

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Evaluación de la influencia de la cantidad de GCP en la calidad de medición de un bloque fotogramétrico levantado con un UAV modo RTK en entornos geográficos con rugosidad topográfica alta

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Kevin De Flué Pilco Lopez

Asesor:

Mg. Moises Araca Chile

Juliaca, setiembre de 2024

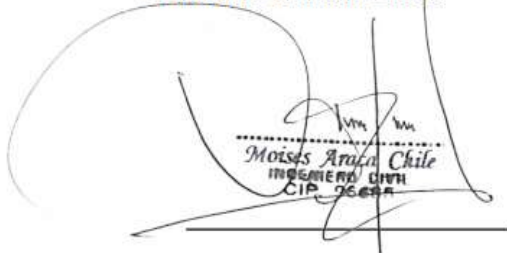
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Moises Araca Chile, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE GCP EN LA CALIDAD DE MEDICIÓN DE UN BLOQUE FOTOGAMÉTRICO LEVANTADO CON UN UAV MODO RTK EN ENTORNOS GEOGRÁFICOS CON RUGOSIDAD TOPOGRÁFICA ALTA”** del autor Kevin De Flué Pilco Lopez tiene un índice de similitud de 14% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 16 días del mes de setiembre del año 2024.

A handwritten signature in black ink is written over a rectangular stamp. The stamp contains the text: "Moises Araca Chile", "INGENIERO CIVIL", and "CIP. 96694". The signature is a stylized, cursive script that overlaps the stamp and extends to the left and right.

Mg. Moises Araca Chile

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 10 día(s) del mes de setiembre del año 2024 siendo las 14:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mtro. Leonel Chahueros Paucar el (la) secretario(a): Iny. Herson

Duberly Pari Lusi y los demás miembros: Mg. Edwin

Rarillo Escarano y el (la) asesor(a) Iny. Moises

Araca Chile con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Evaluación de la influencia de la cantidad de GCP en la calidad de medición de un bloque fotogramétrico levantado con un UAV modo RTK en entornos geográficos con rugosidad topográfica alta. del(los) bachiller(es): a) Karin De Flué Pilco Lopez

b)

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Karin De Flué Pilco Lopez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (c)

Índice general

Índice de tablas	v
Índice de figuras.....	vi
Índice de Anexos	vii
Capítulo I. Introducción.....	10
Capítulo II. Metodología.....	13
2.1. Área de estudio	13
2.2. Adquisición de datos	13
2.3. Escenarios de evaluación de los puntos de control.....	17
2.4. Procesamiento de la información fotogramétrica.....	18
2.5. Control de la calidad de las mediciones	20
Capítulo III. Resultados	21
3.1. Valoración del modelo utilizando el error cuadrático medio (RMSE).....	21
3.2. Análisis estadístico	26
Capítulo IV. Discusiones	29
Capítulo V. Conclusiones	34
Referencias	36

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Especificaciones del UAV</i>	15
Tabla 2 <i>Especificaciones de la Computadora de Procesamiento</i>	20
Tabla 3 <i>Análisis de Errores Para los Ocho Escenarios de GCP Probados, Detallando la Configuración y Cantidad de GCP Utilizados, así Como las Métricas de Error Resultantes en las Tres Dimensiones</i>	22
Tabla 4 <i>Resultados de la Prueba T de Muestra Única</i>	28

Índice de figuras

Figura 1 <i>Área de Estudio. Sistema de Coordenadas de Proyección: WGS_1984_UTM_Zona_19S.</i>	13
Figura 2 <i>Mapa Simplificado del Ámbito de Investigación. (B) Fotografía del Área Específica Bajo Estudio. (C) Compuesta por Cinco Imágenes Propias de la Investigación. En la Imagen (a), se Destaca el Punto Geodésico de Orden C. En la Imagen (b), se Presenta el Blanco Fotogramétrico. La Medición de los Puntos de Control en el Terreno se Ilustra en la Imagen (c). La Estación Base D-RTK2 se Visualiza en la Imagen (d), Mientras que en la Imagen (e) se Muestra el UAV DJI Mavic 3 Enterprise RTK.....</i>	16
Figura 3 <i>Escenarios de Distribución de GCP Desde 0 a 7 GCPs.</i>	18
Figura 4 <i>Configuración Espacial de los Errores Absolutos en Eje Z Para Cada Escenario de GCPs</i>	23
Figura 5 <i>Función de Ajuste Lineal Entre las Elevaciones de CP y las Elevaciones del DSM en Ausencia de GCP</i>	24
Figura 6 <i>La Diferencia Entre los CP y los 8 Escenarios se Visualizan a Través de Diagramas de Cajas. En Estos Gráficos, la Línea Horizontal Denota la Mediana, la Parte Inferior de la Bisagra Representa el Percentil 25, y la Parte Superior Refleja el Percentil 75. Los "Bigotes" se Extienden Hasta 1,5 Veces el Rango Intercuartil (IQR) En Ambas Direcciones. Además, los Círculos Negros Valores Atípico.....</i>	25
Figura 7 <i>Relación Entre el Error y la Distancia Entre los GCP y el CP: (a) Horizontal y (b) Vertical.....</i>	26
Figura 8 <i>Histogramas de diferencias en elevación entre los CP y UAV-RTK acompañados por 0 y 4 GCP y su ajuste gaussiano.....</i>	27

Índice de Anexos

Anexo A Evidencia de sumisión.....	39
Anexo B Copia de resolución	40
Anexo C Monumentación de Punto Geodésico de Orden C	41

Evaluación de la influencia de la cantidad de GCP en la calidad de medición de un bloque fotogramétrico levantado con un UAV modo RTK en entornos geográficos con rugosidad topográfica alta

Resumen:

El uso de puntos de control terrestre (GCPs) es esencial para calibrar con precisión el posicionamiento fotogramétrico en la teledetección con vehículos aéreos no tripulados (UAV). Sin embargo, la colocación manual de GCP en la georreferenciación puede ser costoso y consumir mucho tiempo particularmente en terrenos complejos, lo que potencialmente limita la eficiencia operativa y la efectividad del sistema. No obstante, la integración de receptores de navegación modernos con software avanzado cinemática en tiempo real (RTK) ofrece, un potencial significativo para mejorar la precisión fotogramétrica cuando se utiliza con vehículos aéreos no tripulados.

El propósito de este estudio fue, evaluar cómo las cantidades variables de GCPs afectan la precisión fotogramétrica en terrenos geográficamente desafiantes. Se utilizó un UAV equipado con tecnología RTK avanzado y soporte del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). Se empleó el error cuadrático medio (RMSE) de los puntos de control (CP) para evaluar la calidad de las mediciones de los ocho escenarios propuestos. Los hallazgos indican que, aumentar el número de GCPs y garantizar una distribución uniforme reduce notablemente el RMSE para los CP con mejoras observadas desde los 3 GCPs contrariamente, a resultados de estudios anteriores que sugieren un 1 GCP en contextos de georreferenciación directa (DG). El análisis de los resultados propone un rango óptimo de 4 a 5 GCPs que consistentemente arrojaron resultados en un rango de decímetros.

Palabras clave: Georreferenciación directa, GCPs, bloque fotogramétrico, evaluación de la precisión.

Evaluation of the influence of the amount of GCP on the measurement quality of a photogrammetric block surveyed with a UAV RTK mode in geographical environments with high topographic roughness

Abstract

The use of Ground Control Points (GCPs) is essential for accurately calibrating photogrammetric positioning in UAV-based remote sensing. However, the manual placement of GCPs for georeferencing can be costly and time-consuming, particularly in complex terrains, potentially limiting the operational efficiency and system effectiveness. Nevertheless, the integration of modern navigation receivers with advanced real-time kinematic (RTK) software offers significant potential for enhancing photogrammetric accuracy when employed with unmanned aerial vehicles.

The purpose of this study was to evaluate how varying quantities of GCPs affect photogrammetric accuracy in geographically challenging terrains. A UAV equipped with advanced RTK technology and supported by the Global Navigation Satellite System (GNSS) was used. The Root Mean Square Error (RMSE) of the Check Points (CPs) was employed to assess the measurement quality across the eight proposed scenarios. The findings indicate that increasing the number of GCPs and ensuring a uniform distribution significantly reduces the RMSE for CPs, with improvements observed from as few as 3 GCPs. This contrasts with previous studies suggesting the use of only 1 GCP in direct georeferencing (DG) contexts. The analysis of the results suggests an optimal range of 4 to 5 GCPs, which consistently produced results within the decimeter range.

Keywords: Direct georeferencing, GCPs; photogrammetric block; precision assessment.

Capítulo I. Introducción

En los últimos tiempos, la fotogrametría digital ha experimentado avances significativos en su aplicación a la topografía. Estos avances se han debido principalmente al desarrollo de UAV equipados con cámaras de alta resolución y sensores más avanzados que capturan imágenes en diferentes bandas espectrales, lo que permite obtener información más detallada y precisa del terreno, además el uso de algoritmos de correspondencia automática y software de procesamiento avanzado ha agilizado el proceso de extracción de información topográfica a partir de las imágenes (Benassi et al., 2017).

A pesar de los avances en tecnología y software, es fundamental tener en cuenta varios aspectos para obtener resultados precisos y confiables como: el método de georreferenciación, la cantidad de GCP, la calidad y resolución de las imágenes, la posición y orientación de la cámara, las condiciones atmosféricas, la presencia de sombras y obstáculos, entre otros (Elkhrachy, 2021). En el ámbito de las imágenes capturadas por UAV, se emplean principalmente dos enfoques de georreferenciación directa e indirecta (Padró et al., 2019).

El método de georreferenciación indirecta implica el uso de GCPs para establecer una relación entre las coordenadas de estas y las imágenes capturadas. A partir de esta relación, se puede calcular la georreferenciación de las imágenes y generar modelos fotogramétricos (Elkhrachy, 2021). En el caso de aplicar este método de georreferenciación en entornos geográficos complejos surgen problemas de logística que van desde la inspección y acceso para la colocación de los GCPs, estos aspectos logísticos pueden requerir tiempo y recursos adicionales, lo que puede afectar la planificación y la ejecución (Stott et al., 2020a). Prescindir por completo de los GCPs permitirá reducir el tiempo, lo que se traduce en una reducción de los costos en proyectos relacionados con el levantamiento topográfico en entornos geográficos complejos.

Formalmente la georreferenciación directa implica posicionamiento de la cámara utilizando receptores GNSS a bordo, habilitados para RTK, que son capaces de producir modelos fotogramétricos con una precisión de nivel centimétrico. Esto es posible incluso sin la necesidad de colocar o medir GCPs, o de utilizar un receptor de base local, proporcionando una solución eficiente y conveniente en situaciones donde el tiempo y la accesibilidad son limitados (Taddia et al., 2020). La tecnología RTK permite determinar con mayor exactitud la posición y orientación de la cámara durante la adquisición de imágenes aéreas, una solución prometedora para reducir la dependencia proporcional de los GCPs (Pourreza et al., 2022).

El vasto repertorio de textos existentes usando UAVs capaces de georreferenciación directa confirman lo mencionado anteriormente. En la investigación de (Stott et al., 2020b) afirma que los UAV habilitados para RTK pueden ser utilizados sin GCPs para producir resultados aceptables, con un error cuadrático medio en el eje Z del orden de 0.07 m. Esto con imágenes capturadas con el método de líneas de vuelo cruzadas para obtener una cobertura solapada adecuada, aplicado en corredores longitudinalmente extensos. Por otro lado, Liu et al. (2022) reporta un RMSE en el eje Z de 0.087 m en situaciones similares mediante georreferenciación directa. Además, el estudio realizado por Benassi et al. (2017) refiere un RMSE en altura de 0.095 m utilizando la DG, lo que confirma que esta técnica ofrece una precisión aceptable a comparación con otros métodos tradicionales de georreferenciación. Es importante tener en cuenta que, aunque la georreferenciación directa sin GCP puede producir resultados aceptables en términos de precisión altimétrica, Bertin et al. (2022a) ha demostrado la posibilidad de sesgos en la elevación. Además, sus resultados demostraron la importancia de considerar la inclusión de al menos un GCP. También considerada en su anterior investigación Bertin et al. (2020) con la finalidad de controlar posibles sesgos en la elevación y garantizar una mayor precisión. Sin embargo, al agregar

más GCPs durante el proceso de ajuste del paquete fotogramétrico, la calidad fotogramétrica mejoró gradualmente a medida que se añadían más GCPs. Cabe resaltar que todos estos experimentos fueron realizados en entornos geográficos homogéneos, por lo que el factor topográfico no tuvo influencia significativa en el error de georreferenciación. La precisión de la estimación de la posición de un UAV con receptor GNSS-RTK es el determinante en la aplicabilidad de los UAV para las operaciones topográficas. En la investigación, realizado por Czyża et al. (2023) demostró, la capacidad del receptor GNSS-RTK para proporcionar resultados precisos en términos de posicionamiento con relación a la trayectoria de vuelo planificada, con una discrepancia máxima de 0.05 m lo cual indica que, el UAV fue capaz de obtener resultados precisos y confiables, siendo estas mediciones realizadas en terreno abierto. No obstante, es importante tener en cuenta que la adquisición de datos espaciales en áreas con una estructura más compleja conllevaría una menor estabilidad en el método de corrección utilizado debido al posicionamiento inexacto del UAV durante la adquisición de datos. Como resultado de este, existe el riesgo de una adquisición de datos incompleta para toda el área, así como el desarrollo incorrecto de la cobertura lateral y longitudinal asumida.

Basado en esta realidad, este estudio se centra en evaluar la influencia del número de GCPs en la calidad de un bloque fotogramétrico capturado con un UAV equipado con RTK en un entorno geográfico complejo.

Capítulo II. Metodología

2.1. Área de estudio

El campo de estudio presentado está situado en el Sur del Perú, precisamente en la Región de Puno que es considerada como una zona topográfica compleja, debido a su relieve montañoso y accidentado. El área de estudio, está ubicada en la ciudad de San Miguel. Específicamente, el área en cuestión corresponde a la cantera de rocas Mucra de aproximadamente 14 ha de extensión, con una diferencia de altura de 80 m y una elevación promedio de 3825 m sobre el nivel del mar.

Figura 1

Área de Estudio. Sistema de Coordenadas de Proyección: WGS_1984_UTM_Zona_19S.



2.2. Adquisición de datos

La investigación de campo se dividió en dos fases: la recopilación de datos terrestres el 2 de octubre de 2023 y la recopilación de datos aéreos el 4 de octubre de 2023. En ambas etapas, prevaleció un clima soleado, con una velocidad constante del viento de 3 m/s y

ráfagas que alcanzaron hasta 7 m/s, particularmente en la segunda etapa. La primera etapa inicia con las mediciones de 2 puntos geodésicos de orden C, monumentados con concreto, siendo la marca una placa de bronce de 70 mm de diámetro el cual, lleva inscrito el código del punto PUN11339 y PUN11340 cuyas coordenadas fueron capturadas por 2 receptores GNSS (Emblid RS2) con capacidad de recibir señales de GPS (QZSS L1C/A -L2C), GLONASS L10F-L2OF), BeiDou (B1I-B2I) y Galileo (E1/BC -E5b). Fueron instalados como estación base con un posicionamiento estático relativo horizontal de $\pm 3 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$, (partes por millón) es decir, 1 mm por 1000 m y vertical de $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ por un periodo de 5:02:00 horas y 4:11:15 horas respectivamente. A partir de estos se logró recopilar coordenadas de 117 blancos fotogramétricos de (0.50 x 0.50 m) para ser usados como GCP y CP. Cada blanco fotogramétrico se observó con un receptor móvil GNSS (Emblid RS2) con posicionamiento relativo – RTK en horizontal de $\pm 8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ y vertical de $\pm 14 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ por un periodo de 30 segundos. Cabe resaltar que, las coordenadas fueron anotadas dentro del marco de referencia proporcionado por el sistema WGS84.

Para posprocesar las observaciones estáticas se realizó las correcciones con ayuda de la base de referencia, la Estación de Rastreo Permanente (ERP) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con codificación PU02.

La adquisición de imágenes aéreas para fotogrametría se llevó a cabo con un cuadricóptero Mavic 3 Enterprise RTK de Da Jiang Innovations (DJI) con un peso máximo de despegue de 1050 gr. usando el módulo GNSS, DJI Mavic 3E RTK es capaz de recibir satélites GPS (L1 C/A-L2-L5), BEIDOU(B1-B2-B3), GLONASS(F1-F2), Galileo (E1-E5A-E5B), proporcionando una georreferenciación directa de las imágenes en tiempo real, con precisión flotante de posicionamiento horizontal $\pm 0.10 \text{ m}$, vertical $\pm 0.10 \text{ m}$.

La planificación del vuelo se realizó, en el control del UAV el cual cuenta con la

aplicación DJI pilot 2, se eligió un plan de vuelo que captura imágenes en 3D que nos habilita vuelos de grilla doble. Toda el área de estudio fue cubierta por un vuelo autónomo de grilla doble a una altura constante de 95m con velocidad constante de 3 m/s y ratio de superposición lateral y frontal del 85% con un ángulo del estabilizador a 30° desde la vertical, con el objetivo de eliminar el error de elevación (Štroner et al., 2021). El cual, nos aseguró un GSD orto de 2.01cm/pixel y GSD oblicuo de 2.33 cm/pixel. El UAV está equipado con una cámara que presenta un sensor CMOS de 4/3 de pulgada y cuenta con una resolución de 20 megapíxeles. Este destaca por su equilibrio, tamaño y rendimiento capturando detalles nítidos y colores vibrantes. Por consiguiente, se obtuvo imágenes con una resolución de 5280 x 3856 píxeles.

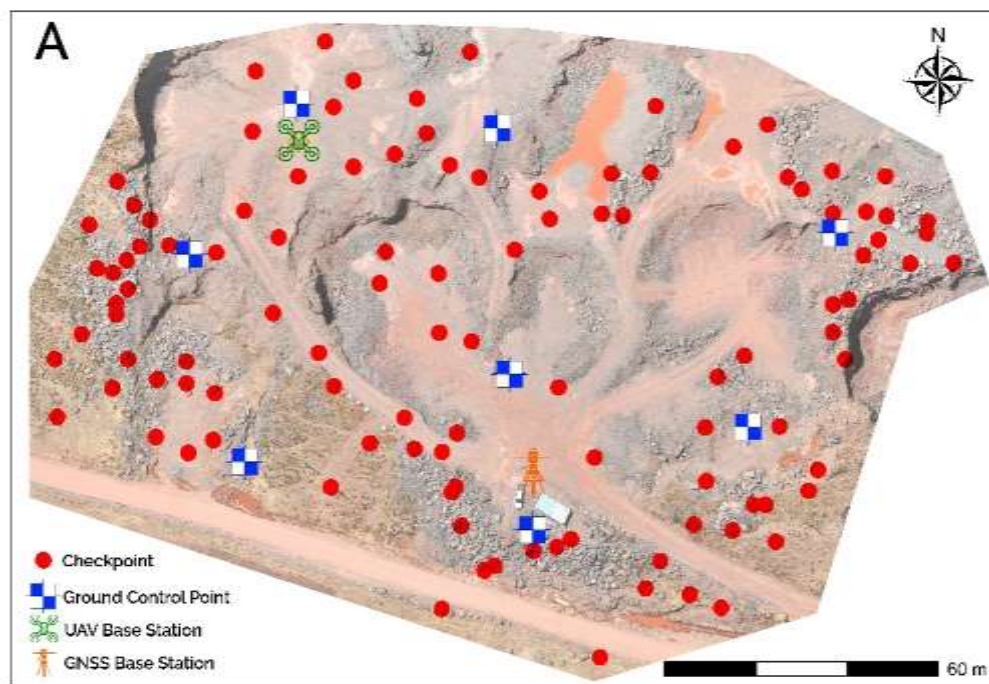
Tabla 1

Especificaciones del UAV

Categoría	Especificación
Modelo	DJI Mavic 3E RTK
Cámara	20 mega píxeles
Precisión flotante (P-mode con GPS)	Vertical: $\pm 0,1$ m (con RTK) Horizontal: $\pm 0,1$ m (con RTK)
Precisión de posicionamiento cuando RTK está habilitado y conectado	Vertical: 1.5 cm y 1ppm Horizontal: 1 cm y 1ppm
Señales rastreadas	GPS (L1 C/A-L2-L5), BEIDOU(B1-B2-B3), GLONASS(F1-F2), Galileo (E1-E5A- E5B)

Figura 2

Mapa Simplificado del Ámbito de Investigación. (B) Fotografía del Área Específica Bajo Estudio. (C) Compuesta por Cinco Imágenes Propias de la Investigación. En la Imagen (a), se Destaca el Punto Geodésico de Orden C. En la Imagen (b), se Presenta el Blanco Fotogramétrico. La Medición de los Puntos de Control en el Terreno se Ilustra en la Imagen (c). La Estación Base D-RTK2 se Visualiza en la Imagen (d), Mientras que en la Imagen (e) se Muestra el UAV DJI Mavic 3 Enterprise RTK

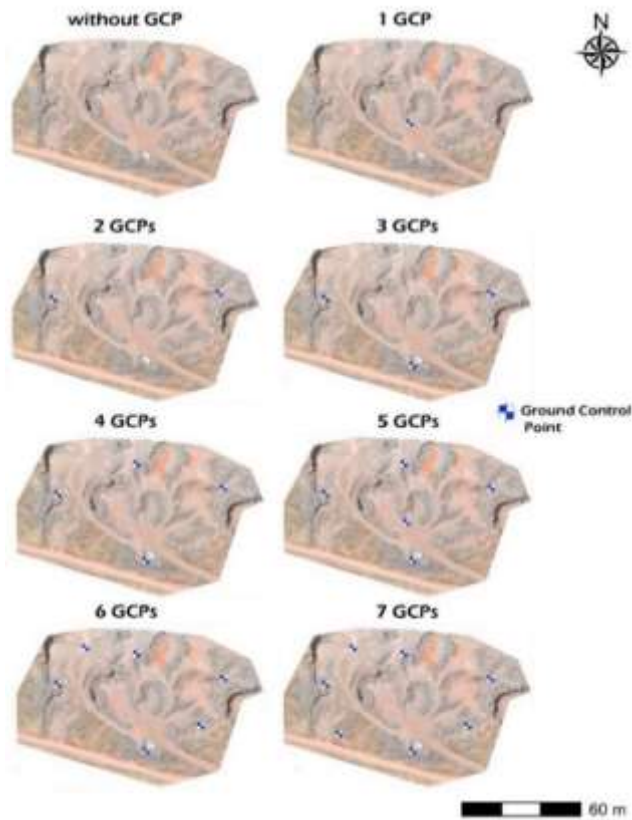


2.3. Escenarios de evaluación de los puntos de control

Con el objetivo de estudiar la configuración y cantidad de GCPs, se propusieron 8 escenarios de prueba. En cada escenario se incrementó la cantidad de GCPs en uno, iniciando con 0 hasta llegar a 7 GCPs en todo el Área de estudio. En el escenario inicial, no se dispuso de ningún GCP. La utilización de imágenes oblicuas y la implementación de planes de vuelo de doble cuadrícula, aseguran un elevado grado de precisión sin requerir la inclusión de GCP (Taddia et al., 2020). En el segundo escenario se consideró las recomendaciones de la literatura actual, que sugiere que la adición de un único punto ubicado en el centro puede lograr una precisión global del RMSE comparable a la fotogrametría tradicional, la cual depende de la presencia de numerosos GCPs bien distribuidos (Bertin et al., 2022a). En el tercer escenario se consideró la sugerencia del estudio de Zhang et al. (2022) donde se indica que establecer GCPs en dos lados de un objeto puede mejorar el efecto de calibración más que colocar GCPs alrededor de él. De manera similar, según lo señala Oniga et al. (2020) se destaca la importancia de los GCPs en las esquinas, pero se advierte que no deben estar posicionados a una distancia excesiva de las esquinas del área de interés. A partir del cuarto escenario que cuenta con 3 GCPs, se diseñaron de acuerdo al estudio de Villanueva y Blanco (2019) refieren, que a medida que los GCPs se distribuyan de manera más amplia en un área, se producirá menores errores, mientras que, si la ubicación de los GCPs está más concentrada, aumentará el error del terreno.

Figura 3

Escenarios de Distribución de GCP Desde 0 a 7 GCPs.



$$N = \frac{k^2 \cdot s^2}{D^2} \quad (a)$$

N: número de GCP necesarios

k: coeficiente de confianza, generalmente 2 para un nivel de confianza del 95%

s: desviación estándar de la distancia entre los puntos de control medidos en campo y las coordenadas conocidas

D: precisión vertical deseada

2.4. Procesamiento de la información fotogramétrica

Se empleó el software Pix4D con licencia educativa para el procesamiento mediante

la técnica de estructura a partir del movimiento (SfM). Uno de los beneficios que nos ofrece la interfaz de Pix4D es que se encuentra en gran medida automatizada. El UAV DJI mavic 3 Enterprise RTK utiliza el sistema de coordenadas WGS84 tanto para la navegación en vuelo como para la geotiquetación de las imágenes digitales. Por lo tanto, en la etapa inicial no se modificó el sistema de coordenadas de las 991 imágenes cargadas. En el pix4D el procedimiento de procesamiento de fotogrametría SfM consta de 3 etapas. En la primera etapa el software realizó la correlación de puntos clave, durante esta fase, se identificaron puntos característicos en las imágenes, lo que permite establecer correspondencias entre las imágenes, creando un conjunto de datos tridimensionales inicial. Después de la identificación de puntos clave, se llevó a cabo la triangulación aérea automática que utilizó la información de la posición precisa proporcionada por el receptor RTK montada en el UAV. Con la finalidad de mejorar la precisión tridimensional el software realizó el ajuste del Bloque de Haz. Esta combinación resultó una nube de puntos tridimensional que representa la nube de puntos capturada por el UAV. En esta etapa el software te brinda la opción de generar la escala de imagen de puntos clave: completa, rápida o personalizada. Inicialmente se consideró la segunda opción esto con la finalidad de aligerar el procesamiento. Esta etapa tuvo un tiempo de procesamiento de 4 horas, una vez culminado el procedimiento se importó los datos de las coordenadas de los CP y GCPs, a diferencia del procesamiento anterior mencionado en este se eligió la primera opción, contrariamente al procesamiento rápido, este identifica y correlaciona los GCPs en las imágenes estableciendo su posición en el modelo tridimensional en función de sus coordenadas conocidas, mientras que en el ajuste del bloque de haz, se toma en cuenta la información de los GCPs, optimizando la posición y orientación de las cámaras para mejorar la alineación del modelo con las coordenadas reales de los puntos de control terrestre. La segunda y tercera etapa se procede con la densificación de la nube de

puntos y la generación de productos finales, como el Modelo de Superficie Digital (DSM) y ortoimágenes, aprovechando la información necesaria proporcionada por el sistema RTK-GNSS. Este procedimiento se realizó para todos los escenarios planeados.

Tabla 2

Especificaciones de la Computadora de Procesamiento

Componente	Especificación
CPU	AMD Ryzen 5 5600X 6-Core Processor
GPU	Radeon RX 570 Series
RAM	16 GB DDR4-2666 MHz
Storage	2TB
Tiempo medio de procesamiento	8 horas y 9 minutos

2.5. Control de la calidad de las mediciones

Para la evaluación de los resultados, se utilizó las métricas de error como: el error medio (ME) que es la media aritmética de los errores en cada dimensión. Así mismo, la desviación estándar medio (SDE) que mide la variabilidad de los errores en cada dimensión y, por último, el error cuadrático medio (RMSE) que es una medida de la precisión global del modelo, el cual combina ME y SDE en una sola medida estadística.

$$ME = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (b)$$

$$SDE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{x}_i)^2} \quad (c)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (d)$$

n : representa el número de CP considerados.

y_i : son las coordenadas X, Y y Z extraídas del bloque fotogramétrico.

x_i : son las coordenadas X, Y y Z medidas con el GPS diferencial.

Capítulo III. Resultados

3.1. Valoración del modelo utilizando el error cuadrático medio (RMSE)

Las discrepancias dentro del conjunto de 117 puntos de control se presentan detalladamente en la Tabla 3, y las diferencias absolutas en el eje Z se visualizan en la Figura 4. Al utilizar exclusivamente la información de la cámara del UAV, sin incorporar GCPs, el error medio (ME), calculado mediante la ecuación (b), mostró valores reducidos en los ejes horizontales (ME X = 0.0693 m, ME Y = 0.0686 m) en contraste con el eje vertical (ME Z = -0.1781 m), el cual exhibió una magnitud elevada. Además, la desviación estándar media (SDE), derivada de la ecuación (c), siguió la misma tendencia, siendo de 0.0141 m, 0.0146 m y 0.0664 m para los ejes X, Y y Z, respectivamente. Los RMSE, calculados mediante la ecuación (d), también mantuvieron esta secuencia, con valores de 0.0707 m, 0.0701 m y 0.1900 m para los ejes X, Y y Z, respectivamente. En resumen, estas estadísticas subrayan que el bloque fotogramétrico capturado mediante DG exhibe un sesgo elevado y una variabilidad relativamente alta; las divergencias más notables se evidencian en el eje Z que son característicos de un estudio de superficie terrestre realizado con UAV.

Tabla 3

Análisis de Errores Para los Ocho Escenarios de GCP Probados, Detallando la Configuración y Cantidad de GCP Utilizados, así Como las Métricas de Error Resultantes en las Tres Dimensiones

Error medio (m)		Desviación estándar (m)						Error cuadrático medio (m)		
Nro GCP	Configuración	<i>x axis</i>	<i>y axis</i>	<i>z axis</i>	<i>x axis</i>	<i>y axis</i>	<i>z axis</i>	<i>x axis</i>	<i>y axis</i>	<i>z axis</i>
0	-	0.0693	0.0686	-0.1781	0.0141	0.0146	0.0664	0.0707	0.0701	0.19
1	Center	0.0664	0.0615	-0.1692	0.0144	0.0145	0.0662	0.0679	0.0632	0.1816
2	Borders	0.059	0.0583	-0.1651	0.0142	0.0146	0.0655	0.0607	0.0601	0.1776
3	Borders	-0.0161	-0.0079	-0.0426	0.014	0.0148	0.0663	0.0214	0.0168	0.0788
4	Borders	-0.0139	-0.006	0.0004	0.014	0.0149	0.0666	0.0197	0.016	0.0666
5	Borders + Center	-0.009	-0.0018	0.0072	0.0139	0.0147	0.0668	0.0166	0.0149	0.0672
6	Borders	-0.0164	-0.002	-0.016	0.0137	0.0149	0.0667	0.0214	0.0151	0.0686
7	Borders	-0.016	-0.0041	-0.011	0.0137	0.0149	0.0669	0.0211	0.0155	0.0678

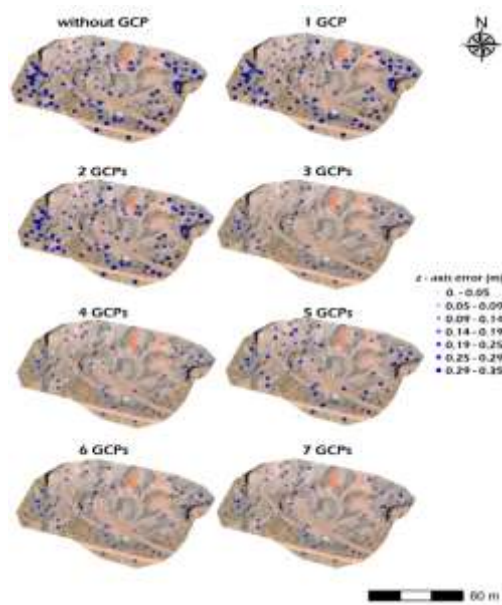
La evaluación de precisión se lleva a cabo mediante métricas de error presentadas en las ecuaciones (b), (c) y (d), cuyos resultados se detallan en la Tabla 3. En relación con el error medio (ME), la inclusión de dos GCPs apenas tuvo un impacto, con discrepancias de 0.0103 m, 0.0103 m y -0.0129 m en los ejes X, Y y Z, respectivamente. Sin embargo, a partir de la incorporación de tres GCP, el error medio (ME) disminuyó significativamente, logrando reducciones de 0.0751 m, 0.0662 m y -0.1226 m para los ejes X, Y y Z, comparándolo con el escenario de dos GCPs. No se observaron cambios sustanciales más allá de esta cantidad de puntos de control. Seguidamente, se presenta el error residual, caracterizado por la desviación estándar (SDE), que mostró valores muy similares para todos los escenarios, como se detalla

en la Tabla 3. El error total se describe a través de la raíz del error cuadrático medio. (RMSE), que siguió la misma tendencia que el ME al disminuir significativamente con la adición de tres GCP en los tres ejes. Al comparar el modelo resultante con cero GCPs, se observaron diferencias de 0.0494 m para el eje X, 0.0533 m para Y y 0.1113 m para Z, siendo este último el valor que experimentó una reducción sustancial.

La implementación de RTK a bordo, acompañada de un número mínimo de GCPs muestra, un impacto positivo en la precisión de elevación como se ilustra en la Figura 4. Durante los 8 escenarios evaluados, se evidencia que los errores absolutos más significativos se localizan en áreas con cambios abruptos de elevación. En los escenarios 1 y 5 donde se elige un GCP en el centro no se observa una disminución apreciable en el RMSE. Por otro lado, en los escenarios 3 y 4 al emplear una configuración de bordes para los GCP se logró, una mejora notable en la reducción del RMSE.

Figura 4

Configuración Espacial de los Errores Absolutos en Eje Z Para Cada Escenario de GCPs



Los resultados experimentales que exploran el impacto de la cantidad de GCP en los tres ejes se presentan en la Tabla 3. En todos los escenarios de GCP se observó, que el error en la dimensión vertical del punto de control fue mayor que el error en la dimensión horizontal. Tanto el error vertical como el horizontal exhibieron una tendencia a la disminución conforme aumentaba el número de GCP. Específicamente, se destacó una disminución significativa en el error vertical con tres GCPs.

Los hallazgos provenientes del análisis de regresión lineal destacan una correlación robusta y positiva entre la elevación calculada mediante el sistema de navegación por satélite GNSS RTK a bordo del UAV y las mediciones terrestres obtenidas con GNSS RTK.

El elevado coeficiente de determinación ($R^2 > 0,99$) subraya la solidez de esta asociación, evidenciando la consistencia y precisión de las mediciones de elevación realizadas por ambas metodologías.

Figura 5

Función de Ajuste Lineal Entre las Elevaciones de CP y las Elevaciones del DSM en Ausencia de GCP

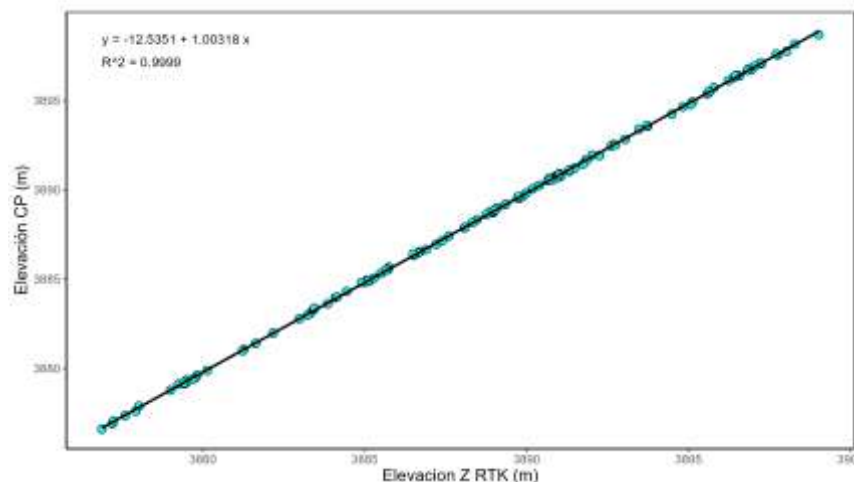
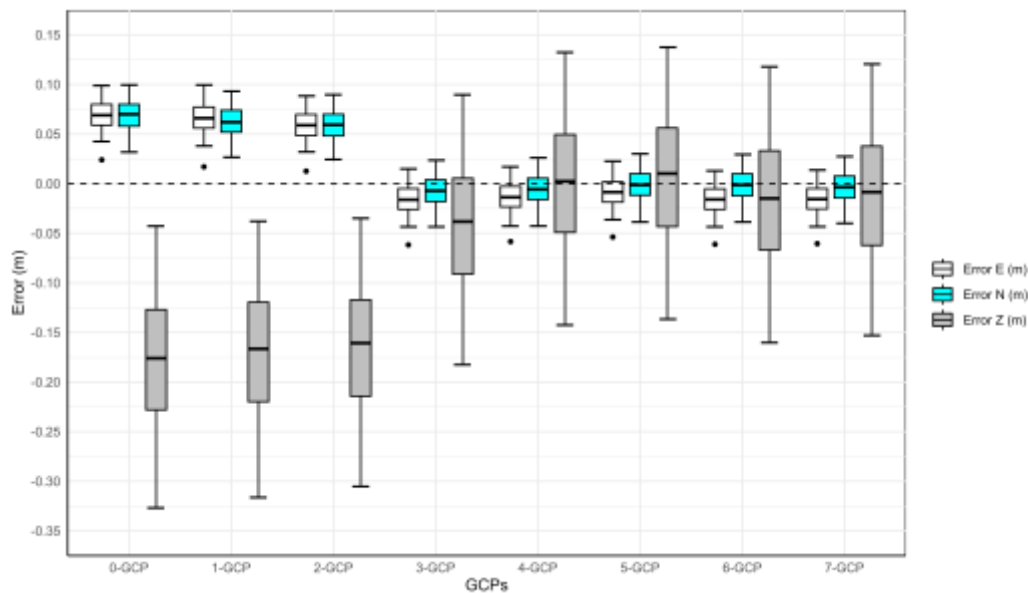


Figura 6

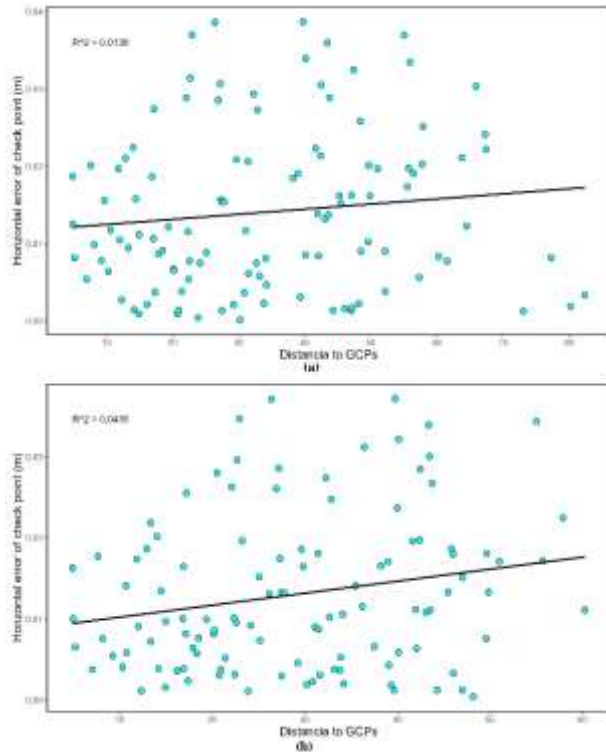
La Diferencia Entre los CP y los 8 Escenarios se Visualizan a Través de Diagramas de Cajas. En Estos Gráficos, la Línea Horizontal Denota la Mediana, la Parte Inferior de la Bisagra Representa el Percentil 25, y la Parte Superior Refleja el Percentil 75. Los "Bigotes" se Extienden Hasta 1,5 Veces el Rango Intercuartil (IQR) En Ambas Direcciones. Además, los Círculos Negros Valores Atípico



Con el objetivo de proponer mejoras prácticas para lograr una fotogrametría más precisa, este estudio no solo abordó la cantidad de GCPs, sino que también, examinó la relación entre la distancia entre los puntos de control y los GCPs. Para la evaluación, se consideran dos Modelos Digitales del Terreno (DSM) generados a partir de tres y cuatro GCPs, identificados previamente como aquellos que presentan el mínimo error. La Figura 7 ilustra la relación entre el error horizontal de los puntos de control y la distancia al GCP más cercano. La Figura 7 (a) corresponde a 3 GCPs mientras que, la Figura 7 (b) representa 4 GCPs. El coeficiente de evaluación resultó ser inferior a 0.05 indicando que, no existe una relación entre el error horizontal y la distancia entre los GCPs y los CP.

Figura 7

Relación Entre el Error y la Distancia Entre los GCP y el CP: (a) Horizontal y (b) Vertical



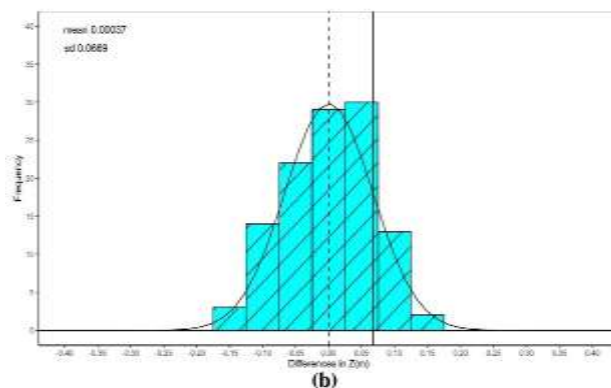
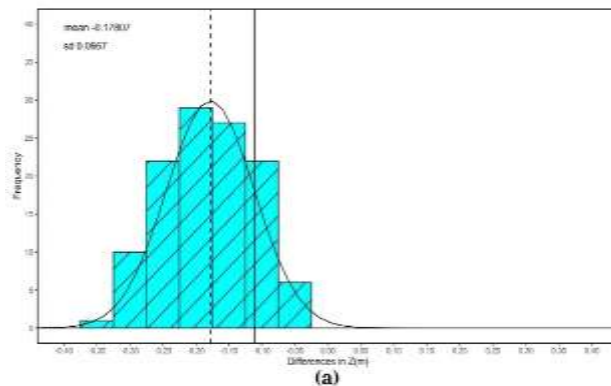
3.2. Análisis estadístico

El enfoque del análisis estadístico se dirigió hacia el eje vertical en lugar del horizontal. Esto se debe a que cuantificar con precisión la elevación resulta más desafiante que determinar la posición horizontal mediante tecnologías GNSS. Los errores son considerablemente menores cuando los satélites triangulan un punto horizontal en la superficie terrestre que al hacerlo con un punto vertical a cierta distancia sobre la superficie. En la Figura 6 se observan histogramas de las diferencias verticales entre los puntos de control y las obtenidas del bloque fotogramétrico realizado con el UAV en modo RTK, para configuraciones de 0 y 4 GCPs, respectivamente. En la Figura 6 (a), el valor medio de -0.0139m sugiere una distribución sistemáticamente sesgada. En cambio, en la Figura 6 (b), el

valor medio es -0.025 m sugiriendo que la adición de 4 GCP contribuye a reducir el error vertical. Se llevó a cabo, la prueba de normalidad según Shapiro-Wilk para los conjuntos de datos con 116 y 112 observaciones correspondientes a 0 y 4 GCPs. Los resultados revelaron estadísticos de prueba (W) de 0.98893 y 0.999 indicando, una fuerte aproximación a una distribución normal, ya que ambos valores se acercan a 1. Además, los valores p asociados fueron 0.4627 y 0.5312 superando el umbral de significancia de 0.05. Por ende, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de normalidad en ninguno de los casos.

Figura 8

Histogramas de diferencias en elevación entre los CP y UAV-RTK acompañados por 0 y 4 GCP y su ajuste gaussiano



Se realizó una prueba t de muestra única, como se muestra en la Tabla 4, con la

premisa de que no hay una diferencia significativa entre la media y el valor de prueba 0. Se realizaron pruebas para tres condiciones diferentes con 0, 2 y 4 GCPs respectivamente.

Tabla 4

Resultados de la Prueba T de Muestra Única

Número de GCPs	0	2	4
t	-29.064	-26.938	0.058
Grados de libertad	116	114	112
Significancia	0.005	0.005	0.954
Valor de diferencia de Medias	-0.177	-0.165	0.000
95% intervalo de confianza			
Limite inf	-0.189	-0.177	-0.012
Limite sup	-0.165	-0.153	0.013

Los T-valores resultaron ser significativamente diferentes, siendo -29.064, -26.938 y 0.058 para 0, 2 y 4 GCPs lo que sugiere que la cantidad de GCPs afecta estadísticamente a las medias. Los grados de libertad disminuyeron a medida que aumentó el número de GCPs (116, 114, 112). Los valores de significancia fueron extremadamente bajos de 0.005 para 0 y 2 GCPs, indicando una fuerte evidencia para rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, para 4 GCPs la significancia fue 0.954 el cual supero el umbral de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula de igualdad de medias. En resumen, estos resultados sugieren que la cantidad de GCPs desempeña un papel crucial en las variaciones observadas en el conjunto de datos.

Capítulo IV. Discusiones

La teledetección a través de UAV es esencial en diversos ámbitos, pero su efectividad se ve comprometida si no se garantiza la precisión. La georreferenciación directa puede potenciar la eficacia de las mediciones de UAV. En este sentido, se examinan los resultados obtenidos y se proponen medidas para mejorar la precisión de diversos proyectos que presentan distintas demandas respecto a la resolución de las características del terreno. La exactitud necesaria varía según el objetivo de generar el DSM. En consecuencia, depender solamente de la DG podría no alcanzar los estándares de precisión elevados.

Tras llevar a cabo las pruebas en los 8 escenarios inicialmente establecidos, se procedió a evaluar cada modelo utilizando el RSME. Los valores del RMSE vertical y horizontales obtenidos mediante DG, con una resolución orto de 2.01 cm/pixel y una resolución oblicua de 2.33 cm/pixel fueron, de 0.07 m y 0.19 m respectivamente. Es importante señalar que la precisión de los resultados sin GCP estaba altamente influenciada por la precisión de los datos de posición de la imagen. Por lo cual, podemos decir que las configuraciones de vuelo diseñadas en función a la literatura actual Liu et al. (2022) como el vuelo de doble grilla conjuntamente con imágenes oblicuas y de Nadir además, de una superposición frontal y horizontal de 85% no ayudo exponencialmente en la reducción de errores. Lo que se sugiere en estos casos con topografía accidentada es el uso de GCPs es la mejor opción.

En primera instancia se comparó el escenario que contempla la ausencia de GCP con la de uno solo en el centro del área. En el cual, no se detectaron disparidades significativas entre ambos. En el estudio realizado, por Bertin et al. (2022a) quienes revelan que agregar un solo GCP en el centro del área contribuye a reducir el RMSE en la dirección Z, mientras que Cho y Lee (2023) señalan que, independientemente de su ubicación, un GCP puede eliminar

de manera efectiva el sesgo vertical durante el procesamiento. Ambos estudios coinciden en que la inclusión de un GCP disminuye el RMSE. Sin embargo, estos hallazgos difieren con los resultados de la investigación previa presentada de Stott et al. (2020b) concluyeron que, un solo GCP no mejora las estadísticas resumidas de errores lo cual concuerda con los resultados de este estudio al no encontrar una diferencia significativa en el RMSE entre el escenario sin GCP y 1 GCP. Esta discrepancia posiblemente se deba a la complejidad topográfica del área de estudio.

La Figura 4 muestra los errores absolutos en la dirección Z, caracterizada por notables variaciones en la elevación evidenciando, que los mayores errores se concentran en áreas con mayor rugosidad topográfica, lo que sugiere que esta última afecta la calidad del bloque fotogramétrico. Esto está de acuerdo con los hallazgos de otros autores Stott et al. (2020a) y Czyża et al. (2023) en el cual, se informa que inevitablemente en áreas donde hay una pendiente relativamente pronunciada existe posibilidad de errores en elevación esto debido al posicionamiento incorrecto del dron durante la adquisición de datos espaciales. En Kim et al. (2023) se estudió, el posicionamiento RTK-GNSS de un UAV en una mina de cobre a tajo abierto, en el que se encontró que el posicionamiento RTK-GNSS es preciso en términos tanto del error relativo de ubicación de la cámara como del error de mapeo de imágenes basado en GCP, con un error total promedio de 1.6 cm el cual es atribuible principalmente a factores externos, incluidas las condiciones climáticas. La influencia de estos factores puede minimizarse, pero no eliminarse por completo en los estudios de campo. Con los resultados de los autores mencionados líneas superiores podemos descartar que los errores del bloque fotogramétrico no provienen en la mayoría del posicionamiento del UAV. En la fotogrametría digital, los conjuntos de datos topográficos geomorfológicos derivados de SfM pueden tener errores complejos distribuidos espacialmente debido a la interpretación del software el cual

puede ser disminuido por los GCP que proporcionan información externa adicional sobre la geometría de la escena reconstruida, durante el proceso de optimización el software mejora la precisión de la posición de la cámara y reduce las deformaciones no lineales del proyecto al incorporar los GCP (Stott et al., 2020b). Además de ello, parte del error del bloque fotogramétrico pudo ser debido al uso de las características naturales como GCPs y CP consideradas en este proyecto. El estudio de Yang et al. (2022) se observó que, al utilizar puntos de características naturales como puntos de control, se produjo un alto error en la dirección Z de los puntos de control. Esta inestabilidad está determinada por la calidad del punto natural ya que, su posición real no es fácil de identificar en las imágenes aéreas y frecuentemente se encuentra con cierta desviación. La ubicación de los puntos característicos en la imagen depende del juicio subjetivo de los profesionales, lo que puede generar un gran margen de error debido a factores humanos. Por esta razón, no se recomienda el uso de características naturales para la fotogrametría aérea cuando se requiere alta precisión.

En el estudio de Czyża et al. (2023) se destaca la importancia de emplear GCPs al utilizar sistemas de DG, especialmente en áreas con características complejas como variaciones en la cobertura vegetal, relieve topográfico pronunciado y cambios de textura. Por otro lado, la investigación de Liu et al. (2022) sugiere la utilización de 2 a 3 GCPs para alcanzar un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia en el trabajo. Cuando se comparó el bloque fotogramétrico con la de 2 GCPs se obtuvieron resultados similares a la de 1 GCP. El cual no difiere, con el caso de 0 GCP en consecuencia, podemos afirmar que en topográficas complejas con variación de alturas no se logra una precisión considerable, por lo cual diferimos de los estudios de (Liu et al., 2022). En este estudio los mejores resultados se obtuvieron a partir de 3 GCPs. Este hallazgo sugiere que, la utilización de al menos tres GCPs resultaría en una mejora eficiente en la calibración del bloque fotogramétrico, este se

beneficia aún más con la inclusión de un mayor número de GCPs distribuidos de manera uniforme. El análisis de los resultados obtenidos presentado en la tabla 3 permite concluir que la cantidad óptima de GCP es de 4 a 5 los cuales presentaron los mejores resultados. Pero es necesario considerar que un número excesivo de GCPs es innecesario ya que no mejoran las estadísticas resumidas de errores debido a que el error tiende a aumentar, lo cual también se explica en (Zhang et al., 2022b).

La forma de la configuración de GCPs fue un factor principal que afectó la precisión de la calibración del bloque fotogramétrico por los GCPs. Se consideró el aporte de estudios anteriores para colocar los GCPs en los bordes el cual fue óptimo, pero en cuanto a los experimentos donde se colocó un GCP en el centro no contempló las mejoras que se explican en Bertin et al. (2022b) que también, es apoyado por Park y Yeom (2022). En consecuencia, podemos afirmar que, en este estudio en especial no aportó mejoras al igual que en el estudio de (Cho y Lee, 2023). La figura 6 (a) y (b) se observa el ajuste lineal para determinar si el error horizontal y vertical de los CP disminuye cuando la distancia desde el GCP más cercano aumenta. En el estudio realizado por Zhang et al. (2022b) se informó que, el error horizontal tendía a incrementar a medida que aumentaba la distancia entre el GCP y CP. En nuestro estudio con la inclusión de 1 GCP en el centro se disminuye esta distancia, por lo que se tendría una relación menor entre el error horizontal de los puntos de control y la distancia al GCP más cercano. En la figura 6 (a) y (b) no se ve esta relación el cual es similar a los resultados de (Liu et al., 2022).

La metodología usada en la fotogrametría con UAV requiere alta precisión que aún es limitada en el campo de la ingeniería. Esto se debe al procedimiento de encuesta incierto causado por las diferencias entre los distintos sitios de estudio. Se recomienda que en estudios posteriores se pueda considerar un mayor número de CP que es fundamental para el análisis

del RMSE y la verificación espacial del área donde surgen la mayor cantidad de errores. Además, se sugiere realizar vuelos programados según superficie. Esto se debe a que es difícil tener en cuenta vuelos a altitudes inferiores a 100 metros en áreas con topografía compleja. Según Pourreza et al. (2022b), la altitud de vuelo es un factor importante en la precisión de los datos recopilados por el sistema UAV-RTK.

Capítulo V. Conclusiones

Este estudio investigó el impacto del uso de GCPs en la calidad de medición de un bloque fotogramétrico en topografía con alta rugosidad, levantado con un UAV con capacidad de posicionamiento RTK.

Se evaluó el uso de un UAV en modo RTK sin la inclusión de GCP, se obtuvo un RMSE horizontal y vertical de 0.0704 y 0.1900, respectivamente. Los resultados indican que un UAV RTK-GNSS no es adecuado sin ningún GCP para producir resultados a escala de error decímetro en un bloque fotogramétrico.

Los resultados de los ocho escenarios de prueba sugieren, que la adición de 3 a 5 GCPs uniformemente tiene un efecto significativo en el ajuste del bloque fotogramétrico, en contraste con los escenarios con 1 y 2 GCPs, que no presentan una diferencia significativa en comparación con 0 GCPs.

El conocimiento previo sobre la cantidad necesaria y la ubicación óptima de los GCPs es crucial para minimizar errores. Se recomienda aumentar el número de CP en estudios futuros para mejorar el análisis del RMSE. Además, programar vuelos según la superficie del terreno. Se anticipa que los resultados y recomendaciones presentados, beneficiarán a los investigadores y a las partes interesadas que emplean la fotogrametría con UAV.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que esta investigación no realizó experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad. En el artículo no se revelan datos personales o de identificación de los participantes, y se obtuvo consentimiento informado por parte de los participantes.

Conflicto de intereses. Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Financiamiento. Ninguno.

Referencias

- Benassi, Francesco, Elisa Dall’Asta, Fabrizio Diotri, Gianfranco Forlani, Umberto Morra di Cella, Riccardo Roncella, and Marina Santise. 2017. “Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with Gns-Supported Aerial Triangulation.” *Remote Sensing* 9(2):1–23. doi: 10.3390/rs9020172.
- Bertin, Stephane, Benjamin Levy, Trevor Gee, and Patrice Delmas. 2020. “Geomorphic Change Detection Using Cost-Effective Structure-from-Motion Photogrammetry: Evaluation of Direct Georeferencing from Consumer-Grade Uas at Orewa Beach (New Zealand).” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 86(5):289–98. doi: 10.14358/PERS.86.5.289.
- Bertin, Stéphane, Pierre Stéphan, and Jérôme Ammann. 2022. “Assessment of RTK Quadcopter and Structure-from-Motion Photogrammetry for Fine-Scale Monitoring of Coastal Topographic Complexity.” *Remote Sensing* 14(7). doi: 10.3390/rs14071679.
- Cho, Jung Min, and Byoung Kil Lee. 2023. “GCP and PPK Utilization Plan to Deal with RTK Signal Interruption in RTK-UAV Photogrammetry.” *Drones* 7(4). doi: 10.3390/drones7040265.
- Czyża, Szymon, Karol Szuniewicz, Kamil Kowalczyk, Andrzej Dumalski, Michał Ogrodniczak, and Łukasz Zieleniewicz. 2023. “Assessment of Accuracy in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Pose Estimation with the REAL-Time Kinematic (RTK) Method on the Example of DJI Matrice 300 RTK.” *Sensors* 23(4). doi: 10.3390/s23042092.
- Elkhrachy, Ismail. 2021. “Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry.” *Alexandria Engineering Journal* 60(6):5579–90. doi: 10.1016/j.aej.2021.04.011.
- Kim, Hanjin, Chang Uk Hyun, Hyeong Dong Park, and Jongmun Cha. 2023. “Image Mapping

- Accuracy Evaluation Using UAV with Standalone, Differential (RTK), and PPP GNSS Positioning Techniques in an Abandoned Mine Site.” *Sensors* 23(13). doi: 10.3390/s23135858.
- Liu, Xiaoyu, Xugang Lian, Wenfu Yang, Fan Wang, Yu Han, and Yafei Zhang. 2022. “Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points.” *Drones* 6(2). doi: 10.3390/drones6020030.
- Oniga, Valeria Ersilia, Ana Ioana Breaban, Norbert Pfeifer, and Constantin Chirila. 2020. “Determining the Suitable Number of Ground Control Points for UAS Images Georeferencing by Varying Number and Spatial Distribution.” *Remote Sensing* 12(5). doi: 10.3390/rs12050876.
- Padró, Joan Cristian, Vicenç Carabassa, Jaume Balagué, Lluís Brotons, Josep M. Alcañiz, and Xavier Pons. 2019. “Monitoring Opencast Mine Restorations Using Unmanned Aerial System (UAS) Imagery.” *Science of the Total Environment* 657:1602–14. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.156.
- Park, Jae Woo, and Dong Jun Yeom. 2022. “Method for Establishing Ground Control Points to Realize UAV-Based Precision Digital Maps of Earthwork Sites.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 21(1):110–19. doi: 10.1080/13467581.2020.1869023.
- Pourreza, Morteza, Fardin Moradi, Mohammad Khosravi, Azade Deljouei, and Melanie K. Vanderhoof. 2022. “GCPs-Free Photogrammetry for Estimating Tree Height and Crown Diameter in Arizona Cypress Plantation Using UAV-Mounted GNSS RTK.” *Forests* 13(11). doi: 10.3390/f13111905.
- Stott, Eilidh, Richard D. Williams, and Trevor B. Hoey. 2020. “Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Mapping Using an Rtk-Gnss

- Unmanned Aerial Vehicle and Sfm Photogrammetry.” *Drones* 4(3):1–21. doi: 10.3390/drones4030055.
- Štroner, Martin, Rudolf Urban, Jan Seidl, Tomáš Reindl, and Josef Brouček. 2021. “Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without GCPs.” *Remote Sensing* 13(7). doi: 10.3390/rs13071336.
- Taddia, Yuri, Francesco Stecchi, and Alberto Pellegrinelli. 2020. “Coastal Mapping Using Dji Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode.” *Drones* 4(2):1–19. doi: 10.3390/drones4020009.
- Villanueva, J. K. S., and A. C. Blanco. 2019. “Optimization of Ground Control Point (GCP) Configuration for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Survey Using Structure from Motion (SFM).” Pp. 167–74 in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Vol. 42. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Yang, Jia, Xiaopeng Li, Lei Luo, Lewen Zhao, Juan Wei, and Teng Ma. 2022. “New Supplementary Photography Methods after the Anomalous of Ground Control Points in UAV Structure-from-Motion Photogrammetry.” *Drones* 6(5). doi: 10.3390/drones6050105.
- Zhang, Ke, Hiromu Okazawa, Kiichiro Hayashi, Tamano Hayashi, Lameck Fiwa, and Sarvesh Maskey. 2022. “Optimization of Ground Control Point Distribution for Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry for Inaccessible Fields.” *Sustainability (Switzerland)* 14(15). doi: 10.3390/su14159505.

ANEXOS

Anexo A Evidencia de sumisión.

[RDLC] Acuse de recibo de la presentación

Claudia Burbano-García <cpcburbano@ucd>
Para: @ Kevin DeRue Via 02/06/2024 04:49

Traducido de inglés Mostrar mensaje original Activar la traducción automática

Kevin de Flué Pilco Lopez:

Gracias por enviar el manuscrito "EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE GCPs EN LA CALIDAD DE MEDICIÓN DE UN BLOQUE FOTO-GRAMÉTRICO CAPTURADO CON UN UAV RTK EN AMBIENTES GEOGRÁFICOS CON ALTA RUGOSIDAD TOPOGRÁFICA" a la Revista de la Construcción, Revista de Construcción. Con el sistema de gestión de revistas en línea que estamos utilizando, podrá seguir su progreso a través del proceso editorial iniciando sesión en el sitio web de la revista:

URL de envío: <https://revistadelaconstruccion.uc.cl/index.php/RDLC/authorDashboard/submission/83554>

Journal of Construction

Journal of Construction is an international scientific publication, created in 2002 and edited by the Escuela de Construcción Civil of Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

revistadelaconstruccion.uc.cl

Nombre de usuario: kevin_pilco

Si bene alguna pregunta, póngase en contacto conmigo. Gracias por considerar esta revista como un lugar para su trabajo.

Claudia Burbano-García

{journalName}
|, /, /http://revistadelaconstruccion.uc.cl

¿Es útil esta traducción? Sí No

Anexo B Copia de resolución



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

RESOLUCIÓN N° 0291-2023/UPeU-FIA-CF-I

Lima, Naña 27 de junio de 2023

VISTO:

El expediente de **Kevin De Flué Pilco Lopez**, identificado(a) con Código Universitario N° 201811969, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Kevin De Flué Pilco Lopez**, ha solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Evaluación de la influencia de la cantidad de GCP en la calidad de medición de un bloque fotogramétrico levantado con un UAV modo RTK en entornos geográficos con rugosidad topográfica alta" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

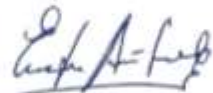
Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 27 de junio de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Evaluación de la influencia de la cantidad de GCP en la calidad de medición de un bloque fotogramétrico levantado con un UAV modo RTK en entornos geográficos con rugosidad topográfica alta" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar como asesor a **Mg. Moises Araca Chile** para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mg. Arnaldo Cahui Galarza** y **Mg. Ingrid Angela Villafuerte Lujano**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Dr. Santiago Ramírez López
SECRETARIO ACADÉMICO

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

Anexo C Monumentación de Punto Geodésico de Orden C

