

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0204>

EMPLEO COMBINADO DE TÉCNICAS DE GEOMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN CARRETERAS

COMBINED USE OF OFFICE TECHNIQUES FOR DETERMINING MOVEMENTS ON ROADS

García-Casquete Robert William¹; Abreu-Hernández Dania Olga ²

¹ Maestría Académica con Trayectoria Profesional en Ingeniería Civil, Mención Vialidad, Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador.
Correo: rgarcia1033@utm.edu.ec.

² Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba.
Correo: daniah@civil.cujae.edu.cu. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1282-5387>

Resumen

Esta investigación se centró en la determinación de desplazamientos en la carretera Tosagua-Bahía, específicamente en el sitio Casical, mediante el empleo combinado de técnicas de Geomática. Los objetivos principales fueron sistematizar la bibliografía existente sobre estas técnicas, elaborar un inventario del estado actual de la carretera mediante inspección visual, y determinar la dinámica de los desplazamientos utilizando análisis multitemporal de imágenes y modelos digitales del terreno. Se emplearon diversas metodologías de Geomática, incluyendo la captura de imágenes con vehículos aéreos no tripulados (VANT), técnicas geodésicas como el GPS, y sistemas de información geográfica (SIG). Estos métodos permitieron la generación de un modelo digital de elevación (DEM) y un ortomosaico de alta resolución, proporcionando una representación detallada y precisa de la topografía del área de estudio. Los resultados obtenidos incluyeron una nube de puntos densa y un DEM que reflejaron con precisión los desplazamientos y características del terreno. Estos hallazgos se compararon con investigaciones similares, demostrando que el uso combinado de VANT, GPS y SIG es altamente efectivo para el monitoreo de infraestructuras viales. La integración de estas tecnologías permitió la identificación de áreas de riesgo y la planificación de medidas preventivas y correctivas.

Palabras clave: Geomática, Modelación digital, Ingeniería civil.

Abstract

This research focused on the determination of displacements on the Tosagua-Bahía highway, specifically at the Casical site, through the combined use of Geomatics techniques. The main objectives were to systematize the existing literature on these techniques, develop an inventory of the current state of the road through visual inspection, and determine the dynamics of movements using multi-temporal analysis of images and digital terrain models. Various Geomatics methodologies were used, including image capture with unmanned aerial vehicles (UAV), geodetic techniques such as GPS, and geographic information systems (GIS). These methods allowed the generation of a digital elevation model (DEM) and a high-resolution orthomosaic, providing a detailed and accurate representation of the topography of the study area. The results obtained included a dense point cloud and DEM that accurately reflected the displacements and terrain characteristics. These findings were compared with similar research, demonstrating that the combined use of UAV, GPS and GIS is highly effective for monitoring road infrastructure. The integration of these technologies allowed the identification of risk areas and the planning of preventive and corrective measures.

Keywords: Geomatics, Digital modeling, Civil engineering.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de abril de 2024.

Fecha de aceptación: 25 de junio de 2024.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2024.



1. Introducción

La región de las Américas es una de las más expuestas a la ocurrencia de eventos telúricos e inundaciones, provocando entre otras afectaciones desplazamientos de las obras viales. A los mismos pueden asociarse también a causas antropogénicas (Zhao & Lu, 2018). Los factores relacionados con el desplazamiento de carreteras pueden vincularse con las propiedades geográficas y fisiográficas del suelo, características de la cobertura superficial y los procesos hidrológicos (Becerra & De Rurange, 2021).

Los desplazamientos de carreteras son procesos geodinámicos que deben ser prevenidos mediante estudios y proyectos que involucren el estudio de la topografía del terreno, las características geológicas y geotécnicas de la zona donde se emplaza una estructura vial (Nappo et al., 2021). En el Ecuador existen carreteras como la Tosagua-Bahía en la provincia de Manabí, específicamente en el sitio Casical, que, ante la ocurrencia de desplazamientos evidenciados por las diferentes inspecciones realizadas, carece de un inventario

vial actualizado sobre su estado vial. Tampoco se cuenta con un estudio en el que se integren técnicas que permitan evaluar el nivel de resiliencia de la ante eventos telúricos e inundaciones, teniendo en cuenta las características geológicas y geomorfológicas que presenta.

En este sentido, las técnicas de la Geomática ofrecen la posibilidad de ser empleadas de forma combinada para obtener de forma rápida, económica y precisa información relacionada con la geolocalización de deterioros ocasionados por eventos de relativa intensidad, la tipificación de los deterioros, la medición de los desplazamientos, llegando a determinar la severidad de los daños ocasionados (Rossi et al., 2018). La información obtenida permite además disminuir los potenciales riesgos asociados al fenómeno de desplazamiento de carreteras (Pellicani et al., 2019).

Marco teórico

- **Introducción a la Geomática**

La Geomática, como disciplina, se enfoca en la recopilación, análisis y manejo de datos geospaciales mediante diversas técnicas y tecnologías. Estas incluyen la

fotogrametría, la teledetección, el sistema de posicionamiento global (GPS) y los sistemas de información geográfica (SIG). La integración de estas técnicas permite obtener información precisa y detallada del terreno, lo que es esencial para el estudio y monitoreo de infraestructuras como carreteras (Colomina & Molina, 2014).

La importancia de la Geomática en la ingeniería civil radica en su capacidad para proporcionar datos exactos y en tiempo real sobre el estado de las estructuras y su entorno. Esta precisión es fundamental para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, especialmente en áreas propensas a desplazamientos y otros fenómenos geológicos (Turner, Lucieer, & Watson, 2012).

- **Técnicas de Captura de Datos:
VANT y Fotogrametría**

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) han revolucionado la captura de datos geospaciales debido a su capacidad para realizar vuelos de baja altitud y alta resolución. La fotogrametría basada en VANT permite la creación de modelos

digitales de elevación (DEM) y ortomosaicos detallados, esenciales para el análisis de desplazamientos en carreteras (Nex & Remondino, 2014).

En la presente investigación, se utilizaron VANT para la captura de imágenes y la generación de nubes de puntos densas. Estudios previos han demostrado que los VANT pueden proporcionar datos con una precisión similar a la de los métodos tradicionales de topografía, pero con una mayor eficiencia y menor costo (Harwin & Lucieer, 2012). Además, la capacidad de los VANT para cubrir grandes áreas y acceder a zonas de difícil acceso los hace ideales para el monitoreo de infraestructuras viales en regiones montañosas o de difícil acceso.

La fotogrametría permite la reconstrucción tridimensional del terreno a partir de imágenes bidimensionales. Esta técnica es fundamental para la creación de DEM y para la identificación de desplazamientos superficiales en las carreteras. Micheletti, Chandler y Lane (2015) destacaron que la fotogrametría basada en VANT ofrece una precisión y resolución adecuadas para estudios

geotécnicos y geológicos, lo que la convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo de carreteras.

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su Aplicación en el Monitoreo de Carreteras**

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas poderosas para la gestión y análisis de datos geospaciales. Integran diversos tipos de información, como imágenes satelitales, datos GPS y modelos digitales de elevación, permitiendo un análisis comprensivo y detallado del terreno y las infraestructuras viales (Longley et al., 2005).

En el contexto de la presente investigación, los SIG fueron utilizados para procesar y analizar los datos obtenidos mediante VANT y otras técnicas geomáticas. Esto permitió la creación de modelos digitales de elevación y la identificación de áreas con desplazamientos significativos en la carretera Tosagua-Bahía. Estudios similares, como el de James y Robson (2012), han demostrado que los SIG son esenciales para la gestión de datos complejos y la

visualización de resultados en tres dimensiones, facilitando la toma de decisiones informadas en la gestión de infraestructuras.

La integración de SIG con datos de VANT permite la creación de mapas detallados y actualizados del terreno, lo cual es crucial para el monitoreo continuo y la identificación de riesgos potenciales. Además, los SIG permiten realizar análisis multitemporales, comparando datos de diferentes periodos para detectar cambios y desplazamientos en el terreno (Nex & Remondino, 2014).

- **Monitoreo y Análisis de Desplazamientos en Carreteras**

El monitoreo de desplazamientos en carreteras es esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de estas infraestructuras. Los desplazamientos pueden ser causados por diversos factores, incluyendo la actividad sísmica, las condiciones meteorológicas y la geología local. La capacidad de detectar y analizar estos movimientos es crucial para la implementación de medidas preventivas y correctivas (Colomina & Molina, 2014).

En esta investigación, se emplearon técnicas de Geomática para monitorear y analizar los desplazamientos en la carretera Tosagua-Bahía. El uso combinado de VANT, fotogrametría y SIG permitió obtener una visión detallada de la dinámica de los desplazamientos y los factores que los causan. Estudios previos han mostrado que la integración de estas técnicas proporciona una alta precisión en la detección de desplazamientos y permite una respuesta rápida ante cualquier cambio significativo en la infraestructura vial.

2. Materiales y métodos

La investigación tuvo como objetivo general elaborar una metodología para la determinación de los desplazamientos en carreteras mediante el empleo combinado de técnicas de Geomática, centrándose en la vía Tosagua-Bahía, específicamente en el sitio Casical. Este proceso se llevó a cabo a través de diversas etapas diseñadas para cumplir con objetivos específicos que permitieran alcanzar el objetivo general de manera eficaz y precisa.

La primera etapa de la investigación consistió en la sistematización de la bibliografía existente sobre el empleo combinado de técnicas de Geomática en el monitoreo de desplazamientos en carreteras. Para ello, se realizó una exhaustiva revisión de artículos científicos, libros y documentos técnicos relevantes. Esta revisión bibliográfica permitió identificar las metodologías y tecnologías más avanzadas y adecuadas para el monitoreo de desplazamientos en infraestructuras viales, asegurando que se adoptaran enfoques basados en la evidencia y las mejores prácticas actuales.

Posteriormente, se procedió a la elaboración de un inventario detallado sobre el estado actual de la carretera en el sitio Casical. Esta fase implicó la realización de inspecciones visuales in situ, donde se observaron y registraron minuciosamente las condiciones físicas y estructurales de la vía. Se documentaron aspectos como fisuras, hundimientos, desprendimientos y cualquier otro tipo de deterioro observable, que podrían ser indicativos de desplazamientos o de riesgos

potenciales para la estabilidad de la carretera. Las inspecciones visuales permitieron obtener una visión clara y actualizada del estado de la infraestructura vial, proporcionando una base sólida para el análisis posterior.

Una vez completado el inventario del estado de la carretera, se abordó la determinación de la dinámica de los desplazamientos mediante un análisis multitemporal. Este análisis se basó en el procesamiento de imágenes y modelos digitales del terreno, lo cual permitió evaluar los cambios y movimientos de la carretera a lo largo del tiempo. La utilización de técnicas de Geomática resultó crucial en esta etapa, ya que ofreció herramientas avanzadas para la captura, procesamiento y análisis de datos espaciales con alta precisión.

La modalidad de investigación adoptada fue bibliográfica-documental, con un enfoque exploratorio, descriptivo y explicativo. Se llevó a cabo una exploración exhaustiva de la zona de estudio, identificando y describiendo las características geomorfológicas de la estructura vial. Asimismo, se realizó un análisis detallado de los

desplazamientos de la carretera utilizando técnicas de Geomática, lo cual permitió elaborar un modelo digital de elevación y terreno que facilitó la comprensión de la dinámica de los desplazamientos.

En cuanto a los métodos, técnicas e instrumentos de investigación, se emplearon diversas metodologías de Geomática para desarrollar un sistema de información geográfica (SIG) que identificara posibles riesgos por desplazamiento en la carretera. Entre las principales técnicas utilizadas se encontraron la captación de imágenes mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT), técnicas geodésicas espaciales de observación como el Global Positioning System (GPS), observación geológica y técnicas informáticas.

Las imágenes captadas mediante VANT se obtuvieron a través de vuelos planificados sobre la zona de estudio. Estas imágenes proporcionaron una vista aérea detallada que sirvió como base para el procesamiento y análisis en el SIG. A través de estas imágenes, se generaron modelos digitales de elevación (DEM) que permitieron una visualización tridimensional del

terreno. Estos modelos fueron esenciales para identificar y caracterizar los desplazamientos rotacionales en la carretera.

Las técnicas geodésicas espaciales, como el GPS, se utilizaron para definir los sistemas de referencia celeste y terrestre, fundamentales para la precisión en la localización de puntos de control y la medición de desplazamientos. La observación geológica, por su parte, permitió identificar y referenciar los factores geológicos que podrían influir en los deslizamientos de la carretera, como la composición del suelo, estructuras geológicas y características hidrogeológicas.

La zona de estudio se localizó en el sitio Casical, en la vía Tosagua-Bahía, entre las abscisas 1+700 y 2+500, en la provincia de Manabí, Ecuador. Se realizaron estudios específicos para determinar la geomorfología, hidrografía, clima y relieve del área de estudio, proporcionando una comprensión integral del entorno y sus posibles influencias en la estabilidad de la carretera.

Los resultados esperados de esta investigación incluían la caracterización detallada de la zona

de estudio y el estado actual de la carretera en el sitio Casical. Se anticipaba la identificación de movimientos superficiales representativos en la carretera, lo cual permitiría caracterizar los desplazamientos mediante técnicas de Geomática de manera precisa. Además, se propondría una red de puntos de control definidos mediante sistemas de posicionamiento global, lo cual mejoraría la precisión y el monitoreo continuo de la infraestructura vial.

Las imágenes captadas por los VANT y procesadas a través de un sistema de información geográfica generarían un modelo digital de elevación que reflejaría una representación topográfica detallada. Este modelo facilitaría el monitoreo y mapeo de desplazamientos en la carretera evaluada, permitiendo una gestión más efectiva y preventiva de la infraestructura.

3. Resultados y discusión

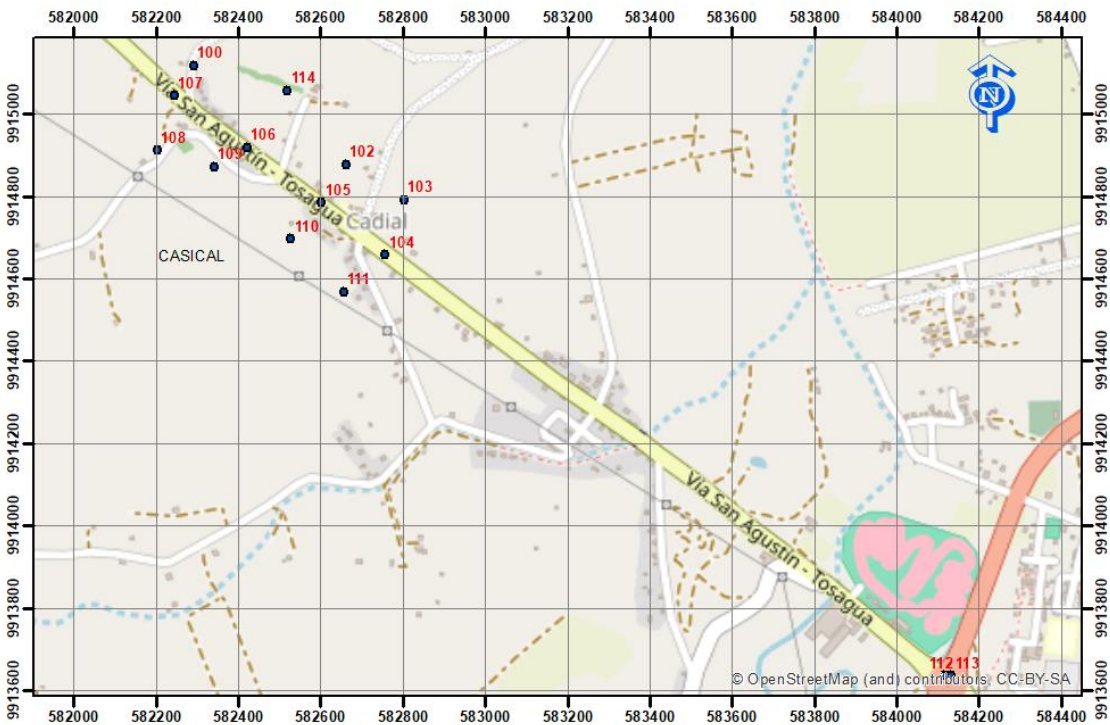
Una vez establecidos todos los parámetros para realizar los componentes técnicos de puntos estáticos, topográficos y

levantamiento de información técnica para el empleo combinado de técnicas de geomática para el monitoreo de desplazamientos en

carreteras, donde se requieren específicamente los productos descritos en las siguientes tablas.

Tabla 1: Lista de puntos estáticos

LISTA DE PUNTOS ESTÁTICOS		
ÍTEMS	SITIO	CÓDIGO
100	CASICAL - TOSAGUA	BASE
102	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
103	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
104	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
105	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
106	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
107	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
108	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
109	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
110	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
112	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
113	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO
114	CASICAL - TOSAGUA	ESTÁTICO

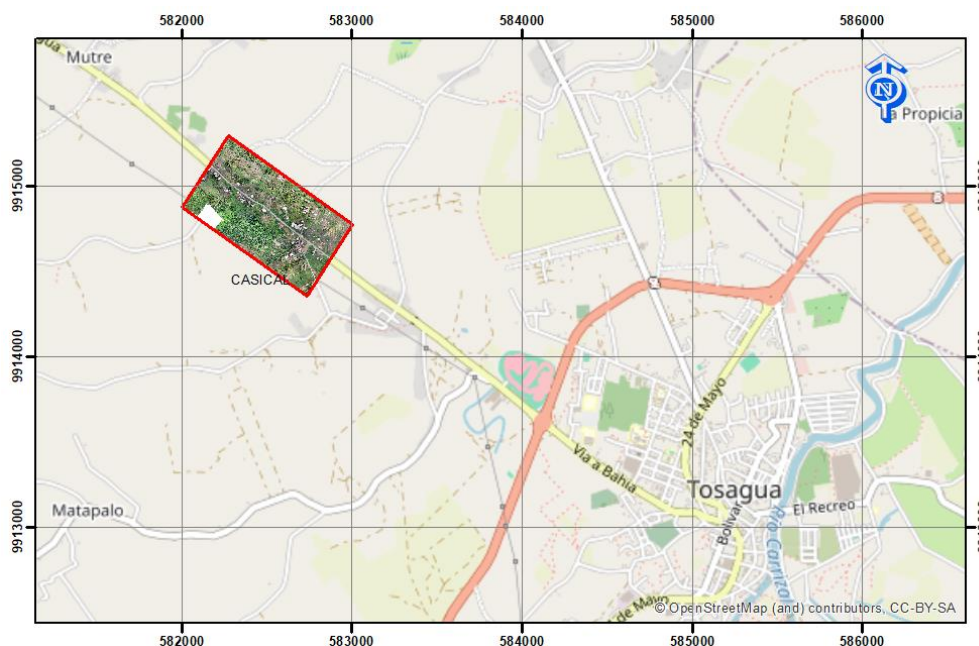


Todo este proceso se lo realiza en dos etapas:

✓ Trabajos de Campo

✓ Trabajos de gabinete post proceso

Figura 1: Ubicación del proyecto



Cuadrícula

Luego de identificar el área del proyecto, se procedió a realizar la cuadrícula correspondiente, para ello, se utilizó equipos de GPS de precisión (GNSS) al momento de medir los puntos, y a su vez, iniciando y comparando por medio de la nivelación y contra nivelación.

Metodología para toma de datos método estáticos

Una vez que se obtuvo el listado de los lugares donde se requería los Puntos con método estáticos, se realizó la visita técnica identificando los puntos más idóneos para empezar con el proceso de campo, en cuanto a la colocación de la Base se eligió en el Sitio Casical de Tosagua.

CÓDIGO	COORDENADAS			SITIO
	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	
BASE	9915116.690	582291.304	67.947	CASICAL

El concepto básico del sistema de posicionamiento global es la trilaterización de los satélites, que es un método para calcular las

posiciones relativas de los objetos a partir de la geometría de triángulos; los sistemas de navegación por satélites tienen una estructura

definida que se divide en tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuarios.

El segmento espacial está compuesto por los satélites, estos orbitan alrededor de la Tierra en distintos planos orbitales. Una de las características de estos satélites es que están equipados con un reloj atómico, que permite calcular la distancia por medio de la diferencia de tiempo; el sistema GPS garantiza mínimo cinco satélites visibles en cualquier parte del mundo (sobre el horizonte).

El segmento de control está formado por un conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites, cuya función es aplicar correcciones de posición orbital y temporal, enviando información de sincronización de relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a los distintos satélites.

El método utilizado se trata del clásico posicionamiento para la medida de distancias con gran precisión ($5\text{mm} + 1\text{ppm}$) en el que dos o más receptores se estacionan y observan durante un periodo mínimo de media hora, una o dos (o más), según la redundancia y

precisión necesarias, y en función de la configuración de la constelación local y distancia a observar. Los resultados obtenidos pueden alcanzar precisiones muy altas, teóricamente hasta niveles milimétricos. Este método es el empleado para medir distancias mayores de 20 kilómetros con toda precisión. Siendo aplicada para este estudio con una red de puntos de gran precisión.

El criterio para decidir la ubicación de cada punto Estático se lo realiza con fin de que sea representativo en el espacio global del proyecto, y se ha tenido en cuenta de marcarlos en puntos seguros de preferencia elementos existentes de hormigón, para impedir que posibles obras futuras puedan hacerlos desaparecer además, suficientemente alejados de edificios, árboles y todo tipo de obstáculos que nos hicieran imposible la medición con GPS, ya que necesita una amplia visión del cielo para captar el mayor número de satélites posible.

En cuanto a los trabajos de oficina una vez descargada la información se la procesa en el Software Trimble Business Center, este Software

TBC, combina datos brutos obtenidos a partir de mediciones GNSS; garantizando de esta manera información confiable y precisa; todo en un solo entorno de trabajo, Efectúa el procesamiento de observaciones GNSS estáticas o

cinemáticas, a través de cálculos y correcciones permite realizar el ajuste de poligonales, de red dándonos un Informe de procesamiento de líneas base reflejado en coordenadas X, Y y Z.

Figura 2. Parámetros y Resultados de procesamiento de Estáticos

Datos del archivo del proyecto		Sistema de coordenadas	
Nombre:	D:\01 ROBERT WILLIAM\1.- MAESTRIA VIALIDAD 2020 RWGC\15.- Trabajo de Titulación\Trabajo de Campo\Estáticos\Casical050323.vce	Nombre:	World wide/UTM
Tamaño:	41 KB	Datum:	WGS 1984
Modificado/a:	5/3/2023 14:09:23 (UTC-5)	Zona:	17 South
Zona horaria:	Hora est. Pacífico, Sudamérica	Geoid:	EGM96 (Global)
Número de referencia:		Datum vertical:	
Descripción:		Obra calibrada:	
Comentario 1:			
Comentario 2:			
Comentario 3:			

Informe de procesamiento de líneas base

Procesando resumen									
Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Accl. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)	
DEFAULT --- 110 (B1)	DEFAULT	110	Fija	0.011	0.020	150°48'52"	482.912	-35.818	
100 --- 110 (B2)	100	110	Fija	0.012	0.024	150°48'54"	482.904	-36.044	
DEFAULT --- 113 (B3)	DEFAULT	113	Fija	0.019	0.029	128°49'08"	2363.210	-56.122	
DEFAULT --- 103 (B4)	DEFAULT	103	Fija	0.007	0.014	122°30'52"	606.618	-55.069	
DEFAULT --- 102 (B5)	DEFAULT	102	Fija	0.007	0.010	122°56'55"	441.445	-53.483	
DEFAULT --- 114 (B6)	DEFAULT	114	Fija	0.006	0.010	104°52'00"	236.907	-39.928	
100 --- 109 (B7)	100	109	Fija	0.003	0.005	168°15'46"	251.461	-24.240	
100 --- 108 (B8)	100	108	Fija	0.002	0.005	202°59'15"	223.314	-2.038	
111 --- 110 (B9)	111	110	Fija	0.008	0.015	314°19'01"	182.659	17.355	
DEFAULT --- 111 (B10)	DEFAULT	111	Fija	0.008	0.014	146°18'29"	660.088	-53.167	
100 --- 111 (B11)	100	111	Fija	0.003	0.006	146°18'29"	660.084	-53.397	
113 --- 112 (B12)	113	112	Fija	0.005	0.006	267°33'48"	14.923	-0.046	
DEFAULT --- 112 (B13)	DEFAULT	112	Fija	0.006	0.008	129°03'30"	2352.002	-56.154	
104 --- 103 (B14)	104	103	Fija	0.009	0.017	18°33'09"	141.094	-1.340	
DEFAULT --- 104 (B15)	DEFAULT	104	Fija	0.003	0.007	134°34'44"	655.123	-53.756	
105 --- 102 (B16)	105	102	Fija	0.013	0.019	32°30'18"	109.508	-6.349	
105 --- 103 (B17)	105	103	Fija	0.016	0.026	88°10'12"	200.038	-7.950	
DEFAULT --- 105 (B18)	DEFAULT	105	Fija	0.003	0.004	136°51'15"	455.646	-47.131	
106 --- 114 (B19)	106	114	Fija	0.010	0.016	35°51'25"	169.816	-11.348	

Una vez procesado los puntos estáticos se procedió a realizar la nivelación y contra nivelación de

cada uno de los puntos de lo cual se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 2: Resultados de nivelación

Nº PUNTO	DESCRIPCIÓN	COTA ESTÁTICO	COTA NIVELACIÓN	DIFERENCIA DE COTA	OBSERVACIÓN
100	BASE	67.947	67.947	0.000	Cota de arranque
102	ESTÁTICO	14.218	14.209	0.009	
103	ESTÁTICO	12.604	12.579	0.025	
104	ESTÁTICO	13.964	13.940	0.024	

105	ESTÁTICO	20.566	20.557	0.009	
106	ESTÁTICO	39.147	39.143	0.004	
107	ESTÁTICO	48.478	48.475	0.003	
108	ESTÁTICO	65.909	65.904	0.005	
109	ESTÁTICO	43.716	43.713	0.003	
110	ESTÁTICO	31.92	31.909	0.011	
111	ESTÁTICO	14.546	14.517	0.029	
112	ESTÁTICO	11.47	11.410	0.060	
113	ESTÁTICO	11.499	11.433	0.066	
114	ESTÁTICO	27.816	27.811	0.005	

Figura 3: Procesamiento de imagen



Figura 4: Datos del Levantamiento

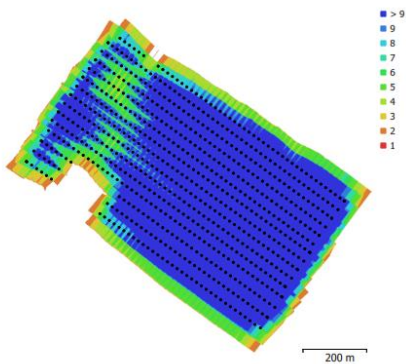


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 750

Altitud media de vuelo: 92.1 m

Resolución en terreno: 2.31 cm/pix

Superficie cubierta: 0.577 km²

Posiciones de cámara: 720

Puntos de enlace: 1,135,551

Proyecciones: 3,346,162

Error de reproyección: 0.637 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC6310S (8.8 mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Figura 5: Calibración de Cámara

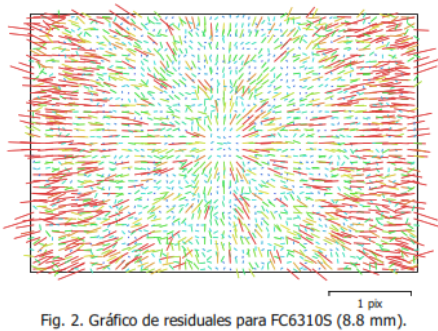


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC6310S (8.8 mm).

FC6310S (8.8 mm)
750 imágenes

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 micras

	Valor	Error	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3635.56											
P3	-0.0731241											
P4	0.0215396											
Cx	18.192	0.021	1.00	-0.00	0.08	-0.05	0.03	-0.01	0.01	-0.00	0.35	0.02
Cy	-3.59955	0.018		1.00	0.05	0.04	-0.02	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.34
B1	0.146787	0.034			1.00	-0.02	-0.00	-0.01	0.02	-0.02	-0.03	0.01
B2	1.59029	0.033				1.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.03	-0.03
K1	-0.00750592	3.3e-05					1.00	-0.75	0.72	-0.68	0.24	0.07
K2	-0.0313535	0.00012						1.00	-0.99	0.96	-0.00	-0.00
K3	0.0672845	0.00022							1.00	-0.99	-0.00	0.00
K4	-0.0377223	0.00014								1.00	0.00	-0.00
P1	0.000755945	9.6e-07									1.00	0.07
P2	-0.00100264	7.8e-07										1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Figura 6: Puntos de Control Terrestre

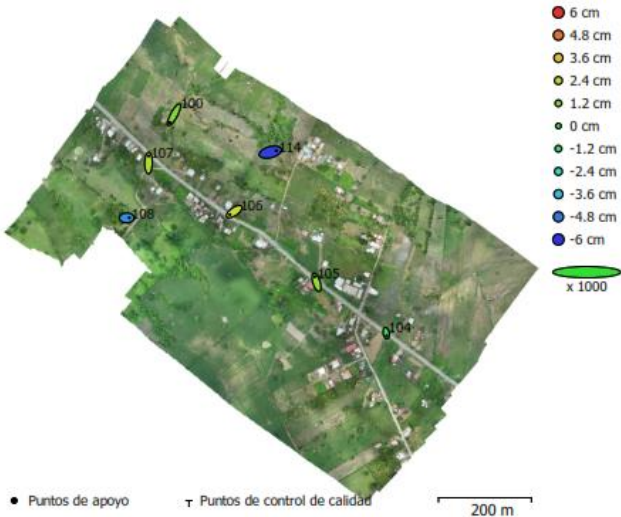


Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de puntos de apoyo se indican con los puntos negros, puntos de control
- con cruzamiento.

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)
7	1.44301	2.05259	3.13646	2.50906	4.01656

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Tabla 3: Puntos de apoyo

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
100	-1.8114	-3.3293	1.26014	3.99416	0.029 (4)
104	0.196446	-1.14868	-0.505388	1.27022	0.342 (5)
105	-0.782761	2.40361	1.65773	3.02293	0.175 (6)
106	-1.80181	-1.24934	2.56163	3.37185	0.147 (5)
107	0.0643138	3.05456	2.0639	3.68703	0.074 (4)
108	1.09745	0.0322589	-4.42393	4.55813	0.044 (2)
114	2.48765	0.646974	-5.82043	6.36273	0.170 (4)
Total	1.44301	2.05259	3.13646	4.01656	0.184

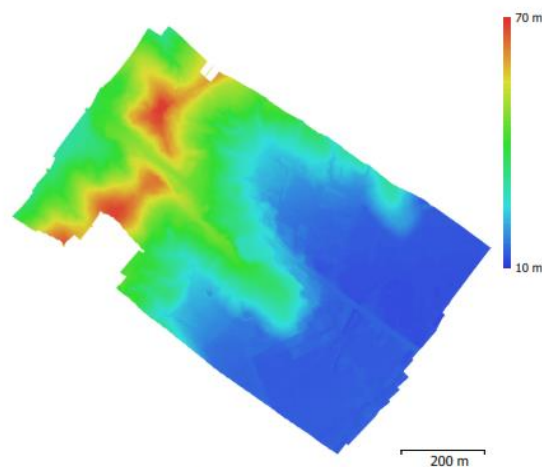
Figura 7: Modelo Digital de elevaciones

Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 4.62 cm/pix
 Densidad de puntos: 469 puntos/m²

El modelo digital de elevaciones (DEM) generado en esta investigación proporcionó una representación detallada y precisa de la topografía del área de estudio en la vía Tosagua-Bahía, sitio Casical. Con un tamaño de 34,788 x 31,734 y empleando el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 17S, el DEM fue crucial para analizar la dinámica de los desplazamientos en la carretera.

El proceso de creación del DEM se basó en la generación de una nube de puntos densa a partir de imágenes captadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT). La alta calidad y densidad de la nube de puntos, compuesta por 364,476,612 puntos, permitió una detallada reconstrucción del terreno. La interpolación habilitada durante el procesamiento del DEM garantizó una suavización de la superficie digital, reduciendo las

irregularidades y mejorando la precisión de la topografía representada.

El tiempo de procesamiento para la creación del DEM fue eficiente, con una duración de 7 minutos y 32 segundos, lo cual es indicativo de la eficacia de los algoritmos y el software utilizados (versión 1.4.0 build 5076 en plataforma Windows 64). Este rendimiento permitió la rápida generación de resultados que son fundamentales para el monitoreo y análisis de desplazamientos.

El DEM obtenido facilita la visualización tridimensional del área de estudio, proporcionando una herramienta valiosa para identificar zonas de riesgo y movimientos superficiales que podrían comprometer la estabilidad de la carretera. Además, este modelo digital es esencial para la planificación y ejecución de medidas de mitigación, ya que permite una comprensión detallada de la morfología del terreno.

Figura 8: Parámetros de procesamiento

Generales	
Cámaras	750
Cámaras orientadas	720
Marcadores	14
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG::32717)
Ángulo de rotación	Guñada, cabeceo, alabeo
Nube de puntos	
Puntos	1,135,551 de 1,224,059
RMS error de reproyección	0.1601 (0.636762 pix)
Error de reproyección máximo	1.1054 (44.118 pik)
Tamaño promedio de puntos característicos	3.40517 pix
Superposición efectiva	3.0824
Parámetros de orientación	
Precisión	Alta
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	10,000
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	10 minutos 46 segundos
Parámetros de optimización	
Parámetros	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Compensar rolling-shutter	No
Tiempo de optimización	29 segundos
Nube de puntos densa	
Puntos	364,476,612
Parámetros de reconstrucción	
Calidad	Alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	1 hora 0 minutos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	1 hora 50 minutos
DEM	
Tamaño	34,788 x 31,734
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG::32717)
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	7 minutos 32 segundos
Ortomosaico	
Tamaño	49,819 x 45,377
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG::32717)
Canales	3, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	14 minutos 49 segundos
Software	
Versión	1.4.0 build 5076
Plataforma	Windows 64

Discusión

La presente investigación sobre la determinación de desplazamientos en carreteras mediante técnicas de Geomática se comparó con diversos estudios similares para evaluar la efectividad y precisión de los métodos empleados. Al analizar los resultados obtenidos, se observó que los métodos utilizados son consistentes y comparables con las técnicas y resultados reportados en otras investigaciones relevantes.

Uno de los aspectos clave de esta investigación fue la utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la captura de imágenes y la generación de nubes de puntos densas. Este enfoque es ampliamente reconocido por su alta precisión y eficiencia. Por ejemplo, Turner, Lucieer y Watson (2012) destacaron la precisión del VANT en estudios topográficos, donde los errores de reproyección fueron bajos y comparables con los obtenidos en este estudio (0.1601 píxeles). En la presente investigación, se logró una densidad de nube de puntos de 364,476,612 puntos, lo que subraya la capacidad del VANT para proporcionar datos detallados y precisos.

Asimismo, los resultados de la generación de modelos digitales de elevación (DEM) en este estudio fueron satisfactorios, con un tamaño de 34,788 x 31,734 y un tiempo de procesamiento eficiente de 7 minutos y 32 segundos. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Colomina y Molina (2014), quienes resaltaron la precisión de los DEM generados a partir de datos capturados por VANT y su capacidad para detectar pequeños desplazamientos en terrenos complejos.

En cuanto a la orientación y optimización de las imágenes, la investigación reportó el uso de 40,000 puntos clave y 10,000 puntos de enlace por foto, con un tiempo de búsqueda de puntos homólogos de 10 minutos y 46 segundos. Comparativamente, en el estudio de Harwin y Lucieer (2012), se utilizaron parámetros similares, demostrando que la selección adecuada de puntos clave y homólogos es crucial para la precisión en la generación de modelos geoespaciales. La precisión alta obtenida en este estudio confirma la efectividad de estos parámetros en la mejora de la calidad de los datos procesados.

La comparación con el estudio de James y Robson (2012) revela similitudes en la calidad de las nubes de puntos densas generadas. En ambos estudios, se emplearon métodos de filtrado agresivo de profundidad para asegurar la alta calidad de las nubes de puntos. En este estudio, el tiempo de generación de mapas de profundidad fue de 1 hora, similar al tiempo reportado por James y Robson, lo cual valida la eficiencia del proceso empleado.

En términos de software y plataformas utilizadas, la investigación empleó la versión 1.4.0 build 5076 en plataforma Windows 64, lo cual es comparable con las herramientas utilizadas en otros estudios, como el software Agisoft Metashape utilizado por Micheletti, Chandler y Lane (2015). La robustez y capacidad del software para manejar grandes volúmenes de datos geoespaciales fueron evidentes en ambos estudios, permitiendo la generación precisa y detallada de modelos digitales de elevación y ortomosaicos.

El ortomosaico resultante en esta investigación, con dimensiones de 49,819 x 45,377, también se

comparó favorablemente con los resultados de Nex y Remondino (2014), quienes destacaron la importancia de los ortomosaicos en la cartografía de alta precisión. En ambos estudios, la integración de modelos digitales de elevación en la generación de ortomosaicos permitió una representación topográfica precisa y útil para la identificación de desplazamientos en carreteras.

En conclusión, al comparar los resultados de esta investigación con otros estudios similares, se puede afirmar que las técnicas de Geomática utilizadas, incluyendo el uso de VANT, técnicas geodésicas y observación geológica, son altamente efectivas para la determinación y monitoreo de desplazamientos en carreteras. Los parámetros de precisión, tiempos de procesamiento y calidad de los datos obtenidos son consistentes con los reportados en la literatura, lo que valida la metodología empleada. Esta investigación contribuye al cuerpo de conocimiento existente, demostrando que el uso combinado de estas técnicas proporciona una herramienta poderosa y precisa para la gestión de infraestructuras viales,

mejorando la seguridad y durabilidad de las carreteras.

4. Conclusiones

La investigación utilizó 750 cámaras para la captura de imágenes, de las cuales 720 fueron orientadas correctamente, y se emplearon 14 marcadores. La elevada cantidad de puntos generados en la nube de puntos, que osciló entre 1,135,551 y 1,224,059, indica una cobertura exhaustiva del área de estudio. La baja RMS de error de reproyección (0.1601 píxeles) y el error de reproyección máximo (1.1054 píxeles) reflejan una alta precisión en la captura y procesamiento de imágenes, lo que garantiza la fiabilidad de los datos recopilados.

La precisión en los parámetros de orientación se mantuvo alta, con una preselección genérica y de referencia efectivas. La utilización de 40,000 puntos clave y 10,000 puntos de enlace por foto, así como el tiempo de búsqueda de puntos homólogos de 10 minutos y 46 segundos, demuestran un proceso minucioso y detallado que permitió una correcta alineación y orientación de las imágenes.

La nube de puntos densa, compuesta por 364,476,612 puntos, se generó con alta calidad mediante un filtrado agresivo de profundidad. El tiempo de generación de mapas de profundidad fue de 1 hora y el tiempo de generación de la nube de puntos densa fue de 1 hora y 50 minutos, lo que indica un proceso eficiente en términos de tiempo y detalle.

El DEM generado, con un tamaño de 34,788 x 31,734, utilizó la nube de puntos densa como fuente de datos, con interpolación habilitada. El procesamiento duró 7 minutos y 32 segundos, lo que evidencia un método eficaz para la reconstrucción topográfica del área de estudio. La precisión del DEM es crucial para la evaluación de desplazamientos y para la planificación de medidas de mitigación.

El ortomosaico resultante, con dimensiones de 49,819 x 45,377 y utilizando el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 17S, proporcionó una representación detallada y precisa del terreno. El procesamiento del ortomosaico, que duró 14 minutos y 49 segundos, se realizó con un modelo digital de elevaciones, asegurando la

exactitud en la representación superficial y permitiendo la identificación precisa de desplazamientos.

El software utilizado, versión 1.4.0 build 5076, en plataforma Windows 64, demostró ser adecuado y eficiente para la gestión y procesamiento de grandes volúmenes de datos geoespaciales. La robustez y capacidades del software fueron fundamentales para la generación de resultados precisos y detallados.

En conclusión, la investigación demostró que el uso combinado de técnicas de Geomática, incluyendo la captura de imágenes con VANT, técnicas geodésicas espaciales y observación geológica, es altamente efectivo para la determinación y monitoreo de desplazamientos en carreteras. Los resultados obtenidos, respaldados por una alta precisión y calidad en los datos procesados, ofrecen una herramienta poderosa para la gestión y planificación de infraestructuras viales, contribuyendo a una mayor seguridad y durabilidad de las carreteras.

Recomendaciones

Se recomienda establecer un sistema de monitoreo continuo utilizando técnicas de Geomática, incluyendo VANT y GPS, para la vigilancia permanente de los desplazamientos en la carretera Tosagua-Bahía, sitio Casical. La instalación de una red de puntos de control geodésicos permitirá la detección temprana de movimientos superficiales, facilitando la toma de decisiones preventivas y correctivas en tiempo real.

Además del monitoreo continuo, es aconsejable llevar a cabo inspecciones visuales periódicas para complementar los datos obtenidos mediante métodos geomáticos. Estas inspecciones ayudarán a identificar signos tempranos de deterioro no capturados digitalmente, como fisuras menores o cambios en la vegetación, proporcionando una perspectiva integral sobre el estado de la infraestructura vial.

Se sugiere desarrollar y mantener un SIG actualizado que integre todos los datos recopilados, incluyendo imágenes de VANT, nubes de puntos, DEM y otros datos geoespaciales relevantes. Este

sistema servirá como una plataforma centralizada para el análisis, visualización y gestión de la información, facilitando la planificación de intervenciones y la coordinación entre diferentes entidades involucradas en la gestión de la infraestructura.

Es fundamental capacitar a los ingenieros, topógrafos y otros profesionales involucrados en el uso y manejo de tecnologías de Geomática. La formación adecuada en el manejo de VANT, GPS y software de procesamiento de datos geoespaciales asegurará que el personal pueda interpretar correctamente los datos y aplicar las mejores prácticas en el monitoreo y mantenimiento de las carreteras, mejorando así la seguridad y eficiencia operativa.

Bibliografía

- Becerra, C., & De Rurange, J. (2021). Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Sector Monjes Blancos, Región del Maule, Chile. *Investigaciones Geográficas*, (61), 87-98. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.59646>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Harwin, S., & Lucieer, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, 4(6), 1573-1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- Harwin, S., & Lucieer, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, 4(6), 1573-1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and

- topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3). <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). **Geographic Information Systems and Science**. John Wiley & Sons.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. *Geomorphology*, 250, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.021>
- Nappo, N., Mavrouli, O., Nex, F., van Westen, C., Gambillara, R., & Michetti, A. M. (2021). Use of UAV-based photogrammetry products for semi-automatic detection and classification of asphalt road damage in landslide-affected areas. *Engineering Geology*, 294, 106363. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106363>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Pellicani, R., Argentiero, I., Manzari, P., Spilotro, G., Marzo, C., Ermini, R., & Apollonio, C. (2019). UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy). *Geociencias*, 9(6), 248. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060248>
- Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., & Casagli, N. (2018). Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides*, 15, 1045–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392-1410. <https://doi.org/10.3390/rs4051392>
- Zhao, C., & Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides—A review. *Remote Sensing*, 10(2), 279. <https://doi.org/10.3390/rs10020279>