidas significativas de vidas humanas, daños a la infraestructura y alteraciones profundas en los ecosistemas. Diversos estudios han documentado que estos procesos geomorfológicos ocurren en prácticamente todos los continentes, especialmente en regiones montañosas o volcánicas con precipitaciones intensas y elevada actividad tectónica. El análisis global de eventos fatales evidencia que miles de personas han perdido la vida por deslizamientos en las últimas décadas, destacando la necesidad de mejorar los sistemas de monitoreo y prevención (Froude & Petley, 2018; Petley, 2012; Ormaetxea Arenaza et al., 2017). Asimismo,

investigaciones basadas en catálogos globales han permitido identificar patrones espaciales y temporales en la ocurrencia de estos fenómenos, proporcionando una base fundamental para el análisis de susceptibilidad y riesgo (Kirschbaum et al., 2015; Stanley & Kirschbaum, 2017).

En términos generales, los deslizamientos son procesos complejos controlados por la interacción entre factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y antrópicos. La literatura científica ha desarrollado diferentes clasificaciones y metodologías para su estudio, destacando la clasificación ampliamente utilizada propuesta por Hungr et al. (2014), que sistematiza los distintos tipos de movimientos de masa. A partir de esta base conceptual, múltiples investigaciones han enfatizado la importancia de los inventarios de deslizamientos como herramientas esenciales para comprender su dinámica espacial y temporal (Guzzetti et al., 2012). Además, los avances en técnicas estadísticas y modelos de susceptibilidad han permitido mejorar la identificación de zonas potencialmente inestables (Reichenbach et al., 2018; Catani et al., 2013).

A pesar de los avances metodológicos, el riesgo asociado a los deslizamientos continúa incrementándose en diversas regiones del mundo debido a la creciente exposición de poblaciones e infraestructuras en áreas montañosas y volcánicas. Este fenómeno se ve agravado por el cambio climático, el cual está intensificando los ciclos hidrológicos y aumentando la frecuencia de precipitaciones extremas, consideradas uno de los principales desencadenantes de deslizamientos superficiales y flujos de escombros (Gariano & Guzzetti, 2016).

En consecuencia, se reconoce la necesidad de desarrollar métodos de monitoreo más dinámicos y herramientas de análisis geoespacial que permitan mejorar la capacidad de respuesta ante estos fenómenos (Ehsan et al., 2025; Singh et al., 2024). En el contexto de América Latina, Centroamérica representa una de las regiones más vulnerables a los desastres asociados a movimientos de masa, debido a su compleja interacción entre factores tectónicos, volcánicos y climáticos. La región se encuentra localizada sobre el margen convergente entre la placa del Pacífico o de Cocos y la placa del Caribe, lo que genera una intensa actividad sísmica y volcánica que condiciona la estabilidad de las laderas (Carr et al., 2004).

A nivel internacional, programas de monitoreo como el United States Geological Survey (USGS, s.f.) han desarrollado plataformas de información y bases de datos que permiten analizar la ocurrencia de deslizamientos a escala global y mejorar las estrategias de mitigación y alerta temprana. Esto permite monitorear y comprender la geodinámica en la que se suma la recurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como huracanes y tormentas tropicales, que frecuentemente provocan deslizamientos de gran magnitud en zonas montañosas (Rose, 2006; Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2024).

Es así que algunos países son más vulnerables al estar situados cerca del Cinturón de Fuego del Pacífico, lo que origina una topografía accidentada, con la presencia de cordilleras volcánicas activas como es el caso de El Salvador y a su vez la ocurrencia recurrente de eventos sísmicos y lluvias intensas. Estudios geológicos han demostrado que los terremotos y las precipitaciones extremas constituyen los principales detonantes de deslizamientos en el país, generando graves impactos socioeconómicos (Bommer et al., 2002; García Flórez, 2016). Asimismo, investigaciones sobre amenazas naturales han evidenciado que la interacción entre actividad tectónica y condiciones climáticas extremas ha provocado algunos de los desastres más significativos en la historia reciente en El Salvador (Rose et al., 2004).

Por esta razón, la generación de información geoespacial sobre susceptibilidad a deslizamientos en El Salvador ha sido una prioridad para las instituciones responsables de la gestión del riesgo de desastres. Es así que

instituciones como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales han desarrollado diversos instrumentos técnicos orientados a la identificación de zonas vulnerables, entre ellos el Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de El Salvador a partir de datos de LiDAR, índices espectrales e interferometría con imágenes tanto radiométricas como ópticas, los cuales constituyen una referencia fundamental para la planificación territorial y la prevención de desastres (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2011). Asimismo, informes nacionales recientes han identificado múltiples áreas del país con alta susceptibilidad a movimientos de masa debido a la interacción entre factores biogeofísicos (MARN, 2017).

Un caso particularmente representativo de esta problemática es el volcán de San Vicente, ubicado en la zona central de El Salvador. Este edificio volcánico forma parte de la cadena volcánica centroamericana y presenta características geológicas que favorecen la generación de procesos de remoción en masa, especialmente durante eventos de lluvias que sobrepasan los umbrales para la zona. El registro histórico de flujos de escombros y deslizamientos en sus flancos evidencia la vulnerabilidad de las comunidades asentadas en sus alrededores (Global Volcanism Program, 2023).

Es así que tanto la presencia de depósitos piroclásticos poco consolidados, cenizas volcánicas y materiales alterados hidrotermalmente genera condiciones propicias para la saturación del suelo y el colapso de taludes durante lluvias intensas. Estos materiales presentan propiedades geotécnicas particulares que facilitan la generación de deslizamientos superficiales y flujos de escombros, especialmente en pendientes pronunciadas cercanas al distrito de Guadalupe, cantón Agua Agría y Joya de Manguía (García Flórez, 2016). Asimismo, los procesos de erosión y acumulación de sedimentos volcánicos pueden incrementar la susceptibilidad de las laderas a procesos de remoción en masa (Scott et al., 2001).

En este sentido, la comprensión de los procesos geomorfológicos asociados a los deslizamientos requiere una caracterización detallada de las condiciones biofísicas del terreno, incluyendo variables como la pendiente, la orientación de las laderas, la cobertura vegetal, la geología y la hidrología superficial. La caracterización geomorfológica constituye un paso fundamental para identificar zonas de susceptibilidad y evaluar los factores que controlan la ocurrencia de deslizamientos (Van Westen et al., 2008; Reichenbach et al., 2018). Asimismo, el análisis de estos factores permite fortalecer los procesos de planificación territorial y gestión del riesgo de desastres (Marinero Orantes, 2024).

La gestión efectiva del riesgo de desastres requiere integrar información geoespacial precisa y actualizada sobre las amenazas naturales. En el caso de los deslizamientos, esto implica la identificación de zonas susceptibles, la evaluación de los factores detonantes y el monitoreo continuo de la estabilidad de las laderas. Diversos estudios han destacado la importancia de los sistemas de alerta temprana y el monitoreo de movimientos de ladera como herramientas clave para reducir las pérdidas humanas y económicas asociadas a estos fenómenos (Intrieri et al., 2013; Highland et al., 2008).

En las últimas décadas, las tecnologías de teledetección han transformado significativamente el estudio de los deslizamientos, ya que la disponibilidad de sensores satelitales y plataformas aéreas ha permitido obtener información geoespacial de alta resolución sobre la superficie terrestre, facilitando el análisis de cambios en la topografía, la cobertura vegetal y la humedad del suelo (Casagli et al., 2023). Estas tecnologías han demostrado ser particularmente útiles en regiones de difícil acceso, donde los métodos tradicionales de levantamiento de campo resultan limitados o costosos (Novellino et al., 2024).

Es así que estos recursos de teledetección como las imágenes satelitales ópticas y de radar constituyen una de las principales fuentes de información para el análisis de deslizamientos a escala regional. Los sensores de radar de apertura sintética (SAR), por ejemplo, permiten detectar desplazamientos milimétricos en la superficie terrestre mediante técnicas interferométricas, lo que facilita el monitoreo de movimientos lentos de ladera (Crosetto et al., 2016). Asimismo, la integración de datos satelitales con modelos de aprendizaje profundo y *machine learning* ha abierto nuevas oportunidades para la detección automática de deslizamientos a escala global (Jiang et al., 2026; Nava et al., 2026).

Además de las imágenes satelitales, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) se ha convertido en una herramienta fundamental para la caracterización detallada de zonas afectadas por deslizamientos. Mediante técnicas de fotogrametría digital, se pueden generar modelos tridimensionales del terreno con alta resolución espacial, lo que facilita el análisis morfométrico de las cicatrices de deslizamiento y la estimación de volúmenes de material movilizado (Westoby et al., 2012; Spencer et al., 2016).

Estas capacidades han permitido mejorar significativamente la precisión de los estudios geomorfológicos en zonas montañosas y volcánicas. La combinación de diferentes fuentes de información facilita la generación de productos geoespaciales clave, como modelos digitales de elevación, mapas de pendiente, ortofotografías de alta resolución e inventarios de deslizamientos (Van Westen et al., 2008). Estos productos constituyen una base fundamental para la modelación de susceptibilidad y el análisis del riesgo asociado a movimientos de masa (Hussain et al., 2025; Khan & Khan, 2025).

En los últimos años, el uso de datos satelitales para el análisis de deslizamientos ha sido impulsado significativamente por iniciativas de investigación y capacitación desarrolladas por *National Aeronautics and Space Administration*, la cual recopila datos geoespaciales y materiales de entrenamiento dirigidos a científicos, gestores de riesgos y tomadores de decisiones, con el objetivo de fortalecer las capacidades en el uso de teledetección para la evaluación de peligros naturales. Estos programas han demostrado el potencial de los datos satelitales para identificar áreas susceptibles a deslizamientos mediante el análisis de variables como la humedad del suelo, la cobertura vegetal, la topografía y la precipitación acumulada mediante el procesamiento de imágenes del Sentinel 2, Sentinel 1 y Landsat 7, 8 y 9 (Podest et al., 2019; National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2025).

A partir de estas herramientas se pueden analizar los deslizamientos y generar un catálogo de deslizamientos, que integra información satelital y reportes de eventos para construir una base de datos geoespacial de ocurrencias a escala mundial y local. De esta manera, es posible analizar patrones espaciales y temporales en la distribución de deslizamientos, facilitando la identificación de regiones con mayor susceptibilidad (NAS, 2022a).

Además, los sensores satelitales como Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat y SMAP están validados para el monitoreo de condiciones ambientales relacionadas con la inestabilidad de laderas, incluyendo cambios en la humedad del suelo, deforestación y precipitaciones extremas. Estas iniciativas han contribuido a mejorar la capacidad técnica de instituciones gubernamentales y académicas en el uso de herramientas de teledetección para la gestión del riesgo de desastres (Podest, 2022; Emberson, 2025).

Por otra parte, diversos estudios han demostrado que los algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo aplicados a datos de observación de la Tierra pueden identificar patrones complejos en grandes

conjuntos de datos geoespaciales, facilitando la detección, clasificación y monitoreo de deslizamientos con elevados niveles de precisión (Casagli et al., 2023; Novellino et al., 2024; Jiang et al., 2026). Estas herramientas representan una oportunidad significativa para fortalecer los sistemas de monitoreo y alerta temprana en regiones vulnerables.

En este contexto, la caracterización biogeofísica de zonas susceptibles a deslizamientos mediante técnicas de teledetección representa una estrategia prometedora para mejorar la comprensión de estos fenómenos y fortalecer la gestión del riesgo de desastres. La integración de datos satelitales, análisis geomorfológicos y modelos digitales del terreno permite identificar patrones espaciales de inestabilidad y evaluar los factores que controlan la ocurrencia de deslizamientos (Albanwan et al., 2024; Fossi & Tatchinda Lonkeng, 2025).

El estudio de los deslizamientos en contextos volcánicos ha demostrado que los flujos de escombros constituyen uno de los procesos geomorfológicos más destructivos asociados a la inestabilidad de laderas. Estos flujos se caracterizan por la movilización rápida de grandes volúmenes de sedimentos saturados que pueden recorrer largas distancias y afectar comunidades ubicadas en zonas bajas (Major et al., 2004).

Por lo tanto, a partir de la contextualización realizada, el presente estudio tiene como objetivo realizar una caracterización biogeofísica de una zona de deslizamiento en el volcán San Vicente, El Salvador, Centroamérica, mediante la integración de técnicas de teledetección, incluidas imágenes satelitales ópticas y fotogrametría con drones para la modelación tridimensional del terreno. A partir de esta información se pretende determinar parámetros físicos clave como elevación, pendiente, área afectada, longitud del deslizamiento, ruta potencial de flujo y volumen de material movilizado e índices espectrales. Se plantea que la integración de fotogrametría UAV e imágenes Sentinel-2 permite caracterizar adecuadamente la evolución morfológica y biofísica de deslizamientos en ambientes volcánicos tropicales, proporcionando información útil para la gestión del riesgo.

2. MÉTODO

Dentro del marco de acción y funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana previamente constituido en el Departamento de San Vicente, se recibió un aviso de la ciudadanía sobre un deslizamiento ocurrido el 15 de noviembre de 2023, a raíz de fuertes precipitaciones, en el cantón Joya de Munguía, distrito de Guadalupe, municipio de San Vicente Sur, departamento de San Vicente, El Salvador. La ocurrencia del deslizamiento planteó la necesidad de evaluar la amenaza debido a la presencia de factores condicionantes y desencadenantes asociados a precipitaciones intensas ($70\text{--}80\text{ mm h}^{-1}$), una saturación del suelo de 45 mm, con base en estudios previos del último trimestre de la época lluviosa, las características geomorfológicas de la ladera y, en menor medida, la poca actividad volcánica del volcán San Vicente.

Por esta razón, se articuló con los actores clave de las instituciones de gestión de riesgos la realización de inspecciones periódicas para evaluar y monitorear de manera discreta la evolución mediante observación y monitoreo entre noviembre de 2023 y enero de 2025, con el propósito de documentar cambios morfológicos, condiciones de estabilidad y procesos de recuperación de la cobertura vegetal. Es así que se integraron todos los componentes de la gestión de riesgos en la participación de estas campañas desde tomadores de decisión, especialistas, instituciones de primera respuesta, gobernanza local, técnicos en gestión de riesgos y líderes u observadores locales con la finalidad de fortalecer las capacidades resilientes de estos.

Complementariamente, para dar respuesta a la amenaza se realizó la investigación bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo y diseño no experimental orientado a la caracterización biogeofísica de un deslizamiento localizado en el volcán San Vicente, El Salvador. El estudio integró técnicas de teledetección, fotogrametría UAV y análisis geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para evaluar variables topográficas, geomorfológicas y de cobertura vegetal asociadas a la dinámica del deslizamiento e integró una validación técnica de resultados con actores locales.

Asimismo, el análisis incorporó un componente multitemporal, mediante la comparación de imágenes aéreas obtenidas con drone e imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a diferentes periodos de observación, permitiendo identificar cambios en la morfología del terreno, la cobertura vegetal y las condiciones biofísicas de la zona afectada. Para ello, se generaron ortomosaicos, modelos digitales de superficie (DSM), modelos digitales de elevación (DEM), nubes de puntos y modelos tridimensionales del terreno, complementados con el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para evaluar la respuesta de la cobertura vegetal en relación con los procesos de inestabilidad de ladera y restauración de la vegetación.

Al evaluar la zona del deslizamiento este se encuentra ubicada aproximadamente en las coordenadas 13° 35' 51.31" N 88° 51' 07.11" W a 2.5 km al este del cantón San Antonio La Laguneta y a 3 km aproximadamente al sureste desde una vista frontal del distrito de Guadalupe en el cono occidental del volcán próximo a la quebrada El Derrumbo. La zona se caracteriza por contar con una litología de rocas efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas, una pendiente registrada $> 70^\circ$, una elevación de 1550 a 1600 msnm, con un suelo arenoso considerando cerca de 3 a 4 metros de suelo suelto y posteriormente roca consolidada contigua al acuífero subterráneo.

Las condiciones del terreno, la alta densidad de la vegetación, la fauna local y las pendientes pronunciadas dificultaron el acceso a la zona, por lo que se realizó un levantamiento fotogramétrico mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV) equipado con cámara RGB de alta resolución DJI Mavic Pro-2 como herramienta de teledetección para geolocalizar y obtener imágenes para analizarlas posteriormente, una vez procesadas.

Se realizaron vuelos en diferentes fechas: uno correspondiente al 15 de noviembre de 2023, atendiendo a la situación suscitada durante la época lluviosa, y otros el 17 de noviembre de 2023, 14 de julio de 2024 y 5 de enero de 2025; estos últimos durante la canícula y la época seca. Esto se debió a que la nubosidad, fuertes vientos y altas precipitaciones impedirían el vuelo de la aeronave.

El vuelo se realizó a 500 metros de distancia del punto más cercano y accesible y a cerca de 400 metros de altura respecto del deslizamiento para capturar 20 imágenes. Por lo cual, la resolución espacial fue de 17 cm/pixel⁻¹ (Ground Sampling Distance o GSD). El vuelo fue planificado siguiendo parámetros de fotogrametría digital para garantizar una adecuada reconstrucción tridimensional del terreno, incluyendo un traslape frontal aproximado del 75–85 % y un traslape lateral entre 65–75 %, lo que permitió generar una nube de puntos muy densa (12,435,083 puntos) de alta precisión espacial.

Posteriormente, se utilizaron los Sistemas de Información Geográficos y programas de modelación y técnicas de Structure from Motion (SfM) utilizando el software fotogramétrico Agisoft Metashape, el cual permitió reconstruir la geometría tridimensional del terreno a partir de múltiples imágenes superpuestas, los cuales fueron contrastados mediante procesamiento independiente en Pix4D para verificar la consistencia geométrica de los modelos generados.

El procesamiento de las imágenes incluyó la alineación de imágenes, para estimar la posición relativa de cada fotografía y generar una nube de puntos dispersa; la generación de nube de puntos densa, mediante algoritmos de correlación fotogramétrica; construcción de malla tridimensional, que representa la superficie del terreno; generación del ortomosaico, corregido geométricamente; se elaboró un Modelo Digital de Superficie (DSM), que incorpora la elevación del terreno, la vegetación y otros elementos presentes sobre la superficie. A partir de este producto y de la clasificación de la nube de puntos se derivaron el Modelo Digital de Elevación (DEM) y otros elementos en la superficie.

Para la generación del Modelo Digital de Elevación (DEM), se aplicó un proceso de clasificación de la nube de puntos densa mediante las herramientas *Dense Cloud Classification* y *Classify Ground Points* de Agisoft Metashape. La estimación volumétrica fue realizada mediante la herramienta Measure Volume de Agisoft Metashape, utilizando los modelos tridimensionales generados a partir de la fotogrametría y los polígonos delimitados para cada periodo de observación.

El procedimiento considera las variaciones topográficas existentes dentro del área analizada, por lo que el volumen estimado no corresponde a una extrapolación basada en una profundidad uniforme, sino a la integración de diferencias altimétricas sobre una superficie geoméricamente irregular. Debido a la complejidad geomorfológica del terreno, las profundidades observadas presentan variaciones espaciales significativas, asociadas a escarpes, zonas de transporte y sectores de acumulación del material removido.

Estas herramientas permitieron identificar y clasificar los puntos correspondientes al terreno, diferenciándolos de elementos asociados a la vegetación y otros objetos superficiales mediante criterios de pendiente, distancia y elevación relativa entre puntos vecinos. Posteriormente, el DEM fue generado utilizando únicamente los puntos clasificados como terreno (*ground points*), reduciendo la influencia de la cobertura vegetal sobre la representación de la topografía. Este procedimiento permitió obtener una aproximación más precisa de la superficie del terreno para el análisis geomorfológico y morfométrico del deslizamiento, aunque se reconoce que la presencia de vegetación densa puede introducir incertidumbres locales inherentes a los modelos derivados de fotogrametría RGB.

De esta forma, se analizaron los modelos digitales de elevación (DEM), modelos de superficie, ortomosaicos y modelos tridimensionales generados a partir del sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 16N (EPSG:32616). A partir de estos productos se determinaron parámetros morfométricos como área, perímetro, longitud, ancho y profundidad del deslizamiento. La estimación volumétrica se realizó mediante la delimitación espacial del deslizamiento y la profundidad máxima observada en cada periodo de evaluación, obteniéndose una aproximación inicial mediante la relación área-profundidad. Los resultados fueron posteriormente contrastados con perfiles topográficos y modelos tridimensionales generados en Agisoft Metashape y Pix4D para verificar la consistencia geométrica de las estimaciones.

Complementariamente, a una escala espacial mayor se procesaron índices espectrales como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a partir de imágenes multiespectrales y combinaciones geocolor de fechas previas y posteriores a la ocurrencia del fenómeno utilizando imágenes del satélite Sentinel-2 L2A.

A partir de la información obtenida mediante el análisis de los productos obtenidos, y considerando los antecedentes de afectación registrados durante la Tormenta IDA en 2009, se desarrolló una jornada de presentación y validación técnica de resultados con miembros del Sistema de Alerta Temprana (SAT) de San

Vicente, personal técnico de gestión del riesgo, representantes institucionales, gobernanza local y actores comunitarios.

Durante la actividad se expusieron los principales hallazgos relacionados con la amenaza por deslizamientos y las características geomorfológicas identificadas en la zona de estudio. Asimismo, se generó un espacio de intercambio de experiencias y observaciones, en el cual los participantes señalaron limitaciones asociadas a los sistemas de comunicación, disponibilidad de equipo para emergencias, capacidades de respuesta y aspectos de gobernanza local. Las observaciones fueron registradas mediante notas de campo y utilizadas como información complementaria para contextualizar e interpretar algunos de los resultados y conclusiones del estudio.

Las observaciones fueron registradas para fortalecer los planes de prevención y atención de emergencias por fenómenos naturales extremos ocasionadores de desastres, con información técnico-científica actualizada de la zona. A su vez, los resultados obtenidos fueron contrastados mediante observaciones de campo, interpretación visual de imágenes de alta resolución y validación técnica con especialistas en gestión del riesgo y actores locales.

3. RESULTADOS

El volcán de San Vicente se caracteriza por presentar numerosos movimientos en masa asociados a precipitaciones intensas, pendientes pronunciadas y materiales volcánicos susceptibles a la inestabilidad. Diversas inspecciones técnicas realizadas en la zona han documentado la ocurrencia recurrente de deslizamientos de diferentes magnitudes en sus laderas.

En este contexto, el evento analizado corresponde a un deslizamiento rotacional, evidenciado por la presencia de un escarpe principal, superficies de ruptura curvas y el desplazamiento de material ladera abajo. Este tipo de movimiento representa una amenaza para las comunidades ubicadas en zonas de influencia debido a la posibilidad de generar procesos de remoción en masa de mayor magnitud.

Asimismo, el volcán registra antecedentes históricos de eventos catastróficos, como el lahar desencadenado durante la Tormenta IDA en 2009, el cual ocasionó graves afectaciones en los asentamientos de Verapaz, Guadalupe y San Vicente. Bajo condiciones de precipitaciones extremas, el material movilizado por el deslizamiento podría ser removilizado hacia las quebradas de drenaje, favoreciendo la ocurrencia de flujos de escombros y aumentando el nivel de exposición de las poblaciones cercanas, que en muchos casos se encuentra subestimado. La extensión superficial del deslizamiento fue delimitada mediante interpretación del ortomosaico de alta resolución y validación con el modelo digital del terreno. El área total afectada fue calculada mediante herramientas de análisis espacial dentro del entorno SIG.

Esta estimación corresponde a la identificación de una forma circular o en forma de cuña, que se desliza hacia abajo y hacia afuera a lo largo de una superficie curva o cóncava. Este tipo de deslizamientos a menudo ocurre en laderas empinadas y puede tener consecuencias significativas, ya que el movimiento de la masa de suelo y roca puede generar daños a la propiedad y representar un peligro para la vida humana.

En las zonas adyacentes al deslizamiento, la cobertura vegetal es densa y diversa principalmente por ser un bosque de un área natural protegida, lo que implica que el ecosistema está bien establecido. Sin embargo, en

la zona afectada, la vegetación ha sido completamente removida; por tanto, esto puede acelerar el proceso de erosión (Fig. 1).

Figura 1

Visualización frontal del deslizamiento con rumbo oeste a este y vista nadir a 400 a 500 metros de elevación del deslizamiento

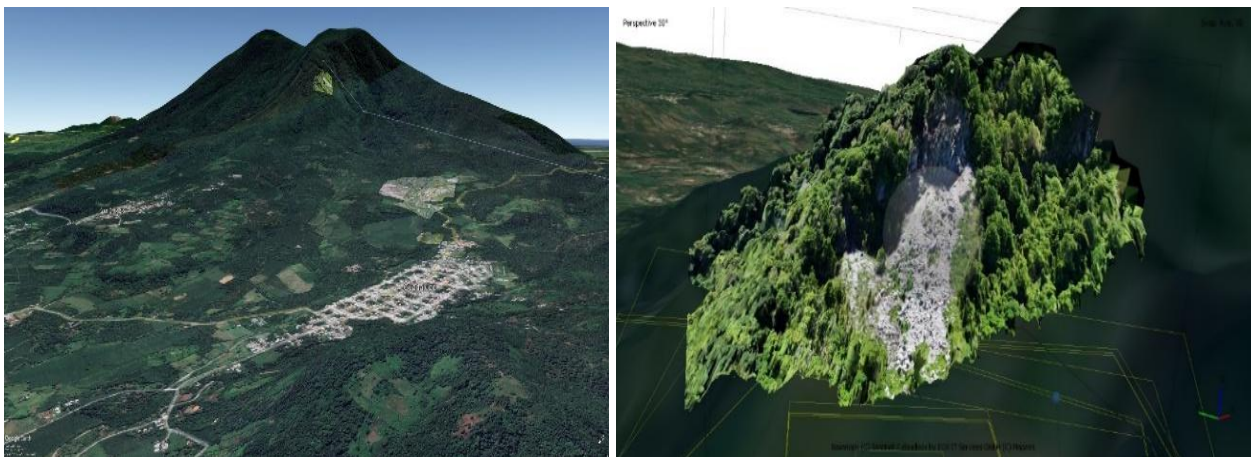


La zona se caracteriza por contar con bosques primarios en un área natural protegida en la zona más alta y de sistemas agroforestales como fincas de café en zonas intermedias y que se encuentran contiguos a cultivos de caña, granos básicos y hortalizas en menor medida en la zona baja del volcán.

El deslizamiento se acopla a la quebrada El Derrumbo como parte del drenaje con el que cuenta el edificio volcánico y que, a su vez, mantiene una trayectoria hacia el costado este del pueblo del distrito de Guadalupe. La modelación 3D a partir de fotogrametría con drone permitió constatar la alta densidad de vegetación como un buen indicador en la reducción del movimiento de masas o erosión y el riesgo asociado a este. También es posible diferenciar entre suelo descubierto a partir del movimiento de masas y vegetación, indicadores clave para determinar parámetros como longitud, área, ancho y pendiente (Fig. 2).

Figura 2

Trayectoria más próxima con posible afectación al distrito de Guadalupe (izquierda) y modelo 3D de la zona de estudio (Faces: 2,779,445 Vertices: 1,392,309)



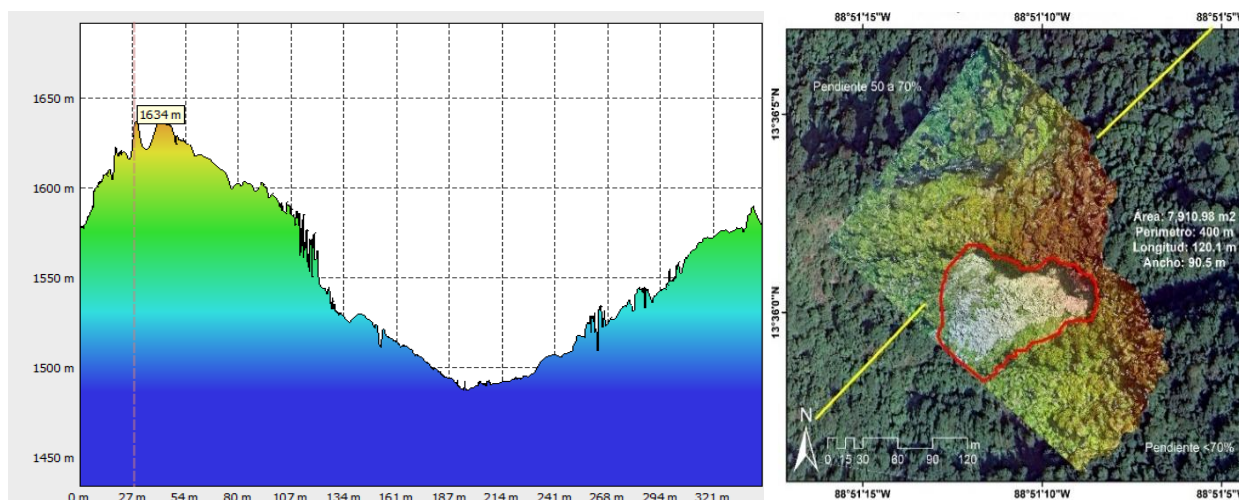
De manera complementaria, se estimó el volumen del material removido mediante el análisis de los modelos tridimensionales generados a partir de la fotogrametría UAV. Para ello, se delimitó el área afectada mediante polígonos digitales contruidos en Agisoft Metashape y contrastados en Pix4D y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para verificar la coherencia en las estimaciones volumétricas.

Posteriormente, se analizaron perfiles topográficos transversales obtenidos a partir del modelo tridimensional, identificando variaciones abruptas de elevación asociadas a zonas de remoción y acumulación de material. Con base en estas diferencias altimétricas y utilizando la herramienta Measure Volume de Agisoft Metashape, se estimó el volumen de material movilizado durante la evolución del deslizamiento.

Los resultados evidenciaron un incremento progresivo del área afectada y del volumen removido entre los diferentes periodos de observación, asociado a la persistencia de precipitaciones intensas y a la evolución geomorfológica del fenómeno. La estimación máxima alcanzó aproximadamente 191,410 m³ de material compuesto por rocas, suelos volcánicos y depósitos superficiales, lo que confirma la magnitud del evento y su potencial de afectación sobre las zonas localizadas aguas abajo.

Figura 3

Visualización transversal del movimiento de masas del deslizamiento analizado (izquierda) y zonificación de los parámetros físicos determinados

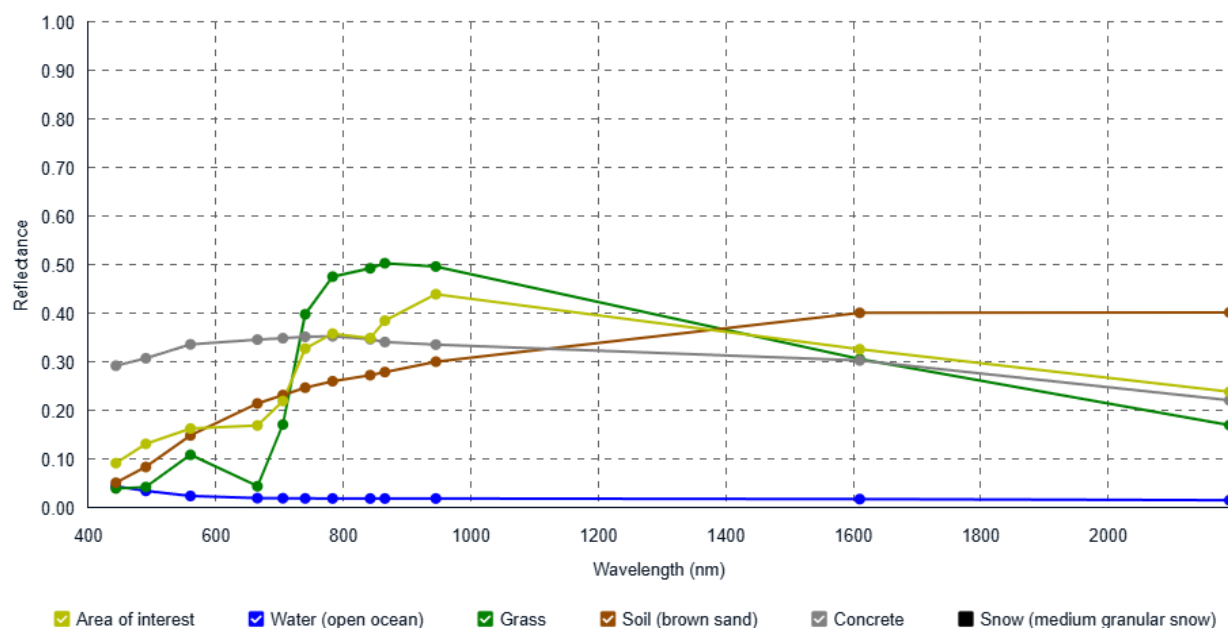


A una escala espacial y multitemporal mayor se analizó la firma espectral con imágenes del Sentinel-2 L2A correspondientes al 12 y 17 de noviembre de 2023, 14 de julio de 2024 y 05 de enero de 2025. Los valores de reflectancia en las longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano definen datos 0.1 a 0.4 en la región de 600 a 800 nm de las bandas B4, B3, B2 y la B8A correspondientes a áreas de suelo desnudo o materiales erosionados característicos de una zona afectada por el deslizamiento.

La baja reflectancia en el rango del espectro visible e infrarrojo corresponde usualmente a una alteración en la salud de la vegetación, ya que esta región analiza las estructuras internas de la vegetación desde el rojo y el infrarrojo (Fig. 4). Adicionalmente, se puede considerar que son suelos sueltos arenosos a partir de 3 a 5 metros y posteriormente compactados, lo que podría ser un resultado directo del movimiento del deslizamiento y posterior asentamiento.

Figura 4

Firma espectral del área del deslizamiento



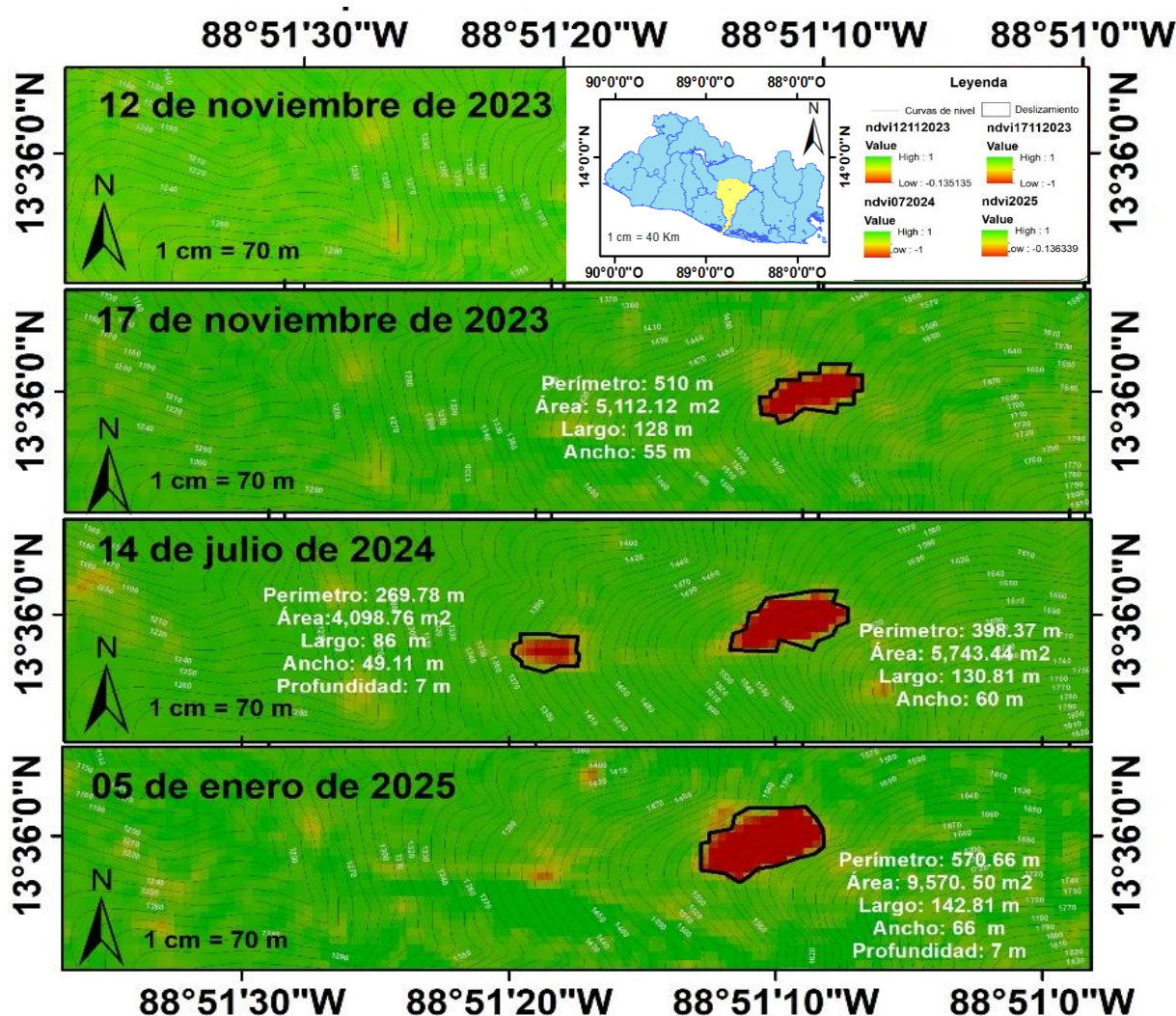
Asimismo, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de imágenes Sentinel-2 L2A con el propósito de evaluar el estado y la dinámica de la cobertura vegetal asociada al deslizamiento. Este índice se obtuvo utilizando las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo visible, permitiendo identificar variaciones en la vigorosidad de la vegetación y los procesos de recuperación natural posteriores al evento.

Los valores de NDVI obtenidos oscilaron entre -0.35 y valores positivos cercanos a 1. Los valores negativos y próximos a cero se concentraron principalmente en la zona de desprendimiento y en sectores con exposición de suelo, roca y material removido, mientras que los valores más altos se localizaron en áreas con cobertura boscosa circundante. La distribución espacial del índice permitió diferenciar claramente las superficies afectadas por el deslizamiento respecto a las áreas conservadas de vegetación densa.

Los resultados evidencian una disminución significativa de la cobertura vegetal en el escarpe principal y en las zonas de transporte del material, donde predominan superficies desnudas con baja actividad fotosintética. Por el contrario, las áreas periféricas presentaron valores elevados de NDVI, indicativos de vegetación saludable y bosques relativamente conservados. Esta información permitió complementar la caracterización biogeofísica del fenómeno y evaluar los procesos de degradación y recuperación de la cobertura vegetal asociados a la evolución multitemporal del deslizamiento (Fig. 5).

Figura 5

Análisis espectral con NDVI de la evolución del deslizamiento ocurrido en el distrito de Guadalupe del municipio de San Vicente Sur



La comparación multitemporal de los valores de NDVI sugiere procesos graduales de regeneración de la cobertura vegetal en algunos sectores del deslizamiento, aunque persisten áreas con escasa actividad fotosintética asociadas a la remoción reciente del material.

Tanto las imágenes obtenidas mediante UAV como las imágenes satelitales permitieron determinar y validar los principales parámetros biogeofísicos y morfométricos del deslizamiento, observándose variaciones espaciales asociadas a la evolución del fenómeno durante el período de estudio. Los parámetros geométricos fueron obtenidos a partir de polígonos digitales delimitados sobre los modelos fotogramétricos generados en Agisoft Metashape, corroborados mediante Pix4D y herramientas SIG.

Para la inspección realizada el 17 de noviembre de 2023, el deslizamiento principal presentó un perímetro de 310 m, un área de 5,112.12 m², una longitud de 128 m y un ancho promedio de 55 m. El análisis de perfiles topográficos y modelos tridimensionales permitió estimar un espesor medio de material removido de aproximadamente 3 m, resultando en un volumen estimado de 15,336.36 m³ de rocas, suelo volcánico y vegetación desplazada.

Durante la evaluación efectuada el 14 de julio de 2024 se evidenció una expansión del área afectada, asociada a las precipitaciones registradas durante la estación lluviosa. El deslizamiento principal alcanzó un perímetro de 398.37 m, un área de 5,743.44 m², una longitud de 130.81 m y un ancho promedio de 60 m. Asimismo, se identificó un segundo deslizamiento localizado aproximadamente a 200 m al oeste del evento principal, con un perímetro de 269.78 m, un área de 4,098.76 m², una longitud de 86 m y un ancho promedio de 49.11 m. A partir del análisis morfométrico y los perfiles de elevación se estimó un espesor de 7 m, obteniéndose un volumen aproximado de 28,691.32 m³ de material removido.

Finalmente, la inspección realizada el 05 de enero de 2025 evidenció una recuperación progresiva de la cobertura vegetal en el deslizamiento secundario, dificultando su identificación mediante algunas combinaciones espectrales de las imágenes satelitales. No obstante, el deslizamiento principal continuó mostrando signos de evolución geomorfológica, alcanzando un perímetro de 570.66 m, un área de 9,570.50 m², una longitud de 142.81 m y un ancho promedio de 66 m. El análisis volumétrico realizado mediante modelos tridimensionales y la herramienta Measure Volume de Agisoft Metashape permitió estimar un espesor máximo de 20 m y un volumen aproximado de 191,410 m³ de material removido, evidenciando un incremento significativo de la magnitud del fenómeno entre los diferentes periodos evaluados (Tabla 1).

Tabla 1

Parámetros físicos determinados del deslizamiento mediante teledetección

Parámetro	Fecha 17/11/2023	Fecha 14/07/2024	Fecha 05/01/2025
Altitud (msnm)	1490-1666	1490-1666	1490-1666
Pendiente (°)	70° >	70° >	70° >
Perímetro (m)	310	398.37	570.66 m
Largo (m)	128	130.81 m	142.81 m
Ancho (m)	55	60 m	66 m
Profundidad máxima observada (m)	3	7	20
Área (m ²)	5,112.12	5,743.44	9,570.50
Volumen (m ³)	15,336.36	28,691.32	191,410

También se obtuvo un Modelo Digital de Superficie (DSM) destinado para determinar los gradientes de elevación total del terreno o microrelieve incluyendo vegetación, árboles, rocas y estructuras con alta rugosidad superficial debido a la presencia de vegetación, canales de escorrentía y morfología del terreno.

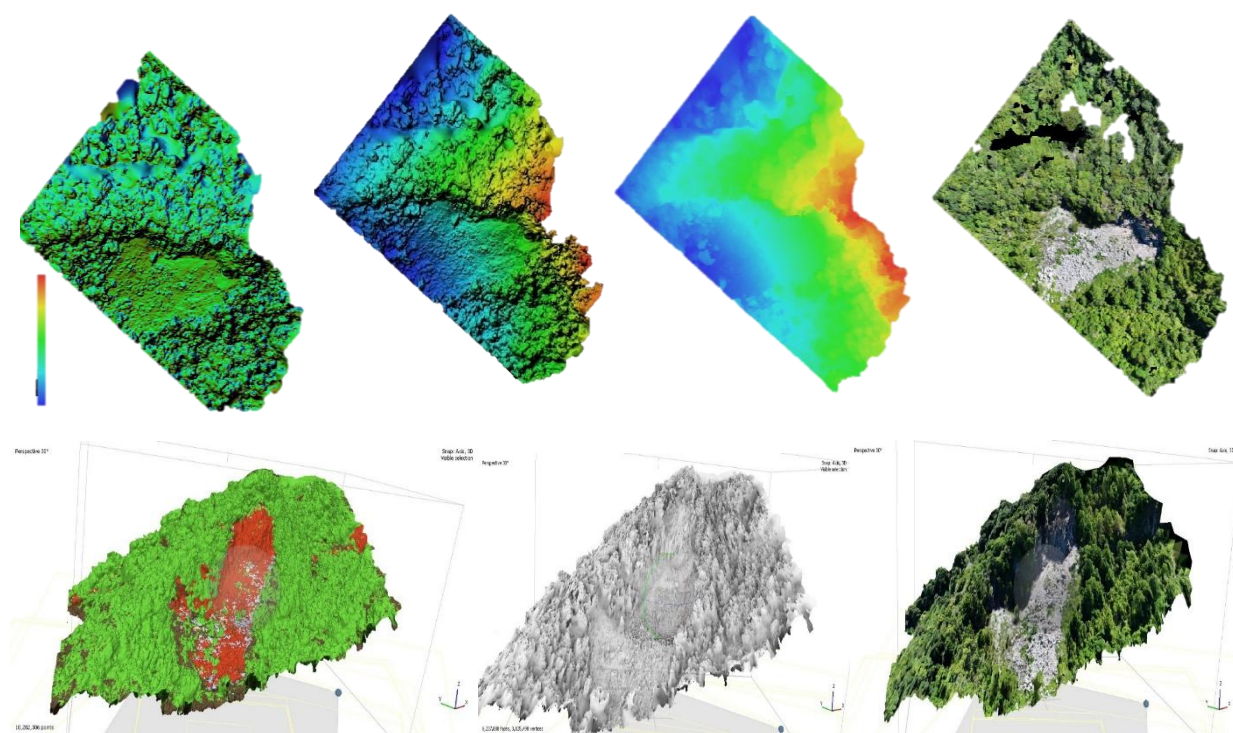
Similarmente un modelo Hillshade resultado del Modelo de Elevación Digital (DEM) que simula la iluminación solar artificial para resaltar la morfología del terreno, lo que permite observar los surcos de erosión y acumulación de material en el volcán, usualmente utilizado para estudiar fallas. El DEM a diferencia del DSM se le ha removido la cubierta de bosques para entender mejor la estructura del terreno y con el cual fue posible calcular las pendientes, la orientación de las laderas (Aspect) y esto a su vez la susceptibilidad a deslizamientos.

El mapa de pendiente derivado del DEM permitió identificar las zonas con mayor inclinación del terreno, las cuales constituyen áreas potencialmente susceptibles a procesos de inestabilidad. La distribución espacial de la pendiente evidenció que las zonas donde se originó el deslizamiento presentan inclinaciones elevadas, lo que favorece la ocurrencia de movimientos en masa bajo condiciones de saturación del suelo.

Por otra parte, se procesó un ortomosaico y se reconstruyó a partir de la nube de puntos el modelo 3D del terreno, así como un modelo texturizado logrando integrar datos con imágenes del satélite Sentinel-2 y análisis de índices espectrales para evaluar cambios en la cobertura vegetal antes y después del evento (Fig. 6).

Figura 6

Modelos de elevación y superficie digital, aspecto, hillshade, pendientes, ortomosaicos, modelos de confianza, mapa de oclusión y modelos 3D diseñados a partir de la fotogrametría del deslizamiento



Se identificó que la presencia de suelos volcánicos altamente meteorizados, combinada con condiciones de precipitación intensa características de regiones tropicales, constituye un factor importante que contribuye a la inestabilidad de las laderas. En este sentido, estudios previos han señalado que la interacción entre la topografía, la saturación del suelo y la cobertura vegetal desempeña un papel determinante en la ocurrencia de deslizamientos en ambientes volcánicos.

Ante esta situación y como parte de las estrategias en gestión de riesgos que buscan fortalecer la resiliencia de la comunidad se realizó un espacio de discusión con los actores clave de la zona para mostrar la información y valoraciones resultantes del análisis del riesgo por deslizamiento.

Al espacio asistieron actores clave en la gestión de riesgo, gobernanza municipal, líderes comunitarios, observadores locales y voluntarios que forman parte del sistema nacional de protección civil tanto a nivel municipal como comunitario bajo el marco de actuación de las diferentes comisiones y la gestión del riesgo de desastres.

Se estableció un espacio de discusión en materia de prevención de riesgos con la finalidad de promover la concientización de la población, así como abordar las problemáticas a ser atendidas. De esta manera, al valorar la participación de los actores clave se pudieron identificar deficiencias en materia de disponibilidad de recursos para la atención de emergencias, implementos de radiocomunicación para la difusión inmediata de alertas y baja organización comunitaria. Asimismo, se planteó la necesidad de mantener un acompañamiento desde el enfoque de la gobernanza local, la evaluación de las amenazas y el monitoreo continuo ante eventos naturales extremos.

En el contexto de la gestión del riesgo de desastres, la información generada mediante este tipo de análisis representa un insumo fundamental para apoyar la planificación territorial, la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos y el diseño de estrategias de mitigación orientadas a reducir la vulnerabilidad de las comunidades ubicadas en áreas de montaña.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar biogeofísicamente un deslizamiento rotacional localizado en el cono occidental del volcán San Vicente, evidenciando la interacción entre factores geomorfológicos, geológicos, hidrológicos y biológicos que condicionan la inestabilidad de laderas en ambientes volcánicos tropicales. La zona afectada presentó pendientes superiores a 70° , elevaciones comprendidas entre 1490 y 1666 msnm, materiales volcánicos poco consolidados, cobertura boscosa densa y una evolución espacial progresiva del fenómeno entre noviembre de 2023 y enero de 2025. Asimismo, el análisis multitemporal mediante fotogrametría UAV, modelos digitales de elevación y el índice NDVI permitió identificar cambios en la morfología del terreno, la remoción de material y los procesos de recuperación de la cobertura vegetal, evidenciando la utilidad de las técnicas de teledetección para la caracterización integral de movimientos en masa.

Las características observadas coinciden con lo reportado por Hungr et al. (2014), quienes establecen que los deslizamientos rotacionales suelen desarrollarse en materiales susceptibles a la deformación cuando existen condiciones de saturación hídrica y pendientes pronunciadas. En el caso del volcán San Vicente, la presencia de depósitos volcánicos meteorizados y suelos poco consolidados favorece el desarrollo de superficies de ruptura y desplazamientos gravitacionales, condición también documentada por García Flórez (2016) para diversos sectores de El Salvador afectados por procesos de remoción en masa.

La influencia de la precipitación como principal factor desencadenante observada en este estudio concuerda con Gariano y Guzzetti (2016), quienes demostraron que los cambios en los patrones de precipitación y los eventos extremos incrementan significativamente la frecuencia y magnitud de los deslizamientos. De manera similar, Ehsan et al. (2025) identifican la precipitación intensa, la saturación del suelo y la pendiente como los principales factores condicionantes de la susceptibilidad a deslizamientos a escala global. Los registros de lluvia superiores a 70 mm h^{-1} observados durante la ocurrencia del evento respaldan esta relación y evidencian la sensibilidad de las laderas volcánicas del área de estudio frente a episodios hidrometeorológicos extremos.

La evolución geomorfológica observada mediante el incremento progresivo del área, perímetro y volumen del deslizamiento coincide con los patrones descritos por Ormaetxea Arenaza et al. (2017), quienes documentaron la ampliación gradual de escarpes rotacionales a partir de procesos sucesivos de erosión y remoción de material. Asimismo, los resultados son consistentes con los planteamientos de Spencer et al. (2016), quienes destacan que las lluvias extremas modifican continuamente la morfología de las laderas y favorecen procesos de retroceso de escarpes y reactivación de movimientos previos.

Desde la perspectiva metodológica, la utilización de fotogrametría UAV demostró una elevada capacidad para caracterizar la morfología del deslizamiento mediante ortomosaicos, nubes de puntos densas, modelos digitales de superficie y modelos digitales de elevación. Estos hallazgos coinciden con Westoby et al. (2012), quienes reconocen la técnica Structure from Motion (SfM) como una herramienta de bajo costo y alta precisión para el análisis geomorfológico. Del mismo modo, Albanwan et al. (2024) señalan que los modelos tridimensionales derivados de drones constituyen actualmente una de las metodologías más eficaces para la evaluación detallada de deslizamientos, especialmente en áreas de difícil acceso.

La generación de modelos digitales permitió además estimar parámetros morfométricos fundamentales para la caracterización del fenómeno. En este sentido, Fossi y Tatchinda Lonkeng (2025) destacan que la integración de UAV y SIG facilita la cuantificación de dimensiones, volúmenes y patrones espaciales de los deslizamientos con un nivel de detalle superior al obtenido mediante métodos tradicionales. Similarmente, Casagli et al. (2023) sostienen que la combinación de técnicas de observación terrestre y teledetección constituye actualmente el estándar para la detección, monitoreo y análisis de procesos de inestabilidad de laderas.

Los resultados obtenidos mediante el análisis NDVI permitieron identificar sectores con pérdida de cobertura vegetal asociados a la zona de desprendimiento y transporte del material, así como áreas con procesos de regeneración natural posteriores al evento. Esta observación coincide con Novellino et al. (2024), quienes señalan que los índices espectrales derivados de sensores ópticos constituyen herramientas eficaces para detectar alteraciones de la cobertura terrestre producidas por deslizamientos. Asimismo, Emberson (2025) y NASA (2023) destacan que la integración de imágenes satelitales multitemporales permite monitorear la recuperación de la vegetación y la evolución espacial de áreas afectadas por amenazas geológicas.

La evidencia obtenida también guarda relación con estudios desarrollados a escala regional. Rose et al. (2004) y Major et al. (2004) documentaron que los volcanes San Vicente, San Salvador y San Miguel presentan condiciones geomorfológicas propicias para la generación de flujos de escombros y movimientos en masa debido a la combinación de pendientes pronunciadas, materiales volcánicos poco consolidados y lluvias intensas. De igual forma, Bommer et al. (2002) demostraron que las laderas volcánicas salvadoreñas presentan una elevada susceptibilidad a procesos de remoción en masa cuando interactúan factores sísmicos e hidrometeorológicos.

Los hallazgos obtenidos presentan además implicaciones relevantes para la gestión del riesgo de desastres. La identificación de sectores inestables, zonas de acumulación de material y procesos de recuperación de la vegetación proporciona información útil para la planificación territorial y la reducción del riesgo. En este sentido, Intrieri et al. (2013) destacan que la caracterización detallada de amenazas constituye un elemento fundamental para el diseño de sistemas de alerta temprana, mientras que CEPAL (2024) y Marinero Orantes (2024) señalan que la incorporación de información científica en los procesos de gobernanza local fortalece la resiliencia comunitaria frente a amenazas naturales.

En conjunto, la comparación con investigaciones nacionales e internacionales permite establecer un consenso respecto a que la ocurrencia y evolución del deslizamiento estudiado responde a la interacción entre precipitaciones extremas, pendientes elevadas, materiales volcánicos susceptibles a la erosión y cambios en la cobertura vegetal. Asimismo, se confirma que la integración de fotogrametría UAV, teledetección satelital y análisis geoespacial constituye una metodología robusta para la caracterización biogeofísica de movimientos en

masa en ambientes volcánicos tropicales, aportando información relevante para la gestión del riesgo de desastres.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran la ausencia de información geotécnica directa del subsuelo, la falta de mediciones instrumentales continuas sobre desplazamientos y humedad del terreno, y las restricciones operativas para la adquisición de imágenes UAV durante eventos de precipitación extrema. Adicionalmente, la presencia de vegetación densa introduce incertidumbres inherentes en la generación de modelos digitales derivados exclusivamente de imágenes RGB. Investigaciones futuras deberían incorporar sensores LiDAR, técnicas InSAR, monitoreo hidrometeorológico continuo y análisis geotécnicos detallados que permitan comprender con mayor precisión los mecanismos de inestabilidad y evaluar la influencia de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del trópico Sur sobre la evolución de los deslizamientos en el volcán San Vicente.

5. CONCLUSIONES

Las herramientas de teledetección, mediante la aplicación de imágenes satelitales, índices espectrales y fotogrametría con drone permitieron validar los datos físicos del deslizamiento y el movimiento de flujos de escombros mediante una clasificación por los valores de reflectancia de los píxeles. Con ello, se estima que el deslizamiento representa una amenaza de riesgo moderado por su gran magnitud hasta donde se tiene registro. Asimismo, fue posible generar una línea base de los cambios en la reflectancia y los patrones de regeneración o degradación de la vegetación en el área. Al considerar esto e integrar datos espectrales con modelos de predicción de deslizamientos se logra alertar sobre escenarios adversos y concientizar a las comunidades vulnerables en caso de lluvias intensas, sismos y, en menor medida, actividad volcánica.

La proyección realizada con Sistemas de Información Geográfica muestra que la trayectoria posible es al noroeste en dirección a Guadalupe. Esto se debe al acople de las quebradas más próximas y al converger en la quebrada El Derrumbo que conduce a Guadalupe. Por ello, las comunidades en el sitio en mención se encuentran vulnerables ante el incremento del riesgo por amenaza de deslizamiento principalmente en la época lluviosa. Hasta el momento no se ha realizado ninguna medida de mitigación en la zona de deslizamiento que permita aminorar la evolución o incremento de este y debido a las pendientes pronunciadas y lo inaccesible de la zona no resulta factible el poder realizarlas.

Al analizar los modelos y la geolocalización con sistemas de información geográfica, se determina que, si bien existió un incremento del tamaño del deslizamiento en las primeras inspecciones, es posible que las condiciones neutrales de la Oscilación del Sur (ENSO-ENOS), con lluvias dentro de lo normal, hayan permitido una restauración paulatina de la vegetación con una disminución en el riesgo de deslizamiento. Se espera que la vegetación se restablezca lentamente por las condiciones de las pendientes pronunciadas y la exposición del sustrato rocoso. No obstante, al establecerse condiciones de La Niña, los altos acumulados de lluvia agravarían el movimiento en masa e incrementarían el riesgo por deslizamiento.

Se estima que podría haber fracturas subyacentes, facilitando futuros colapsos y la infiltración de agua en las grietas del terreno generando inestabilidad adicional debido al aumento de presión intersticial y que, por lo tanto, no se descarta el incremento de este fenómeno ante lluvias intensas por fenómenos hidrometeorológicos o fuertes sismos por la actividad tectónica principalmente. Bajo estas condiciones se estima que es latente la posibilidad de que la trayectoria sea al noroeste en dirección a Guadalupe. Esto debido al acople de las

quebradas más próximas y al converger en la quebrada El Derrumbo que conduce a Guadalupe. Por lo que, las comunidades en el sitio en mención se encuentran vulnerables ante el incremento de riesgo por amenaza de deslizamiento principalmente en la época lluviosa.

Estos recursos dilucidaron la comprensión de la amenaza de deslizamientos en el contexto volcánico para la planificación y mitigación de desastres para la toma de decisiones relacionadas con la ubicación de asentamientos humanos, la gestión de riesgos y la respuesta a eventos sísmicos. No se descarta que se suscite el movimiento de masas que pueda afectar a las comunidades ubicadas ante lluvias intensas principalmente al inicio (junio) y al final de la época lluviosa (octubre). Por otra parte, el incremento del riesgo de deslizamiento por actividad sísmica, activación de fallas o actividad volcánica es menor con periodos de retorno de eventos intensos de 30 a 40 años, como el terremoto de 2001, que dejó registros y afectaciones en la zona de estudio.

Se recomienda mantener un monitoreo continuo de la evolución del deslizamiento, especialmente durante el inicio y desarrollo de la época lluviosa, con el fin de identificar oportunamente cambios morfológicos, procesos de reactivación y posibles incrementos en la amenaza. Asimismo, resulta conveniente evaluar la factibilidad técnica y ambiental de implementar medidas de mitigación orientadas a reducir el riesgo para las comunidades expuestas, complementadas con el fortalecimiento de los planes comunitarios de prevención, preparación y respuesta ante emergencias, promoviendo la sensibilización, organización y participación de los actores locales para fortalecer sus capacidades resilientes.

Finalmente, se recomienda desarrollar investigaciones complementarias mediante tecnologías LiDAR y otras técnicas de alta precisión que permitan mejorar la caracterización topográfica del terreno, reducir las incertidumbres asociadas a la cobertura vegetal y fortalecer las evaluaciones prospectivas del riesgo por deslizamientos en el volcán San Vicente.

Conflicto de intereses/Competing interests:

Los autores declaran que no incurren en conflicto de intereses.

Rol de los autores/Authors roles:

Gerson Cornejo-Reyes: Conceptualización, metodología, software, validación, curación de datos, análisis formal, investigación, recursos, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición, visualización, supervisión, administración del proyecto, adquisición de fondos.

Carlos Funes-Guadrón: Conceptualización, validación, recursos, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición, adquisición de fondos.

Fuentes de financiamiento/Funding:

Los autores declaran que no recibieron un fondo específico para esta investigación.

Aspectos éticos/legales/Ethics/legals:

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos, ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Albanwan, H., Qin, R., & Liu, J. K. (2024). Remote sensing-based 3D assessment of landslides: A review of the data, methods, and applications. *Remote Sensing*, 16(3), 455. <https://doi.org/10.3390/rs16030455>
- Bommer, J. J., Benito, M. B., Ciudad-Real, M., Lemoine, A., López-Menjívar, M. A., Madariaga, R., Mankelow, J., Méndez de Hasbun, P., Murphy, W., Nieto-Lovo, M., Rodríguez-Pineda, C. E., & Rosa, H. (2002).

- The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(5), 389-418. [https://doi.org/10.1016/s0267-7261\(02\)00024-6](https://doi.org/10.1016/s0267-7261(02)00024-6)
- Carr, M. J., Feigenson, M. D., Patino, L. C., & Walker, J. A. (2004). Volcanism and geochemistry in Central America: Progress and problems. En J. Eiler (Ed.), *Inside the Subduction Factory* (pp. 153–174). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/138GM09>
- Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., Gigli, G., & Raspini, F. (2023). Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 51-64. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>
- Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S., & Tofani, V. (2013). Landslide susceptibility estimation by random forests technique: Sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2815-2831. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2815-2013>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2024). *Evaluación del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. <https://www.undrr.org/media/103787>
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Ehsan, M., Anees, M. T., A Bakar, A. F. B., & Ahmed, A. (2025). A review of geological and triggering factors influencing landslide susceptibility: Artificial intelligence-based trends in mapping and prediction. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(16), 17347-17382. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06741-6>
- Emberson, R. (18 de marzo de 2025). *Landslide monitoring and risk assessment using NASA Earth System Data: Part 3—Remote sensing and landslide susceptibility*. NASA Applied Remote Sensing Training Program. <https://earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2025-06/arset-landslides-part3-slides.pdf>
- Fossi, D. H., & Tatchinda Lonkeng, D. S. (2025). Landslide detection and monitoring using remote sensing techniques. En R. M. Abdalla (Ed.), *Exploring remote sensing—Methods and applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007652>
- Froude, M., & Petley, D. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- García Flórez, I. (2016). *Factores geológicos-geotécnicos que controlan los deslizamientos inducidos por terremotos en zonas de alta y media actividad sísmica: caso de El Salvador* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional de la Universidad Complutense de Madrid. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/27375>
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Global Volcanism Program. (2023). *San Vicente volcano*. Smithsonian Institution. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=343090>

- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook: A guide to understanding landslides* (Version 1.0, U.S. Geological Survey Circular 1325). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/cir1325>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hussain, M. A., Chen, Z., Zhou, Y., Meena, S. R., Ali, N., & Shah, S. U. (2025). Landslide susceptibility mapping using artificial intelligence models: A case study in the Himalayas. *Landslides*, 22(6), 2089-2103. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02466-2>
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147-148, 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017>
- Jiang, P., Ma, Z., & Mei, G. (2026). Review article: Deep learning for potential landslide identification: Data, models, applications, challenges, and opportunities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 26(1), 487-529. <https://doi.org/10.5194/nhess-26-487-2026>
- Khan, B. A., & Khan, S. A. (2025). Integrating earth observation and deep learning for next-generation landslide mapping: A comprehensive review of 2024 advances. *Journal of Geography and Cartography*, 8(3), 11553. <https://doi.org/10.24294/jgc11553>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Major, J. J., Schilling, S. P., Pullinger, C. R., & Escobar, C. D. (2004). Debris-flow hazards at San Salvador, San Vicente, and San Miguel volcanoes, El Salvador. En W. I. Rose, J. J. Bommer, D. L. López, M. J. Carr, & J. J. Major (Eds.), *Natural hazards in El Salvador* (pp. 89–108). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.89>
- Marinero Orantes, E. A. (2024). La gestión integral del riesgo de desastres comunitaria ante los riesgos volcánicos: Caso volcán San Vicente, El Salvador, América Central. En J. M. Camacho-Sanabria, R. Chávez-Alvarado, & Y. G. Canchola-Pantoja (Eds.), *Gestión del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe: Experiencias, aprendizajes y desafíos* (pp. 189-210). Universidad de Guadalajara. <https://doi.org/10.52501/cc.218.06>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Descripción y cronología de la depresión tropical 12E y sistema depresionario sobre El Salvador*. MARN. <https://rcc.marn.gob.sv/handle/123456789/137>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Informe nacional del estado de los riesgos y vulnerabilidades*. MARN. <https://rcc.marn.gob.sv/handle/123456789/9>
- National Aeronautics and Space Administration. (2022). *Disaster assessment using synthetic aperture radar*. Applied Remote Sensing Training Program. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/trainings/disaster-assessment-using-synthetic-aperture-radar>



- National Aeronautics and Space Administration. (2025). *Landslide monitoring and risk assessment using NASA Earth System Data*. NASA. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/trainings/landslide-monitoring-risk-assessment-using-nasa-earth-system-data>
- Nava, L., Mondini, A., Bhuyan, K., Fang, C., Monserrat, O., Novellino, A., & Catani, F. (2026). Sentinel-1 SAR-based globally distributed co-seismic landslide detection by deep neural networks. *Geoscientific Model Development*, 19(1), 167–185. <https://doi.org/10.5194/gmd-19-167-2026>
- Novellino, A., Pennington, C., Leeming, K., Taylor, S., Alvarez, I. G., Mcallister, E., Arnhardt, C., & Winson, A. (2024). Mapping landslides from space: A review. *Landslides*, 21(5), 1041–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x>
- Ormaetxea Arenaza, O., Barroso Arroyo, J. C., & Sáenz de Olazagoitia Blanco, A. (2017). Caracterización geomorfológica y análisis de la evolución del deslizamiento rotacional de Andoin, Sierra de Entzia (País Vasco). *Cuaternario y Geomorfología*, 31(3–4), 7–26. <https://doi.org/10.17735/cyg.v31i3-4.55240>
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927–930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Podest, E. (2022). *SAR for flood mapping*. NASA Applied Remote Sensing Training Program. https://earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2025-08/ARSET-DisasterAssessment2022-part1-slides_0.pdf
- Podest, E., Hook, E., McCartney, S., Mehta, A., & Fielding, E. (2019). *Remote sensing for disasters scenarios*. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/trainings/remote-sensing-disasters-scenarios>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Rose, W. I., Bluth, G. J. S., Carr, M. J., Ewert, J. W., Patino, L. C., & Vallance, J. W. (Eds.). (2006). *Volcanic hazards in Central America* (Geological Society of America Special Paper 412). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE412>
- Rose, W. I., Bommer, J. J., López, D. L., Carr, M. J., & Major, J. J. (Eds.). (2004). *Natural hazards in El Salvador* (Geological Society of America Special Paper 375). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE375>
- Scott, K. M., Macías, J. L., Naranjo, J. A., Rodríguez, S., & McGeehin, J. P. (2001). *Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: Mobility, hazard assessment, and mitigation strategies* (U.S. Geological Survey Professional Paper 1630). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/pp1630>
- Singh, K., Bhardwaj, V., Sharma, A., & Thakur, S. (2024). A comprehensive review on landslide susceptibility zonation techniques. *Quaestiones Geographicae*, 43(1), 79–91. <https://doi.org/10.14746/quageo-2024-0005>
- Spencer, T., Naylor, L. A., Lane, S. N., Darby, S. E., Macklin, M. G., Magilligan, F. J., & Möller, I. (2016). Stormy geomorphology: An introduction to the special issue. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 238–241. <https://doi.org/10.1002/esp.4065>

- Stanley, T., & Kirschbaum, D. (2017). A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 87, 145–164. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y>
- United States Geological Survey. (s.f.). *Landslide hazards program*. USGS. <https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' Photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

