

EVALUATION OF THE ACCURACY OF A DIGITAL TERRAIN MODEL (TDM) IN PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENTS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV) AND CONVENTIONAL SURVEYING EQUIPMENT

EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO (MDT) EN LEVANTAMIENTOS FOTOGAMÉTRICOS CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) Y LEVANTAMIENTOS CON EQUIPOS CONVENCIONALES

PEÑA, C.¹; ARÉVALO, A.²

¹*Ph. D. C. Carlos Alberto Peña Soto, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander, e-mail: carlosalbertops@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-5016-9555>*

²*Ph. D. C. Alba Nely Arevalo Verjel, Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander, e-mail: albanelyav@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0009-0008-1916-0246>.*

Universidad Francisco de Paula Santander

Avenida Gran Colombia 12B-96 Colsag. Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.

Tel: 6075776655,

E-mail: carlosalbertops@ufps.edu.co

Recibido: 13/07/2023 / Aceptado: 25/11/2023

Resumen

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) son muy utilizados en el campo de la ingeniería, constituyendo la base para derivar cartografía que se puede utilizar en diversos estudios hidrológicos, como por ejemplo en estudios de inundación, así como para generar curvas de nivel y calcular movimiento de tierras entre otros. Con los Vehículos Aéreos No-Tripulados (UAV) se pueden generar estos productos con una mejor resolución espacial y temporal que con otros sensores, como sería el caso de los satélites. La calidad de los MDT generados con UAV depende de la programación de vuelo, la precisión en la medición de los Puntos de Apoyo (PA) y Puntos de control (PC), así como del postproceso de los datos y filtrado de puntos. Esta investigación analiza la precisión de los MDT's utilizando el software fotogramétrico Agisoft Metashape (software privado) y el visor fotogramétrico Cloud compare (libre), los PC se dejaron en los bordes del área de estudio, con la finalidad de georreferenciar el modelo y evaluar la calidad del producto generado. Los puntos de control fueron medidos con GPS Topcon Hiper doble frecuencia en modo RTK con una precisión de 1.5 cm. Comparado los resultados con topografía convencional,

utilizando estación total, se obtuvieron productos fotogramétricos con precisión en XYZ de 2 cm. Estos resultados indican una muy buena precisión, haciendo posible su aplicación en diversos estudios y con menor trabajo en campo con respecto a métodos tradicionales.

Palabras clave: Fotogrametría, UAV, MDT, Cloud Compare, Topografía.

Abstract

Digital Terrain Models (DTM) are widely used in engineering, constituting the basis for deriving cartography that can be used in various hydrological studies, such as flood studies, and for generating contour lines and calculating earthworks, among others. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) can provide these products with better spatial and temporal resolution than other sensors, such as satellites. The quality of the DTMs developed with UAVs depends on the flight programming, the precision in measuring the Check Points (ChPs) and Ground Control Points (GCP) measurement, and the post-processing of the data and point filtering. This research analyzes the accuracy of the DTM's using the Agisoft Metashape photogrammetric software (private software), and the Cloud compare photogrammetric viewer (free); the GPCs were left on the edges of the study area to georeferenced the model and evaluate the quality of the generated product. The control points were measured with a dual-frequency Topcon Hyper GPS in RTK mode with an accuracy of 1.5 cm. Comparing the results with conventional topography, photogrammetric products with XYZ precision of 2 cm were obtained using a total station. These results indicate excellent precision, allowing its application in various studies and with less fieldwork than traditional methods.

Keywords: Photogrammetry, UAV, DTM, Cloud Compare, Surveying.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el gran avance en la tecnología ha permitido experimentar otras alternativas para realizar levantamientos topográficos, como es el caso de los UAV que permite la reconstrucción de la superficie 3D y generar MDT con alta precisión y gran detalle en comparación con técnicas satelitales (Acevo Herrera, 2011).

Los UAV cada día son más utilizados para realizar levantamientos fotogramétricos debido a que cuentan con cámaras no métricas y vienen equipados con receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), todo esto junto con los software basado en SFM (Structure For Motion), que permite orientar las fotografías mediante identificación de

puntos comunes (Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018), es lo que los hace competitivos en relación con los métodos topográficos convencionales (Pérez *et al.*, 2022), porque permite llegar a lugares de difícil acceso, cubrir grandes áreas en un menor tiempo, la información capturada es más densa en comparación con la topografía clásica (Hernández López, 2006) y es más económico ya que minimiza el trabajo en campo (Colomina & Molina, 2014).

Por las anteriores ventajas es por lo que los UAV son utilizados en todos los campos de la ingeniería como, por ejemplo: obras de ingeniería civil (Nettis *et al.*, 2020), trazado de carreteras (Pérez *et al.*, 2022), cuantificación de cambios topográficos (Chang *et al.*, 2020), estudios de deslizamientos (Li *et al.*, 2022), generación de MDT (Arévalo-Verjel *et al.*, 2021; Chen

et al., 2016; Crespo-Peremarch *et al.*, 2020; Jiménez-Jiménez *et al.*, 2021; Serifoglu Yilmaz & Gungor, 2018).

Los MDT es uno de los insumos más importantes para generar cartografía y topografía; Describe la superficie de terreno en un conjunto de datos de dimensión 2.5, es decir, extrapolan la coordenada z a partir de las coordenadas planimétricas XY, $Z=f(X, Y)$ (Lerma, 2002), es por esto el desafío de obtener un MDT preciso con una densidad de puntos mayor a la topografía convencional, pero realizando un buen procedimiento de filtrado para eliminar todos los puntos que no pertenecen al terreno como vegetación, construcciones, vehículos, ruido entre otros (González *et al.*, 2022).

En este trabajo se va a comparar un MDT obtenido mediante topografía clásica con estación total, georreferenciada a los puntos materializados por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), y fotogrametría basada en el uso de UAV con la adición de GCP para la georreferenciación del modelo a las coordenadas de terreno (Agüera-Vega *et al.*, 2017); con GCP en los bordes del bloque como en (Robledo *et al.*, 2022; Arévalo-Verjel *et al.*, 2022), porque ajustan mejor el modelo fotogramétrico.

Así mismo se evalúa la precisión de las dos técnicas empleadas con el visor fotogramétrico Cloud Compare para comparar la malla triangular del terreno generada con topografía convencional y la nube de puntos de terreno resultado del vuelo fotogramétrico.

2. METODOLOGIA

La investigación fue realizada en el Asentamiento Primero de Julio, vereda Camilo Torres corregimiento Buena Esperanza, municipio de Cúcuta Norte de Santander, cubriendo un área de 13 ha, como se aprecia en la Figura 1.

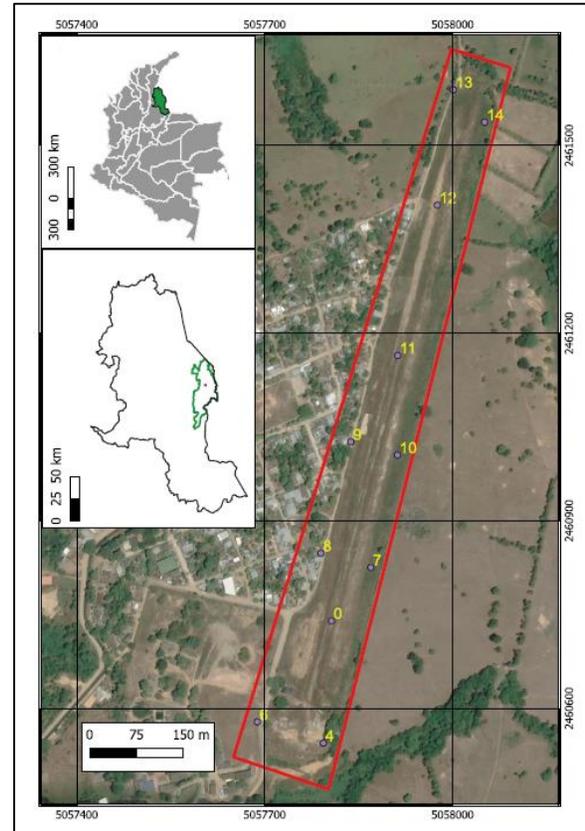


Figura 1. Localización área de estudio; Asentamiento Primero de Julio, vereda Camilo Torres corregimiento Buena Esperanza, municipio de Cúcuta Norte de Santander.

2.1. Levantamiento fotogramétrico

Para realizar el levantamiento fotogramétrico con UAV se utilizó un Phantom 3 Pro Figura 2 (a), con una cámara DJI FC300X, distancia focal de 4 mm y resolución de imagen de 3000*4000 pixeles.

La programación de vuelo se realizó en la aplicación Pix4D capture, se obtuvieron un total de 236 fotografías; el vuelo se realizó

a 90 metros de altura, con traslape longitudinal de 80 y transversal de 70, La figura 2 (b) muestra cómo se ven los puntos a esa altura. Se presentaron buenas condiciones meteorológicas el día del vuelo, se hizo el levantamiento fotogramétrico en las primeras horas de la mañana con una velocidad de viento menor a 10 m/s.



a)



b)

Figura 2. Equipo utilizado: a) Phantom 3 Profesional; b) vista de los GCP y ChP a 90 m de altura.

2.1.1 GNSS vuelo fotogramétrico

Para la georreferenciación del vuelo fotogramétrico se midieron 9 GCP y 2 ChP; los GCP se utilizaron con el fin de darle coordenadas precisas al modelo, y los ChP para evaluar la calidad de los productos

obtenidos, estos puntos fueron medidos con receptores GNSS (GPS + GLONASS) de doble frecuencia en modo RTK (Real Time Kinematic) donde las correcciones se realizan en tiempo real. Los GCP quedaron distribuidos en los bordes del bloque siguiendo las recomendaciones de (Arévalo-Verjel *et al.*, 2022) y las ChP (puntos 0 y 12) en la parte central Figura 1 debido a que no había gran variación de pendiente.

2.2. Procesamiento vuelo fotogramétrico

Para el procesamiento de datos se utilizó el software Agisoft Metashape y el visor de nubes de puntos de Cloud compare. Los datos se procesaron en un equipo lenovo procesador Intel (R) core (TM) i5 -4210U CPU 1.70 GHz 2.40 GHz, RAM 6 GB, Windows 10 de 64 bits, tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE 820. Los parámetros utilizados en el software Agisoft metashape son los siguientes: Precisión de medición. Precisión de fotocentro se dejó en 10 m, precisión en los GCP 0.01 m, precisión de distancia de escala 1 mm. Precisión de coordenadas de cámara: Precisión de marcadores 0.5 pixeles, precisión de los puntos de paso se dejó en 1 píxel.

2.3 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizó con una estación total marca Topcon GPT 3200; Para realizar la georreferenciación al sistema de coordenadas del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) se materializaron dos mojones en concreto Figura 3, con receptores GNSS, el tiempo de rastreo de cada punto fue 4 horas en modo estático, siguiendo la metodología del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020).



Figure 2. Mojoneros en concreto para ajuste de la topografía.

Los GCP (Puntos de apoyo) y ChP (Puntos de control) para la correcta georreferenciación del vuelo fotogramétrico, se marcaron con pintura reflectante antes del vuelo Figura 2 (b), para un total de nueve puntos de apoyo que se ubicaron unos en los bordes del bloque siguiendo la recomendación de (Arévalo-Verjel *et al.*, 2022; Fragozo y Sanes, 2022) y otros en la parte central.

2.4 Precisión de los resultados vuelo fotogramétrico

Para calcular la precisión de los resultados se calcula el RMSE, que es la raíz cuadrada del promedio del conjunto de diferencias cuadradas entre los valores de coordenadas del conjunto de datos y valores de coordenadas de una fuente independiente de mayor precisión para puntos idénticos.

El error medio cuadrático es aquel cuyo cuadrado es igual a la media aritmética de los cuadrados de los errores verdaderos, definiéndose por la siguiente ecuación 1 (GGDC, 1998):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{cartografía} - \text{control})^2}{n}}$$

Dónde: Cartografía = los datos obtenidos del modelo.

Control = los datos de referencia tomados en capo.

n = número de puntos de verificación.

Para nuestro caso la fuente independiente de mayor precisión son los datos de los GCP y ChP obtenidos en campo con GNSS, y los valores de coordenadas de la cartografía son tomados mediante los DEM (Modelo digital de elevación).

2.5 precisión de los resultados levantamiento topográfico

Se trabajó por el método de poligonal cerrada, para calcular la precisión de la poligonal se siguió la metodología (IGAC, 2018), la precisión relativa se calcula mediante la ecuación 2.

$$\text{Precisión relativa} = \frac{L}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$$

Donde:

Δx = Error en este.

Δy = Error en norte.

L= Longitud de la poligonal.

En la Tabla 1 muestra la precisión de las poligonales cerradas.

Tabla 1. Precisión de poligonales cerradas (IGAC)

ÁREA	PRECISIÓN
Menor a 1.000 m ²	1:20.000
1.000 m ² y menor a 1 Ha	1:15.000
1 Ha y menor a 10 Ha	1:10.000
Mayor o igual a 10 Ha	1:5.000

2.6 Generación del MDT

El MDT se generó con la nube de puntos densa procesada en el software Agisoft Metashape, después de haber georreferenciado el modelo a las coordenadas de terreno utilizando los GCP. La nube de puntos densa presenta 80.239.366 millones de puntos, se realizó una clasificación de puntos en el software (Ver Figura 4) para separar de la nube los puntos que no corresponden al terreno, y

posteriormente se generaron las primeras curvas de nivel. Luego se lleva esta nube de puntos al visor fotogramétrico Cloud Compare, donde se adelgaza la nube de puntos y paso a tener 1.227.011 millones de puntos, seguidamente se eliminó el ruido (partículas en suspensión) de la nube de puntos y valores atípicos, se ajustó las alturas para eliminar aquellas alturas fuera de la distribución normal. Se realizó el filtrado de puntos de terreno y no terreno con la herramienta CSF filter creada por Wuming Zhang (Zhang *et al.*, 2016; Ortiz *et al.*, 2022), con el fin de depurar el modelo.

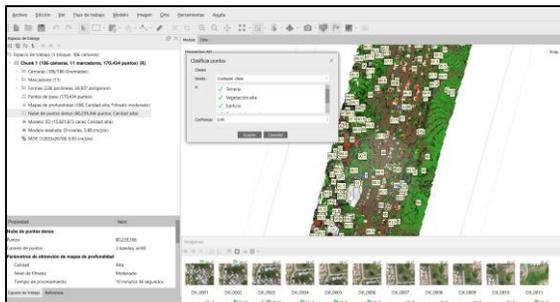


Figure 3. Clasificación nube de puntos software Agisoft Metashape.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Resultado puntos de Apoyo GNSS vuelo fotogramétrico

En la Tabla 2 se presentan las coordenadas y el error en horizontal (HRMS) y vertical (VRMS) de los GCP y ChP medidos en campo.

Tabla 2. Coordenadas de los GCP y ChP en origen nacional EPSG 9377, y error en la vertical y horizontal.

Punto	Este	Norte	Elevación	HRMS	VRMS
0 ChP	5057806.76	2460739.98	90.79	0.012	0.02
4 GCP	5057793.76	2460544.52	93.11	0.017	0.02
6 GCP	5057688.46	2460578.43	92.17	0.019	0.029
7 GCP	5057869.62	2460825.36	90.52	0.024	0.053

8 GCP	5057789.9	2460848.05	90.52	0.012	0.017
9 GCP	5057837.64	2461026.18	88.56	0.016	0.028
10 GCP	5057912.16	2461005.19	89.65	0.013	0.031
11 GCP	5057912.47	2461164.34	87.32	0.01	0.022
12 ChP	5057975.70	2461404.66	84.63	0.009	0.018
13 GCP	5058001.41	2461589.19	83.09	0.01	0.021
14 GCP	5058051.29	2461537.33	83.64	0.011	0.02

3.2. Resultados vuelo fotogramétrico

El GSD (Ground Sampling Distance) que indica el tamaño del pixel en el terreno fue de 3.48 cm/pix, el error medio de proyección 0.642 pixeles; Los GCP y ChP como mínimo se marcaron en 9 y máximo en 16 fotografías. Los valores de la media del RMSE para los GCP y ChP se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente.

Tabla 3. Media de RMSE de los GCP

Punto	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	RMSE total (cm)
4	-0.97	0.72	-0.99	1.56
6	0.72	-1.01	1.55	1.98
7	0.42	0.11	0.65	0.79
8	0.28	-0.49	-1.49	1.59
9	-0.37	0.84	0.29	0.96
10	-0.83	0.35	-0.27	0.94
11	0.74	-0.78	-0.05	1.07
13	0.88	-0.52	-1.09	1.50
14	-0.87	0.69	1.38	1.77
Total	0.72	0.66	1.02	1.41

Tabla 4. Media de RMSE de los ChP.

Punto	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	RMSE total (cm)
0	-0.15	0.46	1.39	1.47
12	0.59	0.19	0.23	0.66
Total	0.43	0.35	1.00	1.14

3.3. Resultados levantamiento topográfico

Para el cálculo de la precisión en la poligonal se aplica la ecuación 2 para

levantamiento por poligonal cerrada en función de la longitud, la Tabla 5 muestra los resultados del error del levantamiento topográfico en los tres componentes.

Tabla 5. Resultado de los errores en X, Y, Z del levantamiento topográfico

Longitud de la poligonal (m)	Error este (m)	Error norte (m)	Error altitud (m)
449.704	0.007	0.001	0.003

Después de aplicar la ecuación se obtienen los siguientes resultados:

Precisión de la poligonal = 63597.74.

Proporción 1metro por cada 63597 metros.

3.4. Resultados Generación de MDT

El MDT se generó en el visor fotogramétrico Cloud Compare para nubes de puntos eliminando el ruido y normalizando las alturas, en la Figura 5 (a) se observa la nube de punto completa y la Figura 5 (b) muestra la nube de punto solo con los puntos pertenecientes al terreno después de aplicar la herramienta CSF filter (Cloth Simulation Filter) de Cloud Compare.

La herramienta CSF filter separa nubes de puntos en retorno de suelo y no suelo un paso importante para generar el MDT, este procedimiento se realizó tres veces con el fin de hacer un mejor filtrado (Ver figura 6).



a)



b)

Figura 5. CSF filter Cloud Compare: a) nube de puntos completa; b) nube de puntos terreno.

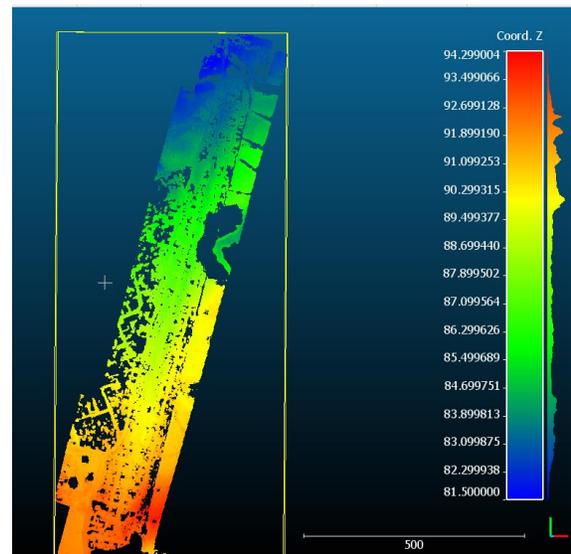


Figura 6. Filtrado de puntos de la nube generada por Agisoft Metashape utilizando CSF Filter de Cloud Compare.

3.5 Comparación de resultados

Después de generar la malla resultado de la triangulación del levantamiento topográfico con estación total en civil 3D, se exporto a Cloud Compare para poder comparar los dos modelos con la herramienta compute cloud mesh distance, que busca el punto más cercano en la nube de referencia y calcula la distancia euclídea; se toma como referencia la malla resultado del levantamiento topográfico y se compara con la nube de punto de terreno generada con el UAV, utilizando la herramienta tools-statistics compute-stats-params se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 7.

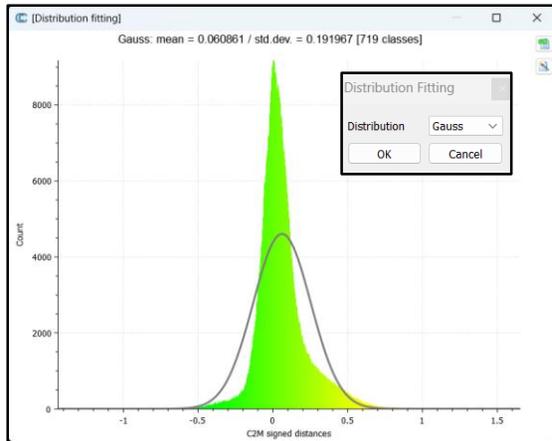


Figura 7. Comparación de los dos modelos utilizando la campana de Gauss.

La Tabla 6 muestra los resultados de las precisiones que se obtuvieron con las dos técnicas empleadas.

Tabla 6. Resumen de los errores residuales obtenidos en los dos tipos de levantamientos.

Estación total		
Este	Norte	Altitud
0.007	0.001	0.003
UAV		
Este	Norte	Altitud
0.007	0.006	0.01

Se generaron curvas de nivel cada 1 m, esto con el fin de visualizar mejor las dos técnicas empleadas en la Figura 8 (a) se observa las curvas resultadas del levantamiento topográfico convencional, la Figura 8 (b) muestra el resultado de las curvas de nivel resultado del levantamiento fotogramétrico utilizando GCP.

La figura 9, muestra los resultados de las curvas de nivel de los dos métodos, el color rojo son las curvas resultado del levantamiento topográfico, y el color verde son las curvas resultado del levantamiento fotogramétrico.

Realizar una comparación entre un levantamiento convencional y un

levantamiento con UAV permite determinar cada una de las precisiones, ya que en la mayoría de los casos no se tiene confianza de los resultados obtenidos con UAV. Es por esto que la adecuada planificación de vuelo, así como los algoritmos utilizados para generar ortomosaicos, MDE, MDT, curvas de nivel, juegan un papel importante para obtener resultados confiables y con la precisión adecuada dependiendo del tipo de trabajo que va a utilizar estos insumos.

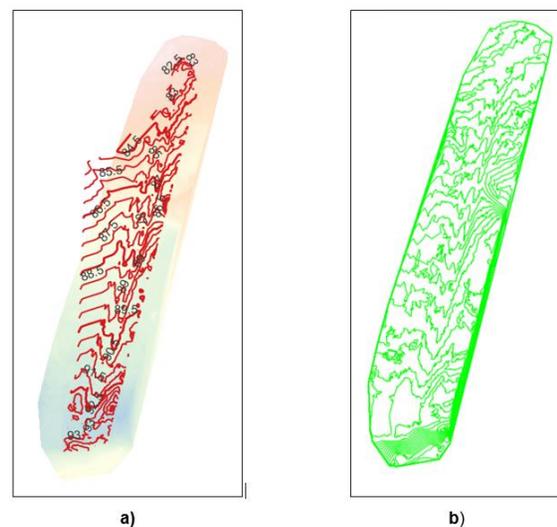


Figura 8. Curvas de nivel cada 1m: a) Curvas levantamiento topográfico; b) Curvas vuelo fotogramétrico.



Figura 9. Comparación de resultados de los dos levantamientos empleados.

Uno de los puntos claves para obtener buenos resultados en un levantamiento

fotogramétrico es la adecuada ubicación y medición de los GCP y ChP, porque de esto depende los resultados obtenidos, que para este estudio se ubicaron en los bordes del bloque como en (Arévalo-Verjel *et al.*, 2022), con una precisión promedio en la medición de 1.5 cm en la componente vertical y horizontal.

Se obtuvieron resultados en el RMSE de los ChP de 1.14 cm con una ratio de 1.44 GCP/Ha ratios similares encontrados en (Agüera-Vega *et al.*, 2017; Reshetyuk & Mårtensson, 2016; Zimmerman *et al.*, 2020), pero con una mejor precisión, ya que dio por debajo del GSD (FGDC, 1998). La precisión del levantamiento topográfico se calculó por el método de poligonal cerrada con una longitud de 449.7 m, el error en levantamiento fue de 7 mm en este, 1mm norte, y 3 mm en la altura demostrando que es la mejor técnica de medición para proyectos con gran nivel de detalle; El cálculo de la precisión relativa de la poligonal ecuación 2 fue de 63.597,74 y según (IGAC, 2018) para una área de 13 Ha la precisión debe estar en 1:5000 que quiere decir 1 m de error por cada 5000 m, entendiendo que para esta investigación estamos muy por encima del valor mínimo permitido (Carrillo *et al.*, 2022).

Para comparar los dos modelos estudiados se utilizó la herramienta cloud mesh distance, dejando de referencia la malla triangular generada en la topografía convencional y comparándola con los resultados del MDT del UAV, la diferencia entre los dos modelos fue de 6 cm siguiendo una distribución normal en la campana de Gauss.

Por lo anterior se puede decir que fue una diferencia baja entre los dos modelos, si se

compara con el tiempo de trabajo en campo, que con topografía convencional fue de dos semanas y la campaña con UAV fue de 2 horas incluida la georreferenciación de los GCP y ChP.

Los resultados se pudieron comprobar realizando las curvas de nivel de los dos modelos y sobreponiéndolos como en la Figura 11, así mismo se obtuvieron perfiles de terreno con resultados muy similares.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se analiza la precisión que se puede obtener por dos métodos de levantamiento topográfico. El primero levantamiento convencional con estación total y el segundo con fotogrametría de corto alcance UAV.

Este estudio confirma que el levantamiento topográfico con estación total es el que presenta mayor precisión. Asimismo, con la diferencia promedio de aproximadamente 6 cm en altura al comparar los dos modelos digitales de terreno generado por los dos métodos, permite afirmar que es posible utilizar el levantamiento fotogramétrico con UAV como alternativa fiable en levantamientos topográficos, donde la tolerancia y precisión estén por encima de este valor, con un menor trabajo en campo y mayor densidad de datos.

La calidad de los resultados del MDT obtenido con levantamiento fotogramétrico dependen de la precisión de los puntos de apoyo, así como de los algoritmos utilizados en los distintos softwares que realizan el filtrado de puntos.

Los UAV permiten obtener productos confiables, de una manera rápida y

eficiente para realizar topografía a gran escala y en lugares de difícil acceso, pero se complementa con la topografía clásica para realizar chequeos y tomar puntos en lugares donde la vegetación es muy densa. En análisis futuros se estudiará una comparación entre fotogrametría con UAV con cámara normal RGB y UAV con cámara equipado con cámara LiDAR (Light Detection And Ranging) para generar modelos digitales de terreno.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevo Herrera, R. (2011). Sistemas de teledetección activos y pasivos embarcados en sistemas aéreos no tripulados para la monitorización de la tierra. (Tesis Doctoral)Universitat Polit`ecnica de Catalunya (UPC).
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 98, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>
- Arévalo-Verjel, A. N., Lerma, J. L., & Fernández, J. (2021). Análisis comparativo de software para obtener MDT con fotogrametría RPAS. *3rd Congress in Geomatics Engineering*, 3, 7. <https://doi.org/10.4995/CiGeo2021.2021.12764>
- Arévalo-Verjel, A. N., Lerma, J. L., Prieto, J. F., Carbonell-Rivera, J. P., & Fernández, J. (2022). Estimation of the Block Adjustment Error in UAV Photogrammetric Flights in Flat Areas. *Remote Sensing 2022*, Vol. 14, Page 2877, 14(12), 2877. <https://doi.org/10.3390/RS14122877>
- Carrillo, O. S., Castellanos, C. y Céspedes, N. (2022). Alternativas bilógicas para el manejo de enfermedades fúngicas radicales y producción más limpia de la fresa. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 13(1). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2721/3794>
- Chang, K. J., Tseng, C. W., Tseng, C. M., Liao, T. C., & Yang, C. J. (2020). Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired Topography for Quantifying Typhoon-Driven Landslide Volume and Its Potential Topographic Impact on Rivers in Mountainous Catchments. *Applied Sciences 2020*, Vol. 10, Page 6102, 10(17), 6102. <https://doi.org/10.3390/APP10176102>
- Chen, Q., Wang, H., Zhang, H., Sun, M., Liu, X., Gloaguen, R., & Thenkabail, P. S. (2016). A Point Cloud Filtering Approach to Generating DTMs for Steep Mountainous Areas and Adjacent Residential Areas. <https://doi.org/10.3390/rs8010071>
- 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>
- Crespo-Peremarch, P., Torralba, J., Carbonell-Rivera, J. P., & Ruiz, L. A. (2020). COMPARING THE GENERATION OF DTM IN A FOREST ECOSYSTEM USING TLS, ALS AND UAV-DAP, AND DIFFERENT SOFTWARE TOOLS. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-575-2020>
- Fragozo Brito, A. F. y Sanes Orrego, A. (2022). El ciclo de vida de los residuos sólidos domiciliarios como perspectiva de cultura ciudadana sostenible para el distrito de Riohacha, La Guajira. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 13(1).

- <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2715/3787>
- FGDC. (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy Subcommittee for Base Cartographic Data Federal Geographic Data Committee*.
- González, D. J., González, O. J., Manco, J. D., Rojas, M. E. y Lascarro, N.F. (2022). Determinación del uso industrial de las calizas de la formación lagunitas, aflorantes al este del municipio de Agustín Codazzi, Cesar-Colombia. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 13(1). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2722/3795>
- Hernández López, D. (2006). Introducción Fotogrametría Digital | PDF | Sensores remotos | Fotografía aérea. In *ETSI Agrónomos: Universidad de Castilla la Mancha*.
- IGAC. (2018). *resolucion_igac_643-18_adopta_especificaciones_tecnicas_levantamientos_planimetricos_y_topograficos.pdf*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, I. (2020). *Resolución 471* (p. 32).
- Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, M. D. J., & Enciso, J. (2021). Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2021, Vol. 10, Page 285, 10(5), 285. <https://doi.org/10.3390/IJGI10050285>
- Lerma, J. L. G. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital* (Universitat Politècnica de València, Ed.; Primera ed, p. 560).
- Li, Z., Xu, X., Ren, J., Li, K., & Kang, W. (2022). Vertical Slip Distribution along Immature Active Thrust and Its Implications for Fault Evolution: A Case Study from Linze Thrust, Hexi Corridor. *Diqiu Kexue - Zhongguo Dizhi Daxue Xuebao/Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 47(3), 831–843. <https://doi.org/10.3799/DQKX.2021.238>
- Nettis, A., Saponaro, M., & Nanna, M. (2020). RPAS-Based Framework for Simplified Seismic Risk Assessment of Italian RC-Bridges. *Buildings* 2020, Vol. 10, Page 150, 10(9), 150. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS1090150>
- Ortiz, D. M., Castro, S.A., Niño, C.V., Guevara, D. y Medina, B. (2022). Identificación de residuos sólidos en zonas urbanas con procesamiento de imágenes e inteligencia artificial. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 13(1). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2719/3803>
- Pérez, J. A., Gonçalves, G. R., & Galván, J. M. (2022). Comparative analysis of the land survey using UAS and classical topography in road layout projects. *Informes de La Construcción*, 74(565). <https://doi.org/10.3989/IC.86273>
- Robledo, Y., Jaimes, E. O. y Araque, A. C. (2022). Herramientas gerenciales orientadas al empoderamiento socioeconómico de la mujer rural, en la provincia de Pamplona, Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 13(2). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2725/3798>
- Reshetyuk, Y., & Mårtensson, S. G. (2016). Generation of Highly Accurate Digital Elevation Models with Unmanned Aerial Vehicles. *The Photogrammetric Record*, 31(154), 143–165. <https://doi.org/10.1111/PHOR.12143>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing* 2018, Vol. 10, Page 1606, 10(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/RS10101606>

Serifoglu Yilmaz, C., & Gungor, O. (2018). Comparison of the performances of ground filtering algorithms and DTM generation from a UAV-based point cloud. *Geocarto International*, 33(5), 522–537.

<https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1265599>

Zimmerman, T., Jansen, K., & Miller, J. (2020). Analysis of UAS Flight Altitude

and Ground Control Point Parameters on DEM Accuracy along a Complex, Developed Coastline. *Remote Sensing 2020*, Vol. 12, Page 2305, 12(14), 2305.
<https://doi.org/10.3390/RS12142305>