

Análisis comparativo de técnicas de levantamiento topográfico del colapso de talud en Zámbez – Quito

Comparative analysis of topographic survey techniques of the slope collapse in Zámbez – Quito

Edmundo Marcelo Calderón Viveros¹, Carolina Alexandra Freire Guerrero²,
Kerby Renato Harnisth Mosquera¹,
Tomoyuki Nishikawa², Hirozaku Furuki², Jie Zhang²

- ¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito - Ecuador.
E-mail: edmundo.calderon@geoenergia.gob.ec; kerby.harnisth@geoenergia.gob.ec.
- ² Nippon Koei Co. Ltd. Tokio - Japón. carolalexa@gmail.com,
nishikawa-ty@n-koei.jp, a5962@n-koei.co.jp, zhang-ji@n-koei.jp

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: : 21-08-2024

Fecha de aceptación: 21-05-2025

Resumen

El estudio refleja los resultados de la comparación de dos métodos de levantamiento topográfico de zonas propensas a la ocurrencia de un movimiento en masa. Considerando que la topografía y el análisis morfométrico son insumos esenciales en la caracterización de los fenómenos de remoción en masa, es necesario conocer si la tecnología emergente de levantamiento utilizando Vehículos Aéreos No Tripulados, (VANT), mantiene la precisión requerida; para lo cual se comparan los productos topográficos aerofotogramétricos realizados mediante (VANT), del colapso de talud en Zámbez (Av. Las Palmeras), al centro norte de Quito, con los resultados del levantamiento realizado, la misma fecha y lugar, con Escáner Laser 3D, que es el método de levantamiento topográfico más preciso y detallado conocido en la actualidad.

Palabras clave: Movimientos en masa, Escáner Láser 3D, Drones, Topografía, Geomática

Abstract

The study presents the results of a comparison between two methods for topographic surveying of susceptible areas or those in which a mass movement has already occurred. Considering that topography and morphometric analysis are of the main inputs in the characterization of mass removal phenomena, it is necessary to know if the emerging survey technology using Unmanned Aerial Vehicles (UAV), maintains the required precision; for which the aerial photogrammetric topographic products carried out by (UAV) of the Slope Failure in Zámbez (Av. Las Palmeras), in the north center of Quito, are compared with the results of the survey carried out, on the same date and place, with a 3D Laser Scanner, which is the most accurate and detailed surveying method known today.

Keywords: Mass movements, 3D Laser Scanner, Drones, Topography, Geomatics

1. INTRODUCCIÓN

La topografía es la ciencia que trata los principios y métodos por medio de los cuales se logran establecer las posiciones relativas de puntos de la superficie terrestre, encima y debajo de ella [1]. Como disciplina, tiene raíces antiguas que se remontan a las civilizaciones egipcia, griega y romana, donde se utilizaban métodos rudimentarios para medir y cartografiar la tierra. Sin embargo, el desarrollo de la topografía como ciencia moderna comenzó a tomar forma durante el Renacimiento y la era de la Ilustración [2].

La topografía se ha convertido en una ciencia interdisciplinaria que combina la física, la matemática, la ingeniería y la informática. Tiene un campo de aplicación muy amplio, que incluyen: la planificación urbana, mediciones de terrenos para determinar sus linderos, la ingeniería civil, localización de proyectos viales, la gestión de recursos naturales, control de trabajos subterráneos, levantamientos catastrales, topografía hidrográfica, la gestión de desastres, entre otros [3].

La integración de datos geospaciales con modelos digitales de elevación y tecnologías de información geográfica (SIG), ha ampliado aún más las capacidades de la topografía moderna. Es así que, actualmente, los levantamientos topográficos desempeñan un papel fundamental en los estudios de movimientos en masa, fenómenos geológicos definidos, en la Guía Para la Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa del Proyecto Multinacional Andino (PMA), como todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad [4].

La complejidad de los procesos de movimientos en masa requiere que para su análisis y representación sea necesario considerar tanto sus características espaciales

como las temporales [5]. En ese sentido, la topografía proporciona información detallada sobre la forma y la elevación del terreno, a fin de identificar laderas con pendientes pronunciadas, cambios bruscos en la morfología, materiales geológicos inestables; y, detectar deformaciones o desplazamientos sutiles del terreno, que podrían indicar la actividad de un movimiento en masa.

En el ámbito temporal, los levantamientos topográficos repetidos sobre una misma área permiten obtener datos cuantitativos sobre la velocidad y dirección del movimiento del terreno, los cuales pueden ser indicativos de procesos de inestabilidad activa o movimientos en masa inminentes. Para reforzar la precisión del monitoreo, se instalan testigos o hitos georreferenciados, que son monitoreados de forma permanente para detectar desplazamientos milimétricos en el terreno a lo largo del tiempo. Además, con la integración de modelos numéricos avanzados, como modelos geotécnicos y de estabilidad de pendientes, es posible simular y predecir el comportamiento de los movimientos en masa bajo distintos escenarios climáticos y condiciones de carga, fortaleciendo así, la capacidad de alerta temprana y toma de decisiones [6].

Con lo descrito, el objetivo del presente estudio es realizar una comparación, de validación, de dos métodos utilizados en la actualidad para realizar levantamientos topográficos de zonas susceptibles o donde ya ha ocurrido un movimiento en masa. El primer método, considerado de los más precisos, será tomado como base, y el segundo, una tecnología de pronta respuesta que ofrece a más de precisión, velocidad. Se trata de los levantamientos topográficos con escáner láser 3D portable y, con vehículos aéreos no tripulados VANT, o dron, con funcionalidad RTK (*Real Time Kinematic*), respectivamente.

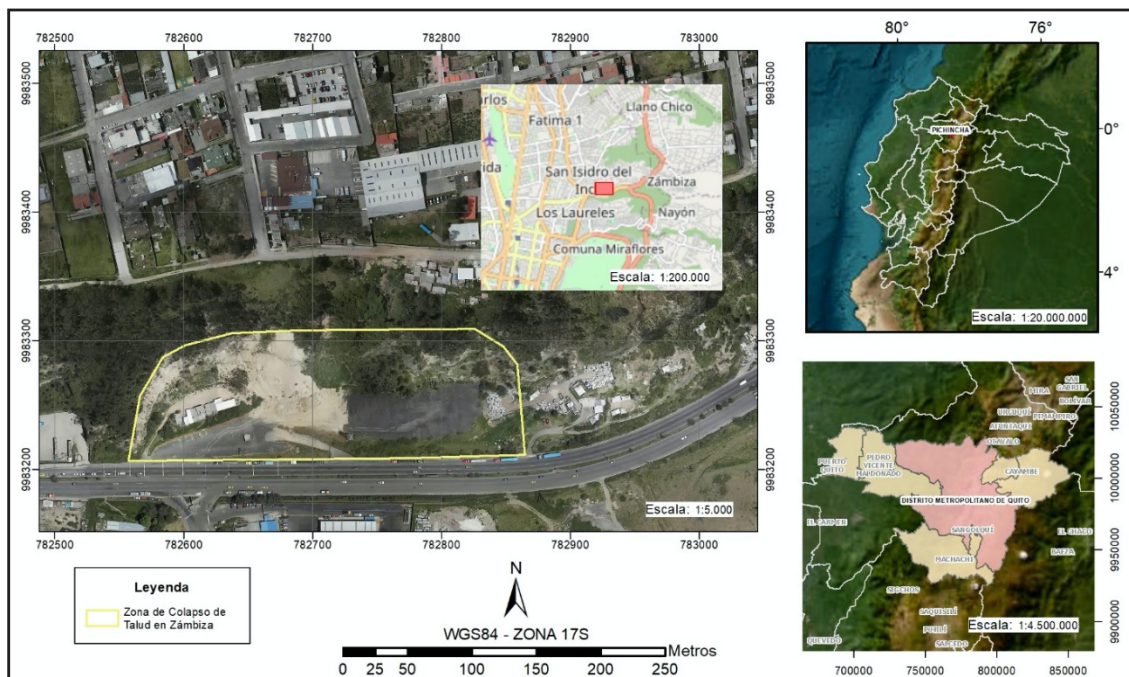


Figura 1: Mapa de ubicación del sitio de colapso del talud [7].

Para la concreción del objetivo se plantea la comparación de las nubes de puntos y los modelos digitales del terreno (MDT), para evaluar sus diferencias y precisión, en una misma área geográfica. Esta comparación es esencial para validar la exactitud de los modelos digitales, asegurando que representen el terreno de manera precisa y útil para aplicaciones geoespaciales y estudios topográficos relacionados con movimientos en masa.

El área de estudio se localiza en el sector de Zambiza, parroquia Jipijapa, cantón Quito, provincia de Pichincha; específicamente en la Av. De Las Palmeras (arteria vial principal que conecta a la Av. Simón Bolívar), y Av. Eloy Alfaro (Fig.1). Predio que funcionaba como parqueadero público “Borde del Pico y Placa” y donde el día 27 de febrero de 2023, un colapso del talud sepultó al menos once (11) vehículos [8].

En este sentido, en el marco del "Proyecto para el Desarrollo de Capacidades para la Reducción del Riesgo de Desastres en Laderas a Nivel Técnico y Territorial" de la Cooperación Internacional de Japón, en colaboración con el Instituto Investigación Geológico Energético (IIGE) y el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ), se realizó el inventario de movimientos en masa en la ciudad de Quito, donde se incluyó el colapso en mención. El inventario consistió en la inspección de campo y la toma de medidas morfométricas para evaluar los riesgos asociados al movimiento en masa.

La caracterización del movimiento en masa revela que se trata de un evento de tipo colapso, cuya definición corresponde a un talud que pierde su capacidad de retención, cuando el suelo se debilita debido a la saturación de agua, especialmente después de las lluvias y colapsa de forma repentina e imprevisible. Debido a esto y a su rápido movimiento, la gente apenas puede escapar de él, si la zona residencial está cerca del pie del talud, lo que puede representar daños significativos para infraestructuras y la vida [9].

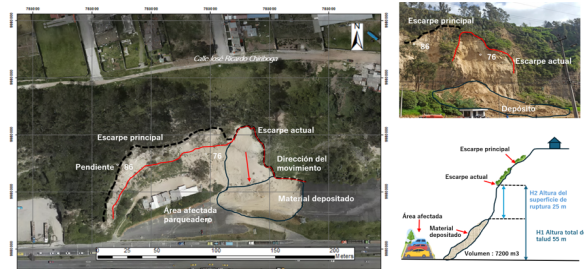
El evento ocurrido en Zambiza (Av. Las Palmeras) se caracterizó por un colapso significativo, con una altura total del talud de 55 metros. La superficie de ruptura, que marcó el inicio del colapso tenía una longitud de 25 metros y una profundidad de 4 metros. La masa desplazada se extendió a lo largo de 17 metros y alcanzó una profundidad de hasta 13 metros. El volumen total de material desplazado fue de 7 200 metros cúbicos, con un ancho de la superficie de ruptura de 23 metros y un ancho de la masa desplazada de 40 metros. La distancia de alcance de los sedimentos desde la base del talud fue de 7 metros (Fig. 2) [10].

El colapso en el área afectada se debió a una combinación de factores geológicos y materiales. La pendiente pronunciada de 76°, junto con una estructura geológica a favor del buzamiento inverso, hizo que el talud fuera particularmente inestable. El terreno estaba compuesto principalmente de cenizas volcánicas, cangahua (cenizas

cementadas con caliza), tobas alteradas, pómez y paleosuelos. Estos materiales, aunque relativamente estables en condiciones secas, fueron debilitados por la infiltración de agua. Las cenizas y la pómez, siendo altamente permeables, permitieron la saturación del suelo, reduciendo la cohesión y aumentando el riesgo de deslizamientos. La cobertura vegetal en el área estaba dominada por arbustos, los cuales proporcionaron un efecto estabilizador limitado en relación a las pendientes tan pronunciadas. El uso del suelo es urbano, lo que complicó la gestión del riesgo y aumentó el impacto del colapso [10].

En cuanto a los daños, no se reportaron víctimas humanas; no hubo fallecidos, desaparecidos ni heridos. Como medida temporal para mitigar los efectos del colapso, el MDMQ llevó a cabo una limpieza de escombros para remover el material desplazado y restaurar la funcionalidad del área afectada [10].

HOJA DE INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA (Colapso y Colapso de río)						
ID movimiento en masa		CO17012023MAR0983				
Nombre del movimiento en masa		Zamiza - Parqueadero		Hora evento		19h10
Inspector	IIGE	Fecha i	28-02-23	Fecha evento	27/02/2023	
1. Información de ubicación del movimiento en masa						
1.1 Provincia	PICHINCHA		1.2 Cantón	QUITO		
1.3 Coordenadas / Punto de Referencia	Superior	Medio	SI	Inferior		
LatitudUTM Y	9983268	LongitudUTM X	782663	Elev. (msnm)	2824	



5. Características del movimiento en masa						
Colapso		SI	Colapso de río			
Altura total del talud (H) (m)	55	Altura de la superficie de ruptura	25			
Longitud de la superficie de ruptura	21	Longitud de la masa desplazada	17			
Distancia de alcance de sedimentos	7	Pendiente del talud grado (θ) (°)	76			
Longitud de la superficie de ruptura	67	Profundidad superficie de ruptura	4			
Profundidad de masa desplazada	13	Volumen de masa desplazada (V)	7200			
Ancho de la superficie de ruptura	23	Ancho de masa desplazada (W)	40			
Distancia desde la base del talud hasta el río (L) (m) (solo colapso de río)						
Distancia desde la primera casa hasta la parte superior c				Velocidad de colapso estimada (cm/año)		
Factores condicionantes						
Litología, pendiente		Factor disparador		Infiltración de agua		
Material	Roca	Escombros	Suelo	SI	Litología	Ceriza, cangahua
Estruc. talud	A favor del buzamiento	SI	Buzamiento Inverso	Ninguna		
Tipo de talud	Talud Natural	Talud de corte		SI	Talud de Relleno	
Humedad visual estimada	Mojado	Medio		SI	Seco	
Tipo de Erosión	Vertical	SI	Lateral	Viento	No aplica	
Cobertura vegetal	Arbustiva, herbácea	Uso del suelo		Viviendas, parqueadero		
Descripción adicional						
El colapso se produjo en el parqueadero de borde de Zambiza, afectando a 9 vehículos, criaderos de cerdos. No se registran víctimas humanas						

Figura 2: Inventario de movimiento en masa para colapsos Proyecto JICA-IIGE-MDMQ [10].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó mediante la metodología experimental-comparativa, donde se busca determinar la idoneidad del uso de datos topográficos levantados con VANT, comparándolos con datos levantados con escáner

láser 3D, en zonas en las que han ocurrido movimientos en masa.

La investigación se estructuró en tres fases. La primera fue de gabinete, destinada a la planificación de las actividades, así como, a la preparación de materiales y equipos. La segunda consistió en la ejecución de los levantamientos de campo mediante ambos métodos sobre una misma zona de estudio, procurando que se realicen en el menor intervalo temporal posible, para asegurar la coherencia de los datos. La tercera fase correspondió al procesamiento, análisis e interpretación de los resultados, incluyendo su gestión y sistematización.

2.1 Levantamiento topográfico con escáner láser 3D

El levantamiento topográfico se realizó mediante el uso del escáner láser 3D portable, marca *GeoSlam*, modelo *ZEB Horizon*, el cual proporciona mediciones mediante un láser ultra fino con una precisión relativa promedio de 6 mm, un alcance de 100 m, ángulo de visión de 360° x 270° y una velocidad de captura de hasta 300 mil mediciones por segundo, lo que permite obtener la geometría completa del talud y de la zona de colapso, con base en la triangulación de la nube de puntos (Fig. 3) [11].



Figura 3: Levantamiento topográfico con escáner láser 3D, portable.

El proyecto de escaneo se ejecutó en un tiempo menor a 20 minutos (12 min. 11 seg.), que es lo que aconseja el fabricante para mantener la precisión de la unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) [12]; y, apoyado en tres puntos de control horizontal y vertical, colocados con el equipo *GNSS Trimble R12i*, mediante el método de medición NTRIP (*Networked Transport of RTCM on Internet Protocol*), que ofrece desempeño de posicionamiento de 8 mm + 0,5 ppm RMS, en horizontal, y 15 mm + 0,5 ppm RMS, en vertical, según lo especificado en el catálogo oficial [13].

La nube de puntos resultante se registró (georreferenció), utilizando los puntos de control, obteniendo un producto con un RMS (*Root Mean Square*) de 0,06 m, como se

refleja en el informe generado por el software (Fig. 4). Después de este procedimiento, se realizó la reducción de la cantidad de datos a un espaciado de 20 cm entre puntos, en el software *CloudCompare*; esto, con la finalidad de optimizar el manejo de la información. Posterior, se llevó a cabo la eliminación del ruido (vegetación e infraestructuras), el cálculo de normales utilizando el método de triangulación y la creación de un modelo de malla con una resolución de 20 cm, que se exportó en formato compatible con Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permitió realizar los análisis detallados más adelante.

Adjustment reference points with error values							
	Target			Actual			
Name	X	Y	Z	X	Y	Z	Error(m)
P2	782812.214	9983252.502	2788.431	782812.273	9983252.507	2788.445	0.061
P1	782775.339	9983230.820	2784.429	782775.341	9983230.831	2784.477	0.049
PARQUEADERO	782652.593	9983221.019	2781.276	782652.533	9983221.004	2781.216	0.086

RMS Error(m) 0.067

Figura 4: Reporte del procesamiento de la nube de puntos.

2.2 Levantamiento con Vehículo Aéreo no Tripulado.

La metodología de trabajo implicó varias fases, inició en gabinete con el diseño preliminar del plan de vuelo, tomando en consideración los equipos y software disponibles para el levantamiento, para este estudio se utilizó el dron *Matrice 300 RTK* y la aplicación *DJI Pilot 2*. El diseño incluyó la delimitación del área de estudio y la carga del modelo digital del terreno (MDT), disponible de la zona, dentro del proyecto a ejecutar. Adicional, en esta etapa se planificó la ubicación tentativa de la antena RTK (base) para la georreferenciación del proyecto y la posible zona de despegue y aterrizaje del dron, considerando los accesos y la topografía del sector.

La fase de campo empezó con el procedimiento de georreferencia, en el caso de este estudio se colocó un punto GNSS de control horizontal y vertical con una antena *Trimble R12i*, mediante el método de medición NTRIP, en una zona estable, despejada y de mayor altura que la del colapso a levantar (Fig. 5).



Figura 5: Ubicación del punto de control GNSS.

Sobre el punto de control, ahora de coordenadas conocidas, se ubicó la antena RTK base del dron para generar un vuelo con correcciones de la posición del centro de cada fotografía, en tiempo real. Simultáneamente se realizaron los vuelos con el dron, según la planificación realizada en gabinete, tomando en cuenta las condiciones climáticas y ajustando los parámetros de acuerdo a las características de terreno (Fig. 6).



Figura 6: Ubicación del punto de control y vuelo del dron.

De regreso en gabinete se procesó las fotografías aéreas en el software especializado *Agisoft Metashape*. Este procedimiento consistió en alinear las fotografías, generar la nube de puntos densa y a partir de ahí, obtener el ortomosaico y el modelo digital de superficie (MDS). Con este modelo en el software *CATALYST Professional*, se realizó la “limpieza” de vegetación e infraestructuras para obtener el MDT.

2.3 Comparación de las nubes de puntos y los modelos digitales del terreno

Para realizar la comparación de la distancia que hay entre las nubes de puntos resultantes de los levantamientos, se utilizó el software libre *CloudCompare* (versión en inglés), en sus dos métodos de comparación, el primero que da como resultado un valor absoluto, y el segundo que refleja la distancia real, sea en el valor entero positivo o negativo.

En la siguiente figura se resume el procedimiento para la comparación de distancias en valor absoluto en *CloudCompare*.

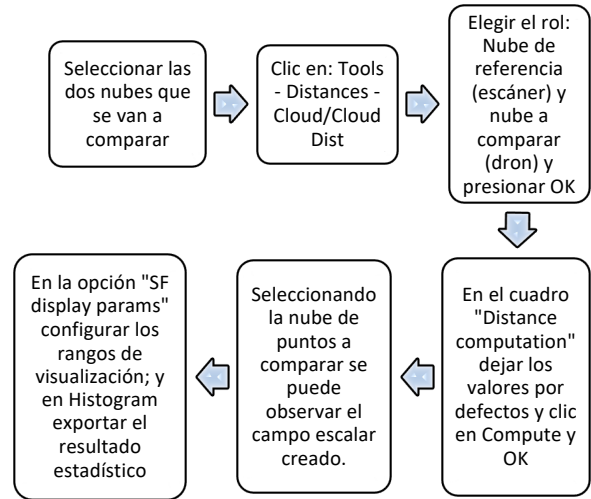


Figura 7: Procedimiento para comparar distancias valor absoluto.

La segunda opción de comparación en *CloudCompare*, que toma en consideración valores positivos y negativos de la distancia, es mediante el algoritmo *M3C2 Distance*, cuyo procedimiento se resume a continuación.

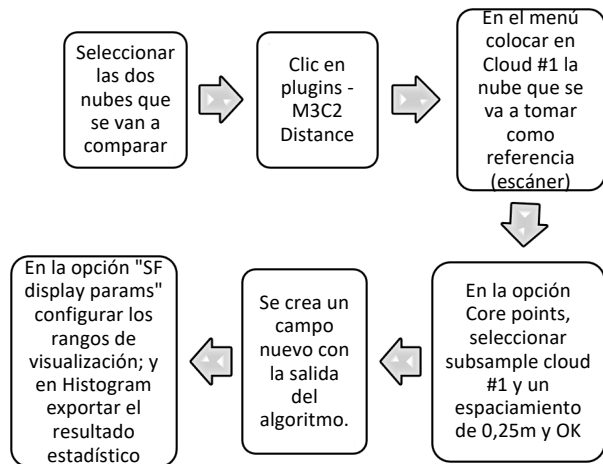


Figura 8: Procedimiento para comparar distancias valor real.

Un tercer método de comparación es el de los MDT, donde es crucial que ambos modelos compartan el mismo sistema de referencia espacial. El primer paso en este proceso es identificar los sistemas de coordenadas y proyecciones utilizados por cada uno. Esto se logra

revisando la información de metadatos de los modelos digitales. Posteriormente, se realiza una transformación de datos usando herramientas de proyección disponibles en ArcGIS para convertir ambos MDT a un sistema de referencia común, como el sistema WGS 84 UTM (*Universal Transverse Mercator*). Esta transformación es fundamental para garantizar que las coordenadas de los modelos sean compatibles y que las comparaciones sean precisas y significativas.

Una vez que los MDT están alineados en el mismo sistema de referencia espacial, se procede a proyectar cada uno al sistema WGS 84 UTM. La proyección asegura que los datos se alineen adecuadamente. Para ello, se selecciona WGS 84 UTM como el sistema de referencia objetivo y se aplica la herramienta "Project" en ArcGIS para convertir las proyecciones de los MDT, esto elimina posibles errores derivados de diferencias en las proyecciones originales.

El siguiente paso es la creación de puntos aleatorios en ambos modelos para obtener una muestra representativa de elevaciones. Este proceso se realiza utilizando la herramienta "Create Random Points" en ArcGIS, que genera puntos distribuidos aleatoriamente en el área de estudio, esto es importante para evitar sesgos y asegurar que las muestras sean representativas del área total de estudio. Se debe prestar especial atención para asegurar que los puntos aleatorios cubran adecuadamente las áreas de interés en ambos MDT, garantizando así una comparación equitativa [14] (Fig. 9).

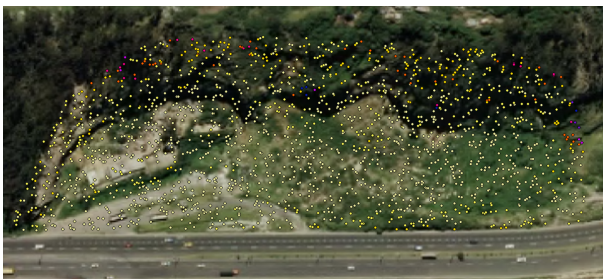


Figura 9: Selección de puntos aleatorios.

Con los puntos aleatorios definidos, se procede a extraer los valores de elevación en estos puntos para ambos modelos digitales. Esto se realiza mediante la herramienta de interpolación "Extract Values to Points". Los datos extraídos se organizan en un formato adecuado para el análisis posterior, asegurando que la información sea precisa y esté lista para el cálculo de diferencias.

Es esencial filtrar o eliminar los puntos que contienen valores nulos para evitar que afecten negativamente el análisis. Una vez gestionados estos datos se añade un nuevo campo en la tabla de atributos de los puntos aleatorios para calcular la diferencia absoluta entre las elevaciones de los dos modelos, en cada punto. Utilizando la herramienta de cálculo de campo en ArcGIS, se determina la diferencia absoluta entre las elevaciones extraídas de los dos modelos.

El análisis estadístico de las diferencias en elevación incluye el cálculo de estadísticas descriptivas, tales como la media, mediana, desviación estándar y rango de las diferencias absolutas. Estas estadísticas permiten evaluar la variabilidad y precisión de los modelos digitales de elevación. Al analizar las estadísticas, se puede identificar áreas donde los modelos presentan discrepancias significativas, proporcionando una evaluación detallada de la calidad y precisión de cada modelo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Levantamiento topográfico con escáner láser 3D

La información obtenida para la elaboración del modelo digital de la zona del colapso se extrajo de un proyecto de escaneo que contiene alrededor de 79,11 millones de puntos, con lo que se obtuvo una base con alta densidad de información (Fig. 10), que permitió representar la topografía del talud con un alto grado de detalle y precisión (RMS de 0,06 m), con lo que se puede generar cartografía con escalas entre 1: 50 y 1: 100.

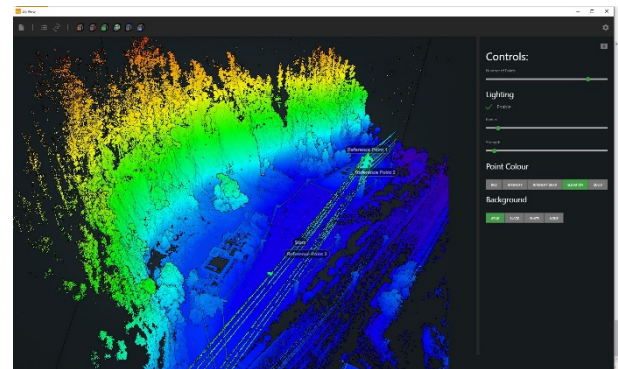


Figura 10: Nube de puntos del levantamiento con escáner láser 3D.

3.2 Levantamiento con Vehículo Aéreo no Tripulado

Luego del procesamiento de las fotografías aéreas se obtuvieron los productos como: nube de puntos densa, modelo digital de superficie (DSM) y ortofotomosaico (Fig. 11), con un área aproximada de levantamiento de 140 hectáreas. El error promedio fue de 3,35 cm y un GSD de 2,6 cm de resolución (anexo 1), lo que asegura que esta información puede ser utilizada para la generación de cartografía temática del área del colapso del talud.

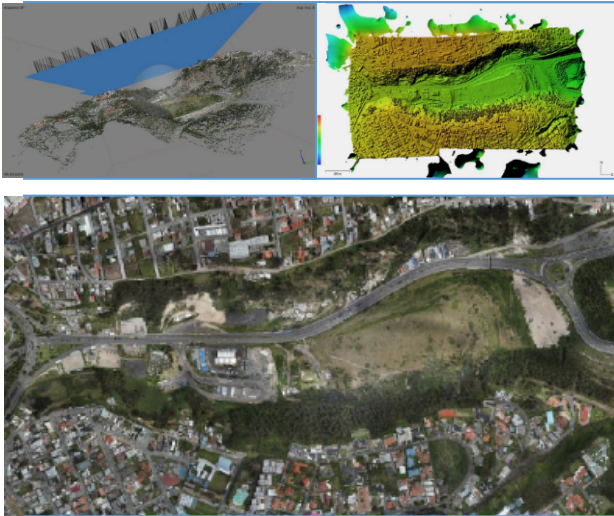


Figura 11: Productos del levantamiento aerofotogramétrico.

3.3 Comparación de las nubes de puntos y los modelos digitales del terreno

Para realizar el análisis comparativo con datos cuantitativos se consideró al levantamiento con escáner láser como la base de comparación, ya que como lo demuestra [15], los resultados del levantamiento con sistemas LiDAR puede ser aun preferibles a la utilización de datos de topografía convencional, con estación total de 2" de precisión, para la generación de productos topográficos de grandes áreas, si se considera que el RMS y la exactitud posicional vertical (EPV), de la nube de puntos, son similares a los errores introducidos por los métodos utilizados para interpolar los puntos sobre el terreno recolectados mediante topografía convencional.

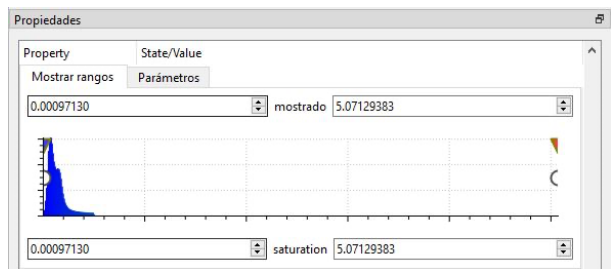
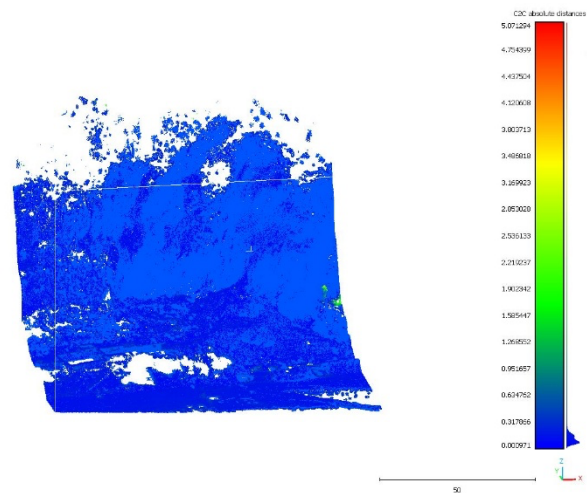
La estadística descriptiva general muestra que los datos siguen una distribución no simétrica, con una concentración masiva cerca de cero y una dispersión asimétrica hacia valores positivos (Tabla 1).

Tabla 1: Resultados estadísticos generales

Estadísticas Descriptivas		
Medida	Valor	Observación
Total de datos (n)	1 000 000 (aprox.)	Suma de todas las frecuencias
Media	~0,18 m	Punto medio de cada clase × frecuencia, sumados y divididos entre n.
Moda	Clase 133	Intervalo con mayor frecuencia (178 904 datos en 0,0084–0,1826).
Mediana	~0,18 m	Clase donde la frecuencia acumulada supera el 50 % (ubicada en la clase 133).
Rango	44,6	Diferencia entre extremos: 21,6123 – (-22,9894).
Varianza (σ ²)	2,137 m	Calculada a partir de puntos medios (no precisa por agrupamiento).
Desviación estándar (σ)	1,462 m	
Distribución y Forma del histograma		

Sesgo:	Negativo fuerte (cola izquierda alargada). La mayoría de los datos se concentran en valores positivos (pico en clase 133).
Curtosis:	Leptocúrtica (distribución muy picuda). Existe una concentración extrema alrededor de la moda.
Intervalos Clave del histograma	
Pico máximo:	Clase 133: 0,0084–0,1826 (178 904 datos).
Colas:	Izquierda: Valores negativos (clases 1–132) con frecuencias bajas. Derecha: Valores positivos (clases 134–256) con rápida disminución de frecuencias.

En este sentido, se observa que la metodología del levantamiento aerofotogramétrico de zonas susceptibles o donde ya ha ocurrido un movimiento en masa, es adecuada, ya que los resultados de la estadística del método de comparación, de valores absolutos, de la diferencia de este producto con relación al realizado con el escáner, muestra que, si bien el rango de las diferencias va de 0,00097 m a 5,07 m, la mayor cantidad de los puntos comparados están en el rango de 0 – 0,20 m, con una media de 0,137645 m (Fig. 12); es decir, con la precisión obtenida, los datos se pueden utilizar hasta escalas de trabajo entre 1: 500 y 1: 1 000 [16]. Incluso si se considera el RMS del levantamiento con escáner láser, no sobrepasa el error máximo admisible que sería de 0,50 m y el nivel de confianza del 90 %.



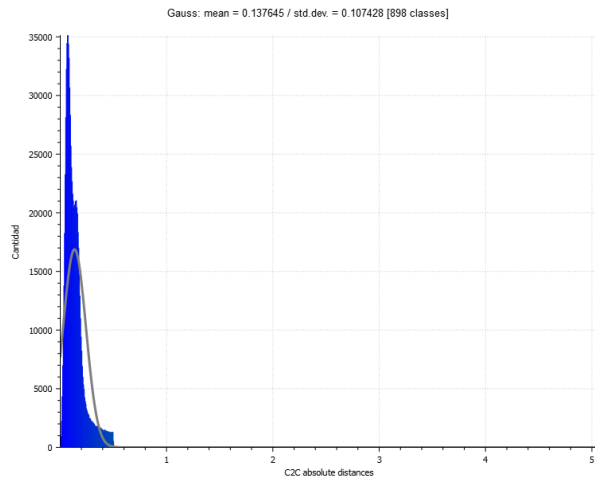


Figura 12: Valores absolutos de la diferencia entre nubes de puntos.

En esa misma línea, los resultados estadísticos de la comparación de valores positivos y negativos, muestra que, el grueso de datos comparados, se ubica en el rango de -0,15 y 0,20 m, con una media de 0,03166 m (Fig. 13), lo que indica una gran similitud entre las dos nubes de puntos. Así también, en la figura se puede observar que la zona donde las diferencias son mayores (marcadas en rojo), corresponde a la parte alta del talud, o con abundante vegetación, lo que correspondería a puntos “salvajes” (puntos distorsionados o de elementos dinámicos), o zonas donde los sensores captaron elementos desde diferentes ángulos.

Cabe destacar que, al ser la nube de puntos el primer producto resultante de ambos métodos de levantamiento, su limpieza (retirar vegetación e infraestructura), es clave para la obtención de topografía fiel a la realidad, proceso que requiere toda la atención e importancia del caso.

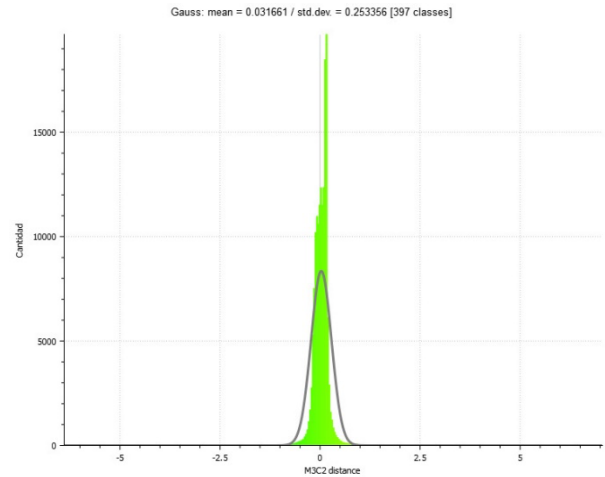
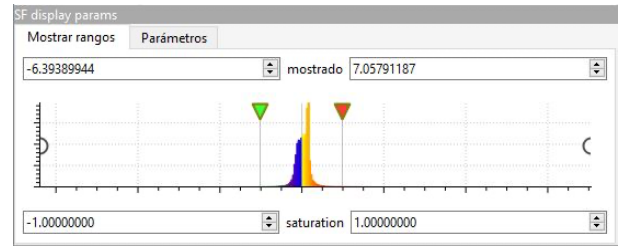
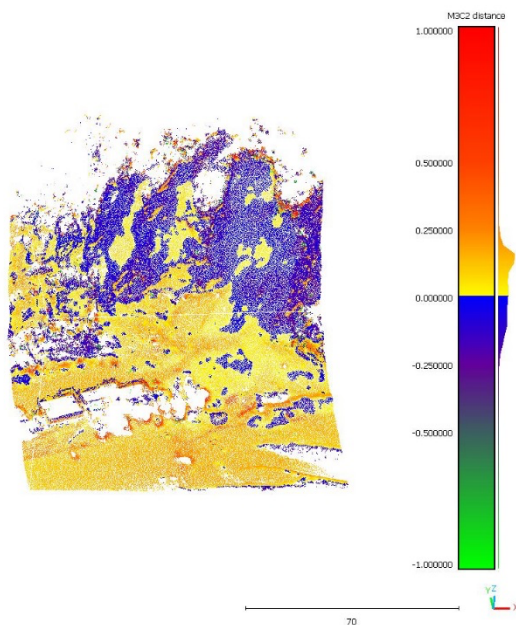


Figura 13: Valores positivos y negativos de la diferencia entre nubes de puntos.

En el análisis de las diferencias de elevación de los MDT, realizado mediante estadística descriptiva derivada de 1 804 puntos de muestreo, se observa que la diferencia mínima registrada es de 0 metros, lo que indica coincidencia exacta entre los modelos. No obstante, se ha observado una diferencia máxima de 22 metros, lo que revela discrepancias significativas en determinadas áreas, o puntos “salvajes”. La suma total de las diferencias es de 1 793 metros, con una media de 0,994 metros y una desviación estándar de 2,068 metros (Fig. 14). La alta desviación estándar sugiere una variabilidad considerable en las diferencias de elevación entre los modelos digitales, lo que puede afectar la precisión del análisis en sitios locales.

Estas discrepancias pueden atribuirse a varios factores, entre ellos, el más representativo es la presencia de vegetación, como árboles y arbustos, que puede bloquear la línea de visión de los sensores durante la captura de datos, lo que resulta en una interpolación de elevaciones incorrectas en áreas cubiertas. Este efecto puede causar que las mediciones en áreas con vegetación sean menos precisas, ya que los modelos digitales pueden no capturar correctamente la topografía subyacente debido a la obstrucción de los elementos.

Otro factor crítico es la geometría del terreno, particularmente en sectores donde el talud es muy pronunciado. En estos casos, se produce un rompimiento de escala geométrica, debido a que la alta pendiente dificulta la correcta restitución tridimensional, tanto por efectos de ocultamiento parcial en el escaneo terrestre, como por ángulos de captura desfavorables en la fotogrametría aérea. Este fenómeno se traduce en

mayores errores en la interpolación de superficies y, por ende, en discrepancias significativas entre los modelos digitales generados por ambas técnicas. Estas diferencias se amplifican cuando no se cuenta con suficiente densidad de puntos en las zonas inclinadas, afectando la precisión del modelo digital del terreno (DTM).

Además, se debe considerar el ángulo de toma de datos que podría estar influyendo en las diferencias, ya que el dron desde la parte superior pudo capturar datos que el escáner laser, desde el inferior, lo hizo con otro ángulo con las probables interferencias, normales, por la morfología de la zona; por ejemplo, el dron pudo capturar datos de copas de árboles en la parte alta del talud, que el escáner probablemente no alcanzó a visualizar. Por lo tanto, es crucial considerar estos factores al interpretar los resultados y ajustar los modelos para mejorar su precisión.

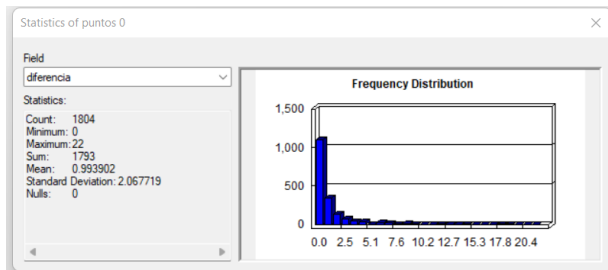


Figura 14: Distribución y frecuencia de puntos del análisis comparativo entre los dos modelos digitales de terreno.

El análisis del gráfico de dispersión (Fig. 15), muestra las diferencias en las elevaciones entre los MDT. Los puntos se representan con dos colores: el gris para el dron y el azul para el escáner láser. En la mayor parte del área de estudio las muestras (puntos aleatorios), de ambos modelos, coinciden bastante bien. Sin embargo, en el rango de elevaciones entre 2 790 msnm y 2 863 msnm, la coincidencia es limitada, es la zona con mayor vegetación arbórea, de modo que las diferencias, como ya se explicó, pueden ser producto de los puntos salvajes y de la limpieza de los modelos.

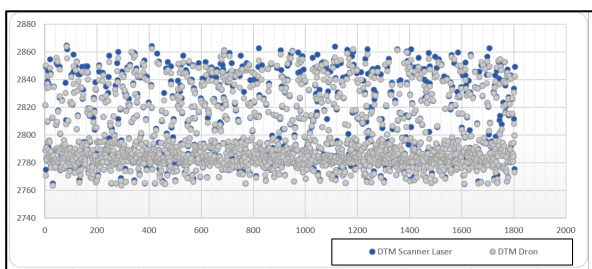


Figura 15: Cuadro de dispersión análisis comparativo entre los dos modelos digitales de terreno.

Adicionalmente, se ha observado que la limpieza del modelo digital de superficie (MDS), para eliminar todo tipo de infraestructuras o vegetación es fundamental para mejorar la interpretación del terreno propiamente dicho, por lo tanto, se hace crucial implementar técnicas de filtrado más avanzadas que puedan identificar y corregir los errores causados por la vegetación. Esto incluye el uso de algoritmos de corrección que puedan distinguir

entre la señal de terreno real y los provocados por la vegetación, así como, la integración de datos adicionales para validar y ajustar las elevaciones en áreas cubiertas.

3.4 Discusión

En las últimas décadas, el desarrollo de tecnologías avanzadas, como el escáner láser 3D y los vehículos aéreos no tripulados con sensor RGB, ha revolucionado la forma en que se capturan y procesan datos topográficos. La selección entre uno y otro método debe basarse en factores como: el tipo de estudio, accesibilidad, extensión del área, disponibilidad de recursos tecnológicos y los requerimientos específicos de precisión del levantamiento topográfico [17].

En el contexto de este estudio, orientado al análisis de datos topográficos de zonas de movimientos en masa, los resultados obtenidos reflejan que ambas técnicas pueden aplicarse de manera individual o, de preferencia, conociendo las potencialidades y deficiencias de los equipos, utilizarlas en forma complementaria, zonificando el área a levantarse por métodos de levantamiento. Esto, tomando en consideración que las diferencias en los datos comparados no superan los 0,13 m, siendo la combinación la que permite capturar un mayor nivel de detalle gracias a los distintos ángulos de captura de los sensores terrestres y aéreos. Esta particularidad minimiza vacíos de información y mejora la caracterización de los taludes como lo refleja [18], en su artículo “Sistema de monitorización aérea de taludes (MAT)”, lo que representa un aspecto clave en estudios de amenazas geológicas y estabilidad de laderas.

Elemento esencial a tener en cuenta en el procesamiento, tanto de datos del escáner laser 3D como de los VANT, es la precisión de los modelos generados; en este sentido, en el estudio se evidenció que la limpieza de la nube de puntos es un paso crítico, que puede ser realizado con distintas técnicas como el filtrado estadístico, la segmentación basada en umbrales y el uso de algoritmos de clustering, que según [19], han demostrado ser efectivos para mejorar la calidad de los datos, permitiendo una representación más fiel de la superficie estudiada.

Desde la perspectiva costo-beneficio, el VANT con sensor RGB ofrece una cobertura aproximada de 180 ha por levantamiento, con un costo por hectárea calculado de \$31,67, lo que posibilita ser más eficiente en levantamientos topográficos extensos y en zonas abiertas. En contraste, el Escáner Láser 3D cubre una extensión próxima a las 4 hectáreas y presenta un costo calculado de \$2 350 por hectárea levantada, lo que si bien representa una inversión mayor, esta se ve justificada en los escenarios donde se dificulte el levantamiento con un VANT, mejorando la precisión y recogiendo más detalles del terreno como son las zonas de taludes o quebradas. Es importante señalar que se han excluido los gastos asociados al operador y tiempos de procesamiento ya que eso depende del personal técnico destinado al levantamiento de información, que en el presente estudio fue el mismo en ambos métodos. En la Tabla 2, se

presenta el análisis comparativo de costos entre las dos tecnologías:

Tabla 2: Análisis comparativo de costos de levantamiento por ha entre las dos tecnologías.

Concepto	Dron (Matrice 300 RTK + Zenmuse P1)	Escáner Láser 3D (Geoslam Zeb Horizon)
Costo del Equipo	\$25 000	\$40 000
Software Perpetuo	\$3 500	\$7 000
Vida útil	5 años	5 años
Cobertura/levantamiento	180 ha	4 ha
Costo anual por ha	$((\$25000+\$3500)/5)/180$	$((\$40000+\$7000)/5)/4$
	\$31,67/ha cada año	\$2 350/ha cada año

Con todo lo expuesto, considerando que el sensor LiDAR es lo más preciso en la actualidad para levantamientos topográficos, para futuras investigaciones será recomendable realizar la comparación entre el escáner láser 3D y un vehículo aéreo no tripulado equipado con un sensor LiDAR; esto, permitirá evaluar si las diferencias medias obtenidas en este estudio pueden reducirse aún más, posibilitando levantamientos de mayor extensión con precisiones superiores a los 0,10 m.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El IIGE identificó la necesidad de fortalecer su capacidad para brindar apoyo técnico en la implementación de contramedidas para los movimientos en masa. Para abordar esta temática, el Gobierno de Ecuador solicitó al Gobierno de Japón la implementación del "Proyecto para el Desarrollo de Capacidades para la Reducción del Riesgo de Desastres en Laderas a Nivel Técnico y Territorial", mismo que se ejecutó en colaboración con el MDMQ.

Como parte del proyecto se realizó la recolección de información morfométrica, que es fundamental para comprender la magnitud y dinámica de los movimientos en masa. En tal sentido, evaluar aspectos geológicos y topográficos de manera integral permite una visión completa del comportamiento del terreno y ayuda a identificar áreas de amenazas por movimientos en masa.

En este contexto, con el desarrollo del proyecto y con la comprensión de la evolución de la topografía como ciencia impulsada por avances tecnológicos y metodológicos a lo largo de los siglos, que ha permitido un conocimiento cada vez más preciso y detallado de la superficie terrestre y su entorno, se realizó esta investigación, entendiendo que la representación topográfica es un insumo básico para otros estudios como los de movimientos en masa, en el caso específico de este estudio, los colapsos de talud.

Con las comparaciones realizadas, tomando al levantamiento topográfico con escáner láser como base, y el realizado con dron como modelo a comparar, con una diferencia media que no sobrepasa los 0,13 m, se puede concluir que ambas metodologías son aplicables para el levantamiento de zonas susceptibles o donde ya han ocurrido movimientos en masa. La elección entre utilizar un escáner láser o un dron dependerá de las necesidades específicas del proyecto y factores como la accesibilidad a la zona del levantamiento; ya que, mientras que el escáner ofrece una precisión y resolución superiores, los drones proporcionan una solución más económica, de rápida implementación y mayor superficie de cobertura.

Si bien, en la comparación de los MDT se obtuvo una alta desviación estándar que reflejaría inconsistencias en los datos o diferencias en la resolución de los modelos, que podrían comprometer la precisión de levantamientos principalmente en áreas críticas como pendientes pronunciadas y morfologías irregulares. Con el análisis realizado, por la ubicación de los puntos con mayores discrepancias, se evidencia que la principal causa de estas diferencias es la vegetación, que a más de obstruir la captura directa de datos del terreno, son elementos dinámicos que al ser observados de distintos ángulos, su morfología puede verse alterada. En este mismo sentido, realizar una limpieza exhaustiva de los modelos digitales para eliminar los elementos que no corresponden al terreno, se vuelve imperativo al momento de realizar análisis espacial de las zonas de colapso.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar ambos modelos (escáner y dron) para una evaluación integral del colapso. La combinación de datos provenientes de ambos tipos de modelos permite validar y corregir discrepancias, proporcionando una visión más completa y detallada del evento. Esta integración es esencial para una caracterización precisa y una evaluación confiable de la magnitud e impacto del colapso, mejorando así, la capacidad para gestionar y mitigar riesgos futuros.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. V. M. Arturo, V. V. W. Ernesto, G. V. C. Javier, y E. Ediciones, Topografía: Conceptos y aplicaciones. en Ingeniería y salud en el trabajo. Ingeniería civil. Ecoe Ediciones, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=3K5JDwAAQBAJ>
- [2] P. R. Wolf y C. D. Ghilani, Topografía. Alpha Editorial, 2015. Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total y vehículos aéreos no tripulados (UAVS) en los Andes del sur del Ecuador <https://books.google.es/books?id=g7F1EAAAQBAJ>
- [3] F. G. Márquez, Curso Básico de Topografía: Planimetría, Agrimensura, Altimetría. Editorial Terracota, 2017. [En línea]. Disponible en:

- https://books.google.com.ec/books?id=f2ySmhH_Pf8C
- [4] G. Ávila et al., *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*, vol. 53. 2016.
- [5] Proyecto multinacional andino: geociencias para las comunidades andinas, «Movimientos en masa en la region Andina (una guía para la evaluación de amenazas)», *Publ. Geológica Multinac.*, pp. 4, 432, 2007.
- [6] Department of Regional Development and Environment Executive Secretariat for Economic and Social Affairs Organization of American States, «Primer on natural hazard management in integrated regional development planning», *Organ. Am. States Dep. Of*, 1991, [En línea]. Disponible en: <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea66e/begin.htm>
- [7] Instituto de Investigación Geológico y Energético, «Informe de asistencia técnica: Evaluación del Deslizamiento del 27/02/2023, en el sector Zámbez, cantón Quito, provincia de Pichincha», 2023, *Quito, Ecuador*.
- [8] Primicias.ec, «Nuevo derrumbe se registra en Zámbez, en el norte de Quito», *Sucesos*. Accedido: 1 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/sucesos/derrumb-e-deslizamiento-quito-zámbez/>
- [9] Manual Técnico de Metodologías del Resultado 1 Análisis y evaluación de movimientos en masa Proyecto para el Desarrollo de Capacidades para la Reducción del Riesgo de Desastres en Laderas a Nivel Técnico y Territorial, pp. 25.
- [10] Ficha del Proyecto para el Desarrollo de Capacidades para la Reducción del Riesgo de Desastres en Laderas a Nivel Técnico y Territorial, JICA, Colapso del 27/02/2023, en el sector Las Palmeras, cantón Quito, provincia de Pichincha», 2023, Quito, Ecuador.
- [11] GeoSLAM, «ZEB Horizon». 2021. Accedido: 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.geoslam.com
- [12] Cotecmi SAC, «ZEB-HORIZON - Capacitación». 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cotecmisac.com/>
- [13] Trimble Inc, «Catálogo del fabricante». 2020. Accedido: 5 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.trimble.com
- [14] Pike, Richard J. (1988): The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models". *Mathematical Geology*.
- [15] W. E. Salinas Castillo, C. U. Paredes Hernández, X. Martínez Becerra, y F. Guevara Cortina, «Evaluación de la exactitud posicional vertical de una nube de puntos topográficos Lidar usando topografía convencional como referencia», *Investig. Geográficas*, vol. 0, n.o 85, ene. 2015, doi: 10.14350/rig.36934.
- [16] L. A. Koenig Veiga, M. A. Z. Zanetti, y P. L. Faggion, *Fundamentos de topografía*. 2007.
- [17] J. Yumbra y J. Chabla, «Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total y vehículos aéreos no tripulados (UAVS) en los Andes del sur del Ecuador,» *Universidad Politécnica Salesiana, Quito*, 2024.
- [18] M. Ortín Grau, A. Santos Becerro, L. Menéndez Mateas, M. Rosa Serván, P. Gutiérrez Benavides, A. Cristóbal Granada y C. Del Río Garandilla, «Sistema de monitorización aérea de taludes (MAT),» *Revista Carreteras 225*, vol. I, n° VII, pp. 4-25, 2019.
- [19] G. Vosselman y H.-G. Maas, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, 2010.

ANEXOS

Anexo 1: Reporte del procesamiento de las fotografías aéreas realizadas en Zámbez

**Reporte de procesamiento para generar la ortofoto y dem de Zambiza
08 March 2023**



Number of images:	1,356	Camera stations:	1,355
Flying altitude:	223 m	Tie points:	988,626
Ground resolution:	2.62 cm/pix	Projections:	4,492,756
Coverage area:	1.77 km ²	Reprojection error:	0.3 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ZenmuseP1 (35mm)	8192 x 5460	35 mm	4.39 x 4.39 µm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

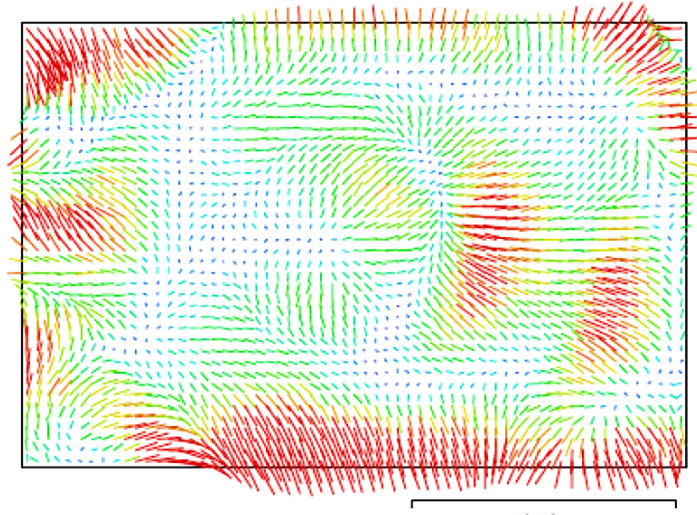


Fig. 2. Image residuals for ZenmuseP1 (35mm).

ZenmuseP1 (35mm)

1356 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	8192 x 5460	35 mm	4.39 x 4.39 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	8202.75	0.021	1.00	-0.05	0.03	-0.16	0.13	-0.13	0.00	-0.01
Cx	-28.6923	0.0075		1.00	-0.02	-0.01	0.01	-0.02	0.88	-0.01
Cy	16.6801	0.0062			1.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.02	0.83
K1	-0.0495794	7.2e-06				1.00	-0.97	0.91	-0.02	0.00
K2	0.0282273	4.4e-05					1.00	-0.98	0.02	-0.00
K3	-0.108814	8e-05						1.00	-0.03	0.00
P1	-0.00124689	2.9e-07							1.00	-0.01
P2	0.00136613	2.5e-07								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.949222	0.966713	3.06387	1.35483	3.35006

Table 3. Average camera location error.
 X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.