

Reliability assessment of three topographic methods for generating digital elevation models (DEMs)

Evaluación de la confiabilidad de tres métodos topográficos para generar modelos digitales de elevación (MDE)

Rodrigo Roblero-Hidalgo¹; Jorge Flores-Velázquez^{2*}; Jesús Chávez-Morales²; Aurelio Reyes-Ramírez³

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac núm. 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, MÉXICO.

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

³Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

*Corresponding author: jorgelv@colpos.mx, tel. 5959520200, ext. 1176.

Abstract

Introduction: A digital elevation model (DEM) allows for the analysis of specific features on the earth's surface in three dimensions. The engineering DEM is useful to evaluate resources and design management strategies.

Objective: To evaluate the technical-operational feasibility of generating DEMs from total station (TS) topographic surveys, GPS RTK and aerial photogrammetry using an unmanned aerial vehicle (UAV).

Methodology: A 20x20 m grid was traced in a plot without vegetation (1.4 ha) located in Montecillo, Estado de México, and topographic surveys were carried out with three methods, from which DEMs were generated for graphic and statistical evaluation and by tracing contour lines.

Results: The estimated statistical errors were 0.15, 0.15 and 0.02 m, for TS vs. UAV, GPS RTK vs. UAV and TS vs. GPS RTK, respectively.

Study limitations: The instruments used and the geographical conditions of central Mexico may be a reason for variation when extrapolating the results with other devices.

Originality: A methodology is provided to generate DEMs accurately. The results allow the user to make reasoned choices based on the equipment available.

Conclusion: The DEMs generated with TS and GPS RTK data have a smaller error than the one obtained from UAVs. The use of UAV helps in the representation of the terrain, since it generates a dense cloud of points that strengthens the procedure for topographic surveys.

Keywords: accuracy, topographic method, drone, orthomosaic.

Resumen

Introducción: Un modelo digital de elevación (MDE) permite analizar rasgos específicos sobre la superficie terrestre en tres dimensiones. El MDE en ingeniería es útil para evaluar recursos y diseñar estrategias de manejo.

Objetivo: Evaluar la viabilidad técnica-operativa de generar MDE a partir de levantamientos topográficos con estación total (ET), GPS RTK y fotogrametría aérea usando un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

Metodología: Se trazó una cuadrícula de 20 x 20 m en una parcela sin vegetación (1.4 ha) ubicada en Montecillo, Edo. de México, y se realizaron levantamientos topográficos con tres métodos, a partir de los cuales se generaron los MDE para su evaluación gráfica, estadística y mediante el trazo de curvas de nivel.

Resultados: Los errores estadísticos estimados fueron de 0.15, 0.15 y 0.02 m, para ET vs. VANT, GPS RTK vs. VANT y ET vs. GPS RTK, respectivamente.

Limitaciones del estudio: El instrumental usado y las condiciones geográficas del centro de México pueden ser motivo de variación al momento de extrapolar los resultados con otros dispositivos.

Originalidad: Se proporciona una metodología para generar MDE con precisión. Los resultados permiten al usuario tomar decisiones razonadas en función del equipo con el que dispone.

Conclusión: Los MDE generados con datos de ET y GPS RTK tienen un error menor que el obtenido a partir de VANT. El uso del VANT ayuda en la representación del terreno, ya que genera una densa nube de puntos que fortalece el procedimiento para levantamientos topográficos.

Palabras clave: precisión, método topográfico, dron, ortomosaico.



Introduction

A digital elevation model (DEM) is the graphical representation of databases containing a numerical format of terrain elevations. A DEM shows, in a simplified and numerical way, the geometry of a part of the terrain surface (Mena-Frau, Molina-Pino, Ormazábal-Rojas, & Morales-Hernández, 2011), which can be represented by a set of values indicating points on the surface, and its geographical location is defined by X (longitude), Y (latitude) and Z (altitude) coordinates. It has been agreed that these points are regularly spaced and distributed according to a pattern that, in general, is located in a geographical projection such as the Universal Transverse Mercator (UTM) (Zhoua & Chenb, 2011).

The techniques to carry out topographic surveys with less error are the total station (TS) and GPS RTK; the development of unmanned aerial vehicles (UAV) have enriched the traditional techniques to improve them; this because they generate greater detail of the surface from images or videos taken during the flight. The evolution of computer systems, technological advances in UAV systems and strategies for processing large volumes of data promote research and application (Escalante-Torrado, Cáceres-Jiménez, & Porras-Díaz, 2016). The increasingly recurrent use of UAVs has diversified their application (Colomina & Molina, 2014); however, the basic products generated are images and videos (Ojeda-Bustamante et al., 2016). In this study, their application is focused on the processing needed to obtain orthomosaics and DEMs from photographic images obtained with an airborne camera.

The applications of DEMs obtained from UAVs are diverse, some of which are the generation of terrain models with topographic use (Liu, Liu, Zou, Wang, & Liu, 2012) and surface models in coastal areas (Long et al., 2016), used in agriculture (Mesas-Carrascosa et al., 2015), in forest engineering (Leduc & Knudby, 2018) and archaeology (Toschi et al., 2015), landslide studies (Permata et al., 2016), and monitoring of mine extraction (Wang et al., 2014), of disaster areas (Bendea et al., 2008), and infrastructure damage (Vázquez-Paulino & Backhoff-Pohls, 2017). The objective of this study was to evaluate the technical and operational feasibility of generating DEMs from images obtained with a camera transported in a UAV, and from topographic surveys with TS, as a direct measurement method, and with a geographic positioning system (GPS RTK). Survey errors were compared and evaluated using statistical indicators to clarify advantages and disadvantages.

Introducción

Un modelo digital de elevaciones (MDE) es la representación gráfica de bases de datos que contienen un formato numérico de las elevaciones de los terrenos. Un MDE muestra, en una forma simplificada y numérica, la geometría de una parte de la superficie del terreno (Mena-Frau, Molina-Pino, Ormazábal-Rojas, & Morales-Hernández, 2011), la cual puede ser representada por un conjunto de valores que indican puntos sobre la superficie, y su ubicación geográfica está definida por coordenadas X (longitud), Y (latitud) y Z (altitud). Se ha convenido que dichos puntos estén espaciados y distribuidos de modo regular de acuerdo con un patrón que, en general, se ubica en una proyección geográfica como la universal transversal de Mercator (UTM) (Zhoua & Chenb, 2011).

Las técnicas para realizar levantamientos topográficos con menor error son la estación total (ET) y el GPS RTK, y el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) han enriquecido las técnicas tradicionales para mejorarlas; esto debido a que generan mayor detalle de la superficie a partir de las imágenes o videos tomados durante el vuelo. La evolución de los sistemas computacionales, los adelantos tecnológicos de los sistemas VANT y las estrategias de procesamiento de grandes volúmenes de datos impulsan la investigación y su aplicación (Escalante-Torrado, Cáceres-Jiménez, & Porras-Díaz, 2016). El uso cada vez más recurrente de los VANT ha diversificado su aplicación (Colomina & Molina, 2014); sin embargo, los productos básicos que se generan son imágenes y videos (Ojeda-Bustamante et al., 2016). En este estudio, su aplicación se enfoca en el procesamiento necesario para obtener ortomosaicos y MDE a partir de las imágenes fotográficas obtenidas con una cámara aerotransportada.

Las aplicaciones de los MDE obtenidos a partir de VANT son diversas, algunas de las cuales son la generación de modelos de terreno con uso topográfico (Liu, Liu, Zou, Wang, & Liu, 2012) y modelos de superficie en zonas costeras (Long et al., 2016), usos en la agricultura (Mesas-Carrascosa et al., 2015), en la ingeniería forestal (Leduc & Knudby, 2018) y en la arqueología (Toschi et al., 2015), estudios para el deslizamiento de tierras (Permata et al., 2016), y monitoreo de extracción de minas (Wang et al., 2014), de zonas de desastre (Bendea et al., 2008) y de afectación a la infraestructura (Vázquez-Paulino & Backhoff-Pohls, 2017). El objetivo de este trabajo fue evaluar la viabilidad técnica-operativa de generar MDE a partir de imágenes obtenidas con una cámara transportada en un VANT, y de levantamientos topográficos con ET, como método directo de medición, y con un sistema de posicionamiento geográfico (GPS

Materials and methods

Description of the study area

MDEs were carried out on a plot located at the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, with an area of 1.4 ha (Figure 1 and 2). The equipment used for the topographic surveys were: TS (CST Berger CST305R), GPS RTK (Sokkia GRX1) and camera for the UAV (Phantom 4 pro) (Table 1).

A grid with 20 m separation in both directions (X, Y) was drawn on the ground. At each junction, a plummet tool was placed at ground level and it was marked with a target (36 control points), so that they could be visible at 28.7 m flight height and have a ground pixel resolution of $2.74 \text{ cm}\cdot\text{pix}^{-1}$, with a flight time of 5 min, an overlap of 80%, a focal length of 3.61 mm and an electronic shutter (Figure 2).

As a reference point (level bank) to start the ground survey, control points were set with the GPS RTK, the following UTM coordinates of zone 14N were selected: $XG_{\text{base}} = 510685.680 \text{ m}$, $YG_{\text{base}} = 2152639.377 \text{ m}$ and $ZG_{\text{base}} = 2239.327 \text{ masl}$. Subsequently, with the GPS RTK, the 36 checkpoints marked on the ground were raised. The reference point obtained with GPS RTK was used for the survey with TS. This method is considered the reference method for comparing the

RTK). Se compararon los errores de los levantamientos topográficos y se evaluaron usando indicadores estadísticos para dilucidar ventajas y desventajas.

Materiales y métodos

Descripción de la zona de estudio

Los MDE se realizaron de una parcela ubicada en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, con una superficie de 1.4 ha (Figura 1 y 2). Los equipos que se utilizaron para los levantamientos topográficos fueron: ET (CST Berger CST305R), GPS RTK (Sokkia GRX1) y cámara para el VANT (Phantom 4 pro) (Cuadro 1).

En el terreno se trazó una cuadrícula con separación de 20 m en ambas direcciones (X, Y). En cada cruce se colocó un trompo topográfico al nivel del terreno, el cual se marcó con una diana (36 puntos de control) para que pudiera ser visible a 28.7 m de altura de vuelo y tener una resolución de pixel del suelo de $2.74 \text{ cm}\cdot\text{pix}^{-1}$, con tiempo de vuelo de 5 min, un traslape de 80 %, una distancia focal de 3.61 mm y un obturador electrónico (Figura 2).

Como punto de referencia (banco de nivel) para iniciar el levantamiento en tierra se fijaron puntos de control con el GPS RTK, para ello se seleccionaron las siguientes



Figure 1. Location of the plot studied (Colegio de Postgraduados, Mexico).

Figura 1. Ubicación de la parcela estudiada (Colegio de Postgraduados, México).

Table 1. Specifications of the topographic equipment.**Cuadro 1. Especificaciones del equipo topográfico.**

Total station/ Estación total	GPS RTK	Unmanned aerial vehicle camera/ Cámara del vehículo aéreo no tripulado
Brand: CST Berger CST305R Optical image 30 X magnification 45 mm lens opening 152 mm telescope length 1° 30' field of vision 1.3 m minimum approach: 5" accuracy 1"5" direct angular reading Angle measurement: photoelectric detection Measuring range: 1 prism at 3000 m Measuring range without prism: 200 m Prism accuracy \pm (2+2ppm x D) mm Accuracy without prism \pm (2+2ppm x D) mm Measuring time: fine 1.8 s / tracking 0.7 s Measuring time: fine: 3 X optical Screen: LCD alphanumeric 28 keys Battery: 6 h (distance and angles), 45 h (for angles) Internal memory: 1 GB SD card Double shaft-liquid compensator Operating temperature: -20 to + 45 °C/ Marca: CST Berger CST305R Imagen: real directa Aumentos: 30 X Abertura del objetivo: 45 mm Longitud del telescopio: 152 mm Campo visual: 1° 30' Enfoque mínimo: 1.3 m Precisión: 5" Lectura angular directa: 1"5" Medición de ángulo: detección fotoeléctrica Alcance medición: 1 prisma a 3000 m Alcance medición sin prisma: 200 m Precisión con prisma \pm (2+2 ppm x D) mm Precisión sin prisma \pm (2+2 ppm x D) mm Tiempo de medición: fine 1.8 s / tracking 0.7 s Plomada: óptica 3 X Pantalla: LCD alfanumérica 28 teclas Batería: 6 h (distancia y ángulos), 45 h (para ángulos) Memoria interna: SD card de 1 Gb Compensador doble eje – líquido Temperatura de trabajo: -20 a + 45 °C	Brand: Sokkia GRX1 Dimensions: 184 x 95 mm (diameter x height) External controller with collector Operating temperature: -20 to +65 °C (with UHF module) Storage temperature: -45 to + 70 °C Humidity: 100 % condensation Battery: model BDC58, Li ions, 4.300 mAh, 7.2 v CC Recharge time: 4 h Duration: up to 7.5 h (20 °C, static) Communication ports: 2 x Bluetooth channels 1 x RS-232C Output frequency: 10, 20, 50 and 100 Hz Correction format: CMR2/ CMR+, RTCM SC104. Length of baselines: up to 50 km in the mornings and afternoons. Up to 32 km at midday. Initialization time: 5 s to 10 min depending on baseline length and conditions for multipath Elevation mask: fro 0° to 90° regardless of data acquisition RTK accuracy: L1+L2 (>30 km), 10 mm + 1 ppm x D / 20 mm + 1 ppm x D/ Marca: Sokkia GRX1 Dimensiones: 184 x 95 mm (diámetro x altura) Controlador: externo con colectora Temperaturas de trabajo: -20 a +65 °C (con módulo UHF) Temperaturas de almacenaje: -45 a + 70 °C Humedad: 100 % condensación Batería: modelo BDC58, iones de Li, 4.300 mAh, 7.2 v CC Tiempo de recarga: 4 h Duración: hasta 7.5 h (20 °C, en estático) Puertos de comunicación: 2 x canales de Bluetooth 1 x RS-232C Frecuencia de salida: 10, 20, 50 y 100 Hz Formato de correcciones: CMR2/ CMR+, RTCM SC104. Longitud de líneas base: hasta 50 km por las mañanas y por las tardes. Hasta 32 km a mediodía. Tiempo de inicialización: de 5 s a 10 min dependiendo de la longitud de la línea base y las condiciones para la multitrayectoria Máscara de elevación: de 0° a 90° independientemente de la toma de datos Precisión en RTK: L1+L2 (>30 km), 10 mm + 1 ppm x D / 20 mm + 1 ppm x D	Brand: Phantom 4 pro 1" CMOS sensor Effective pixels: 20 M Lens: FOV (field of view) 84°, 8.8 mm (format equivalent of 35:24 mm), f/2.8 - f/11, autofocus >1 m ISO range: video(100 – 3200, auto), photo (100 – 3200 auto) Mechanical shutter: 8 - 1/2000 s Electronic shutter: 8 - 1/8000 s Image size: aspect ratio 3:2:5472x3648; aspect ratio 4:3:4864x3648; aspect ratio 16:9:5472x3078 Photography modes: single shot Burst shooting: 3/5/7/10/14 frames Automatic Exposure Boom (AEB): 3/5 frame in exposure bracket at 0.7EV Bias. Interval: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s Maximum video bit rate.: 100 Mbps Supported file systems: FAT32 (\leq 32 GB), exFAT (> 32 GB) Photo: JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG Video: MP4/MOV (AVC/H.264, HEVC/H.265) Supported SD cards MicroSD cards Maximum capacity: 128 GB Writing speed: \geq 15 MB/s, class 10 or UHS-1 classification is required Operating temperature range: of 0 to 40 °C (32 to 104 °F)/ Marca: Phantom 4 pro Sensor: CMOS de 1" Píxeles efectivos: 20 M Objetivo: FOV (campo de visión) 84°, 8.8 mm (equivalente a formato de 35:24 mm), f/2.8 - f/11, enfoque automático >1 m Intervalo de ISO: video (100 – 3200, auto), foto (100 – 3200 auto) Obturador mecánico: 8 - 1/2000 s Obturador electrónico: 8 - 1/8000 s Tamaño de imagen: relación de aspecto 3:2:5472x3648; relación de aspecto 4:3:4864x3648; relación de aspecto 16:9:5472x3078 Modos de fotografía: un disparo Disparo en ráfagas: 3/5/7/10/14 fotogramas Horquilla de exposición automática (AEB): 3/5 fotogramas en horquilla de exposición a 0.7 EV Bias. Intervalo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s Tasa de bits de video máx.: 100 Mbps Sistemas de archivo admitidos: FAT32 (\leq 32 GB), exFAT (> 32 GB) Fotografía: JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG Video: MP4/MOV (AVC/H.264, HEVC/H.265) Tarjetas: SD admitidas MicroSD Capacidad máxima: 128 GB Velocidad de escritura: \geq 15 MB/s, se necesita clasificación clase 10 o UHS-1 Intervalo de temperatura de funcionamiento: de 0 a 40 °C (32 a 104 °F)

errors obtained with GPS RTK and photogrammetry. For the photogrammetric survey, a digital camera was used, transported in a UAV (Table 1). The procedure for the flight was suggested by Ojeda-Bustamante et al. (2016), which consists of a flight plan of the trajectory that the UAV will follow to take the photographs at a certain height, in this case 28.7 m. This plan is established in Pix4Dcapture and the images obtained will be treated to obtain the mosaic from which the DEM is generated.

Each method has a processing step in which the information of the UTM coordinates for each point of the grid ($i = 1, 2, 3, \dots, 36$) is obtained (Table 2). With the GPS RTK, the coordinates of the points marked in the field were obtained, as well as the table of attributes of each point, which was exported to *.shp format. The generation of the DEM was possible from the *.shp file, from which a triangular facet network or triangle irregular network (TIN) was elaborated and converted to raster mode; from this, the DEM ($n = 3083342$ cells) was generated containing the values of the UTM coordinates (longitude $[XG_i]$, latitude $[YG_i]$ and altitude $[ZG_i]$).

From the two support points placed with the RTK GPS the survey was carried out with the TS. To do this, the points $XE_{base} = 510675.793$ m, $YE_{base} = 2152609.461$ m and $ZE_{base} = 2239.346$ masl were set, and as a support point to orientate the TS and to start taking the points that were placed in the field were $XE_{reference} = 510699.029$ m, $YE_{reference} = 2152686.294$ m and $ZE_{reference} = 2239.355$ masl; all in UTM coordinates zone 14N. The information was processed as with the generation of the raster DEM with GPS RTK. Also in this case the information of the UTM coordinates (longitude $[XE_i]$, latitude $[YE_i]$ and altitude $[ZE_i]$) was standardized for each point of the grid ($i = 1, 2, 3, \dots, 36$) (Table 2).

The processing of the images acquired with UAV was done with the Agisoft PhotoScan program (Agisoft, 2019). The total of photographic images generated in *.jpg format was 77, which were imported and aligned; with this the point cloud, the triangular facet mesh and the orthomosaic were created, for which ground control points were necessary (1, 6, 16, 21, 22, 31 and 36). As a product of the processing, the DEM was obtained in raster format (*.grid), which contains the information of the UTM coordinates (longitude $[XV_i]$, latitude $[YV_i]$ and altitude $[ZV_i]$) (Table 2).

Results and discussion

From the points obtained (Table 2 and Figure 2) the three topographic methods used were compared; for this purpose the three variables (X, Y, Z) representing a point in the terrain surface were considered.

coordenadas UTM de la zona 14N: $XG_{base} = 510685.680$ m, $YG_{base} = 2152639.377$ m y $ZG_{base} = 2239.327$ msnm. Posteriormente, con el GPS RTK se levantaron los 36 puntos de control marcados sobre el terreno. El punto de referencia obtenido con el GPS RTK se utilizó para el levantamiento con la ET. Este método se considera el de referencia para comparar los errores obtenidos con GPS RTK y fotogrametría. Para el levantamiento con el método fotogramétrico se usó una cámara digital transportada en un VANT (Cuadro 1). El procedimiento para la ejecución del vuelo fue el sugerido por Ojeda-Bustamante et al. (2016), el cual consiste en generar un plan de vuelo de la trayectoria que seguirá el VANT para la toma de las fotografías a cierta altura, en este caso 28.7 m. Dicho plan se establece en Pix4Dcapture y con su ejecución se obtienen las imágenes que serán tratadas para obtener el mosaico a partir del cual se genera el MDE.

Cada método tiene una fase de procesamiento en la que se obtiene la información de las coordenadas UTM para cada punto de la cuadrícula ($i = 1, 2, 3, \dots, 36$) (Cuadro 2). Con el GPS RTK se obtuvieron las coordenadas de los puntos en planta marcados en el campo, así como la tabla de atributos de cada punto, la cual se exportó a formato *.shp. La generación del MDE fue posible a partir del archivo *.shp, del cual se elaboró una red de facetas triangulares o red irregular de triángulos (TIN, por sus siglas en inglés) y se convirtió a modo raster; a partir de éste se generó el MDE ($n = 3083342$ celdas) que contiene los valores de las coordenadas UTM (longitud $[XG_i]$, latitud $[YG_i]$ y altitud $[ZG_i]$).

A partir de los dos puntos de apoyo que se colocaron con el GPS RTK se realizó el levantamiento con la ET. Para ello, se fijaron los puntos $XE_{base} = 510675.793$ m, $YE_{base} = 2152609.461$ m y $ZE_{base} = 2239.346$ msnm, y como punto de apoyo para orientar la ET y dar inicio a la toma de los puntos que se colocaron en campo fueron $XE_{referencia} = 510699.029$ m, $YE_{referencia} = 2152686.294$ m y $ZE_{referencia} = 2239.355$ msnm; todos en coordenadas UTM zona 14N. La información se procesó igual que con la generación del MDE en raster con el GPS RTK. También en este caso se estandarizó la información de las coordenadas UTM (longitud $[XE_i]$, latitud $[YE_i]$ y altitud $[ZE_i]$) para cada punto de la cuadrícula ($i = 1, 2, 3, \dots, 36$) (Cuadro 2).

El procesamiento de las imágenes adquiridas con el VANT se realizó con el programa Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2019). El total de imágenes fotográficas generadas en formato *.jpg fue de 77, las cuales se importaron y se alinearon; con ello se construyó la nube de puntos, la malla de facetas triangulares y el ortomosaico, para el cual fueron necesarios puntos de control en tierra (1, 6, 16, 21, 22, 31 y 36). Como producto del procesamiento se obtuvo el MDE en

Table 2. Universal Transverse Mercator coordinates (UTM, from zone 14N) obtained with three topographic survey methods. Cuadro 2. Coordenadas universal transversal de Mercator (UTM, de la zona 14N) obtenidas con tres métodos de levantamiento topográfico.

Point/ Punto	Total Station/ Estación total			GPS RTK			Unmanned aerial vehicle/ Vehículo aéreo no tripulado		
	XE_i	YE_i	ZE_i	XG_i	YG_i	ZG_i	XV_i	YV_i	ZV_i
1	510610.475	2152731.599	2238.514	510610.522	2152731.499	2238.525	510610.630	2152731.541	2238.382
2	510624.827	2152727.436	2238.750	510624.896	2152727.354	2238.757	510625.009	2152727.408	2238.639
3	510644.290	2152722.450	2238.873	510644.323	2152722.332	2238.873	510644.379	2152722.427	2238.837
4	510663.664	2152717.380	2238.970	510663.642	2152717.284	2238.943	510663.716	2152717.357	2238.938
5	510682.654	2152711.740	2239.081	510682.694	2152711.646	2239.060	510682.664	2152711.764	2239.008
6	510701.896	2152706.119	2239.183	510701.884	2152706.014	2239.150	510701.860	2152706.104	2238.990
7	510696.142	2152687.027	2239.101	510696.144	2152686.935	2239.097	510696.124	2152687.058	2239.108
8	510677.019	2152692.462	2239.034	510677.037	2152692.364	2239.030	510677.028	2152692.463	2239.126
9	510657.602	2152697.614	2238.996	510657.614	2152697.496	2238.985	510657.641	2152697.558	2239.095
10	510638.307	2152702.941	2238.852	510638.380	2152702.882	2238.853	510638.407	2152702.959	2238.963
11	510619.092	2152708.342	2238.715	510619.186	2152708.259	2238.732	510619.261	2152708.289	2238.767
12	510604.776	2152712.444	2238.642	510604.847	2152712.339	2238.647	510604.933	2152712.372	2238.583
13	510599.001	2152693.325	2238.607	510599.079	2152693.251	2238.605	510599.177	2152693.253	2238.625
14	510613.611	2152689.539	2238.737	510613.689	2152689.479	2238.748	510613.777	2152689.469	2238.847
15	510632.757	2152684.177	2238.851	510632.770	2152684.099	2238.839	510632.814	2152684.108	2239.031
16	510651.952	2152678.753	2238.907	510651.970	2152678.678	2238.893	510652.015	2152678.703	2239.130
17	510671.176	2152673.282	2238.992	510671.194	2152673.200	2238.983	510671.172	2152673.264	2239.177
18	510690.451	2152667.849	2239.107	510690.470	2152667.757	2239.103	510690.410	2152667.792	2239.177
19	510684.846	2152648.640	2239.105	510684.889	2152648.606	2239.091	510684.853	2152648.570	2239.147
20	510665.441	2152654.111	2238.971	510665.480	2152654.058	2238.959	510665.418	2152654.047	2239.161
21	510646.234	2152659.474	2238.898	510646.260	2152659.416	2238.921	510646.243	2152659.386	2239.133
22	510626.901	2152664.990	2238.806	510626.940	2152664.925	2238.809	510626.952	2152664.881	2239.002
23	510607.654	2152670.154	2238.721	510607.679	2152670.078	2238.725	510607.768	2152670.025	2238.829
24	510593.197	2152674.242	2238.603	510593.242	2152674.160	2238.603	510593.310	2152674.106	2238.614
25	510587.249	2152655.132	2238.537	510587.334	2152655.123	2238.544	510587.388	2152655.025	2238.512
26	510602.386	2152650.859	2238.624	510602.454	2152650.826	2238.627	510602.554	2152650.739	2238.706
27	510621.500	2152645.078	2238.752	510621.577	2152645.061	2238.759	510621.620	2152645.037	2238.898
28	510640.709	2152639.405	2238.813	510640.738	2152639.356	2238.794	510640.788	2152639.317	2238.986
29	510660.052	2152634.361	2238.907	510660.081	2152634.327	2238.907	510660.004	2152634.288	2239.040
30	510679.468	2152629.564	2238.996	510679.474	2152629.511	2238.992	510679.398	2152629.481	2239.031
31	510673.829	2152610.339	2239.123	510673.869	2152610.335	2239.113	510673.761	2152610.264	2238.941
32	510658.811	2152614.818	2238.835	510658.823	2152614.817	2238.831	510658.768	2152614.760	2238.868
33	510639.463	2152619.831	2238.705	510639.533	2152619.833	2238.701	510639.487	2152619.761	2238.815
34	510620.146	2152624.857	2238.635	510620.161	2152624.858	2238.631	510620.186	2152624.757	2238.719
35	510600.958	2152630.379	2238.595	510601.016	2152630.326	2238.594	510601.057	2152630.188	2238.584
36	510581.769	2152635.956	2238.554	510581.881	2152635.931	2238.533	510581.924	2152635.806	2238.364

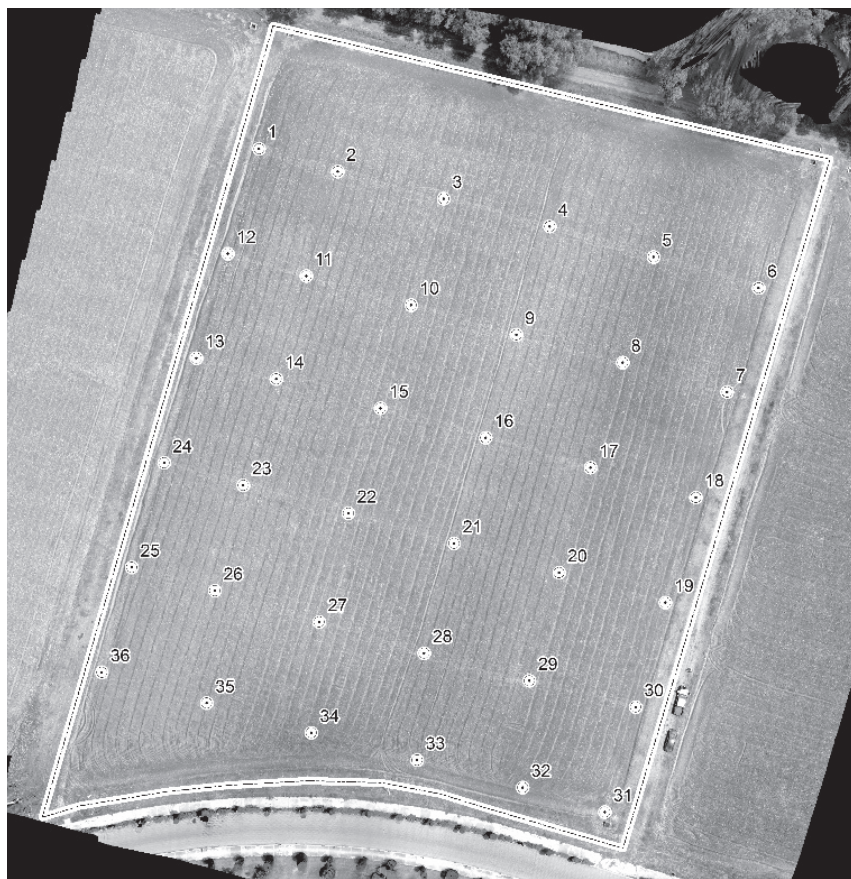


Figure 2. Twenty m grid drawn in the field.

Figura 2. Cuadrícula de 20 m trazada en campo.

X coordinates

When comparing the variable X of the topographic methods, Figure 3 shows that all three methods have an $R^2 = 1$, a P value of 2.2×10^{-16} for a 95 % confidence level and a residual standard error of 0.022 m between GPS and TS, 0.041 m between TS and UAV, and 0.041 m between GPS and UAV. Therefore, it is considered that there is no significant variation in the length measurements in the three methods.

Y coordinates

When comparing the Y variable of the survey methods, it is observed that the three techniques have an $R^2 = 1$, a P value of 2.2×10^{-16} for a 95 % confidence level and a residual standard error of 0.018, 0.041 and 0.043 m, for TS vs. GPS RTK, TS vs. UAV and GPS RTK vs. UAV, respectively (Figure 4). Therefore, it is considered that in Y measurements there is no significant difference between the different methods.

Z coordinates

Z coordinate show there is a difference between the different methods. When comparing TS vs. GPS RTK it is

formato raster (*.grid), que contiene la información de las coordenadas UTM (longitud $[XV_i]$, latitud $[YV_i]$ y altitud $[ZV_i]$) (Cuadro 2).

Resultados y discusión

A partir de los puntos obtenidos (Cuadro 2 y Figura 2) se compararon los tres métodos topográficos utilizados; para ello se consideraron las tres variables (X, Y, Z) que representan a un punto en el terreno.

Coordenadas X

En la Figura 3, al comparar la variable X de los métodos topográficos se observa que los tres métodos presentan un $R^2 = 1$, un valor de P de 2.2×10^{-16} para un nivel de confianza de 95 % y un error residual estándar de 0.022 m entre ET y GPS, de 0.041 m entre ET y VANT, y de 0.041 m entre GPS y VANT. Por lo anterior, se considera que no existe variación significativa en las medidas de longitud en los tres métodos.

Coordenadas Y

Al comparar la variable Y de los métodos topográficos se observa que las tres técnicas tienen una $R^2 = 1$, un

observed that R^2 is 0.996, with a residual error of 0.010 m and a P value of 2.2×10^{-16} for a confidence level of 95 %, which indicates a concordance of 99 %. On the other hand, when comparing UAV vs. TS it is observed that there is a $R^2 = 0.743$, a residual error of 0.098 m and a P value of 1.44×10^{-11} for a 95% confidence level; likewise, it was obtained a $R^2 = 0.756$, a residual error of 0.092 m and a P value of 5.72×10^{-12} for the same confidence level when comparing UAV vs. GPS RTK.

When analyzing the differences between the variables and for each method, we obtain that when comparing the topographic survey with ST vs. UAV an absolute error of $X = 0.061$ m, $Y = 0.065$ m and $Z = 0.047$ masl is expected, and with GPS RTK vs. UAV an error of $X = 0.020$ m, $Y = 0.002$ m and $Z = 0.050$ masl. is expected (Table 3).

Contour line map

Figures 6 and 7 represent the contour lines generated at 0.1m with the DEMs obtained with each surveying method. The contour lines obtained from TS and GPS RTK surveys are coincidental, and different from those obtained with UAV, which coincides with that reported in Figure 5. It would be pertinent to carry out more tests with UAVs, but with more stable flight devices

valor de P de 2.2×10^{-16} para un nivel de confianza de 95 % y un error residual estándar de 0.018, 0.041 y 0.043 m, para ET vs. GPS RTK, ET vs. VANT y GPS RTK vs. VANT, respectivamente (Figura 4). Por lo anterior, se considera que en las medidas Y no existe diferencia significativa entre los diferentes métodos.

Coordenadas Z

En la coordenada Z se observa que existe diferencia entre los diferentes métodos. Al comparar ET vs. GPS RTK se observa que su R^2 es de 0.996, con un error residual de 0.010 m y un valor de P de 2.2×10^{-16} para un nivel de confianza de 95 %, lo que indica una concordancia de 99 %. Por otro lado, al comparar VANT vs. ET se observa que existe un $R^2 = 0.743$, un error residual de 0.098 m y un valor de P de 1.44×10^{-11} para un nivel de confianza de 95 %; asimismo, se obtuvo un $R^2 = 0.756$, un error residual de 0.092 m y un valor de P de 5.72×10^{-12} para el mismo nivel de confianza al comparar VANT vs. GPS RTK.

Al analizar las diferencias entre las variables Y y para cada método, se obtiene que al comparar el levantamiento topográfico con ET vs. VANT se espera un error absoluto de $X = 0.061$ m, $Y = 0.065$ m y $Z = 0.047$ msnm, y con GPS RTK vs. VANT se espera un error de $X = 0.020$ m, $Y = 0.002$ m y $Z = 0.050$ msnm (Cuadro 3).

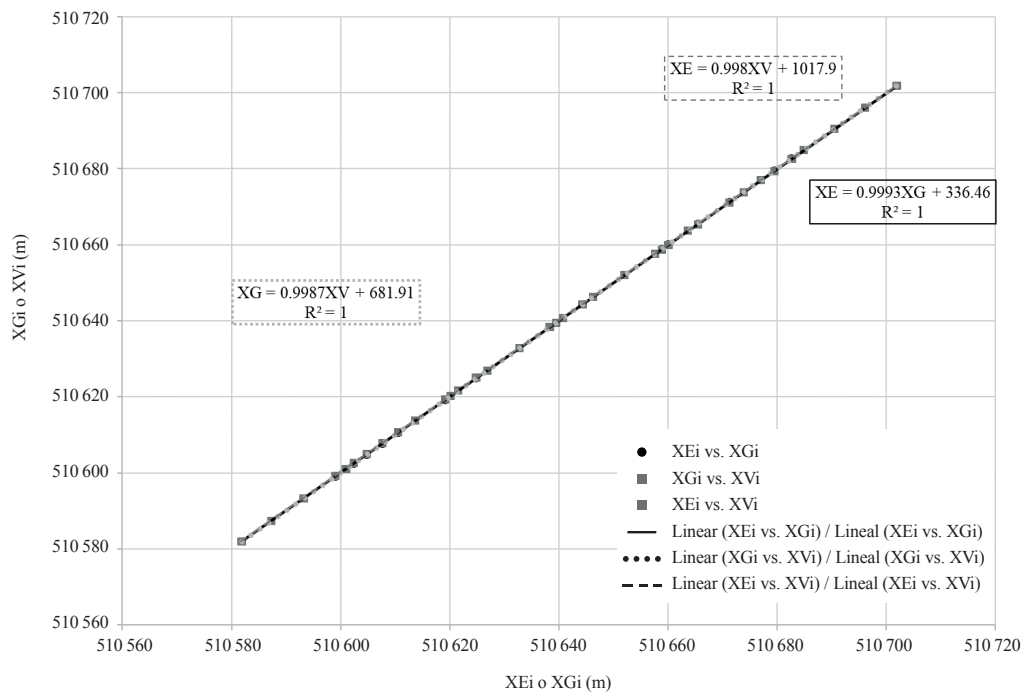


Figure 3. Comparison of Mercator Universal Transverse coordinates (UTM, from zone 14N) longitudinal (X variables) between the three surveying methods: total station (TS; XE_i), GPS RTK (XG_j) and unmanned aerial vehicle (UAV; XV_i).

Figura 3. Comparación de las coordenadas universal transversal de Mercator (UTM, de la zona 14N) longitudinales (variables X) entre los tres métodos topográficos: estación total (ET; XE_i), GPS RTK (XG_j) y vehículo aéreo no tripulado (VANT; XV_i).

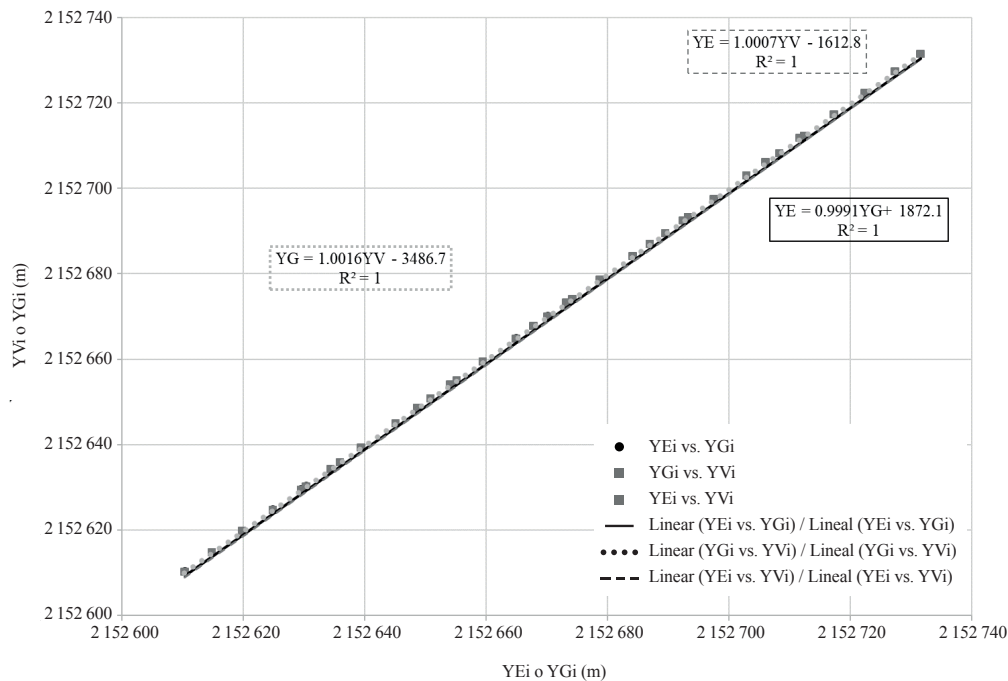


Figure 4. Comparison of Mercator Universal Transverse coordinates (UTM, from zone 14N) latitudinal (Y variables) between the three surveying methods: total station (TS; Y_{Ei}), GPS RTK (Y_{Gi}) and unmanned aerial vehicle (UAV; Y_{Vi}).

Figura 4. Comparación de las coordenadas universal transversal de Mercator (UTM, de la zona 14N) latitudinales (variables Y) entre los tres métodos topográficos: estación total (ET; Y_{Ei}), GPS RTK (Y_{Gi}) y vehículo aéreo no tripulado (VANT; Y_{Vi}).

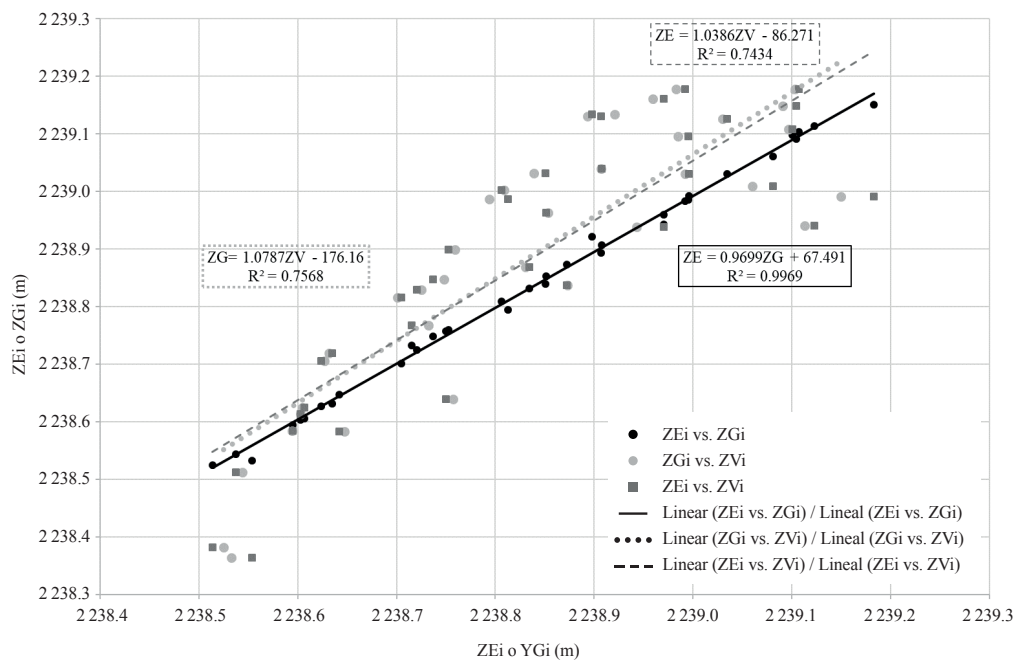


Figure 5. Comparison of Mercator Universal Transverse coordinates (UTM, from zone 14N) altitudinal (Z variables) between the three surveying methods: total station (TS; Z_{Ei}), GPS RTK (Z_{Gi}) and unmanned aerial vehicle (UAV; Z_{Vi}).

Figura 5. Comparación de las coordenadas universal transversal de Mercator (UTM, de la zona 14N) altitudinales (variables Z) entre los tres métodos topográficos: estación total (ET; Z_{Ei}), GPS RTK (Z_{Gi}) y vehículo aéreo no tripulado (VANT; Z_{Vi}).

Table 3. Statistics of reading differences of variables (X, Y, Z) when comparing three survey methods.

Cuadro 3. Estadística de las diferencias de lectura de las variables (X, Y, Z) al comparar tres métodos de levantamiento topográfico.

Variable	TS vs. UAV/ET vs. VANT			TS vs. GPS RTK/ET vs. GPS RTK			GPS RTK vs. UAV/GPS RTK vs. VANT		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Maximum/Máximo	0.070	0.190	0.192	0.022	0.118	0.033	0.108	0.138	0.172
Minimum/Mínimo	-0.182	-0.031	-0.236	-0.112	-0.002	-0.023	-0.113	-0.123	-0.237
Average/Media	-0.061	0.065	-0.047	-0.041	0.063	0.004	-0.020	0.002	-0.050
Standard deviation/Desviación estándar	0.079	0.048	0.117	0.031	0.035	0.012	0.061	0.070	0.114

TS = total station; UAV = unmanned aerial vehicle.

ET = estación total; VANT = vehículo aéreo no tripulado.

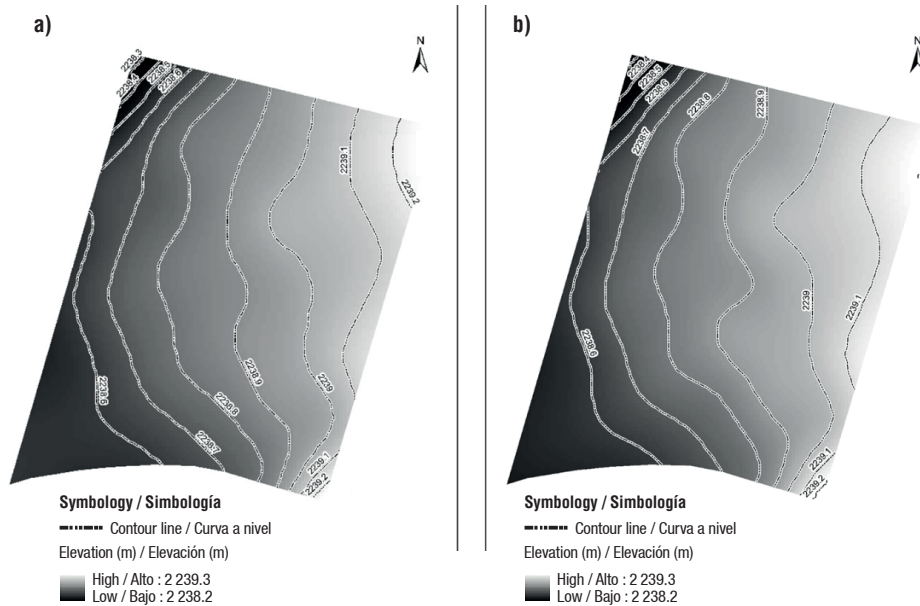


Figure 6. Digital elevation model: a) total station and b) GPS RTK.

Figura 6. Modelo digital de elevación: a) estación total y b) GPS RTK.

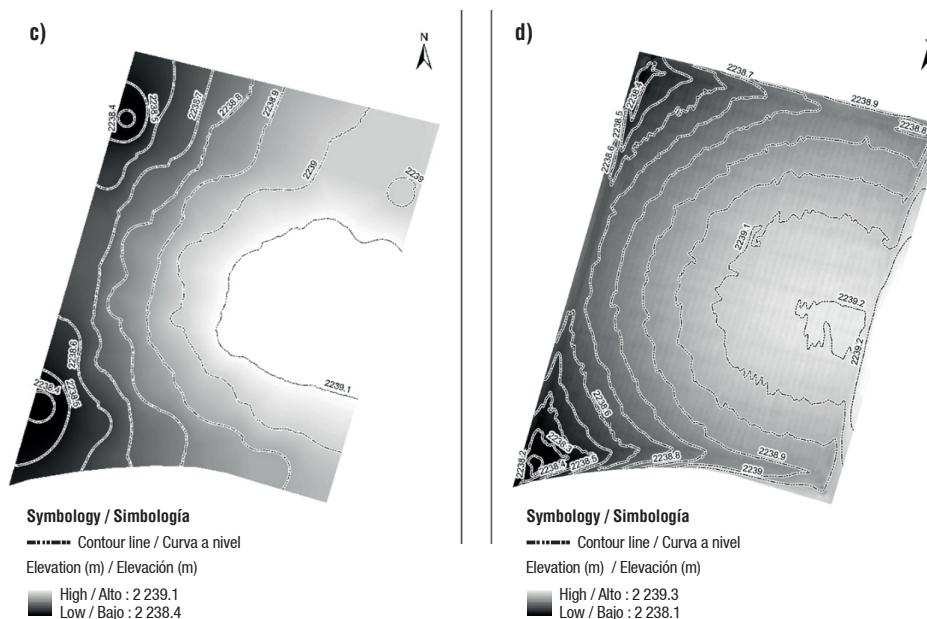


Figure 7. Digital elevation model: c) unmanned aerial vehicle (UAV) and d) continuous scanning using UAV.

Figura 7. Modelo digital de elevación: c) vehículo aéreo no tripulado (VANT) y d) barrido continuo con el VANT.

than those used to achieve a better description of the points on the ground surface, as well as programs with image processing methods that impact on a DEM that better represents reality.

Statistical analysis

DEM were compared based on the square root of the root mean square error (RMSE), as analyzed by Komarek, Kumhalova, and Kroulik (2016), and Polat and Uysal (2017). The above is to quantify the magnitude of the deviation of the values obtained in the DEM using UAV in Z variable (elevation), assuming that X and Y variables are coincident according to the DEMs obtained from TS and RTK GPS.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (z_j - Z_j)^2}{n}} \quad 1)$$

Where z_j is the elevation obtained using UAV (m), Z_j is the elevation obtained with TS or GPS RTK(m), $j = 1, \dots, n$ is the number of each cell (non-dimensional) and n is the number of cells in the raster of the three DEMs.

The estimation of Equation 1 was performed with map algebra of the three DEM rasters (ArcMap [ESRI, 2016]), obtaining the numerator of the function for each cell of the raster estimated. To apply the sum and obtain the number of cells of the raster in the zone spatial analysis tool, the data were exported to a table to sum the values of the squared height differences and obtain the number of cells analyzed (Table 4).

Table 4 shows that RMSE when comparing TS vs. UAV is ± 0.151 m, GPS RTK vs. UAV is ± 0.145 m, and TS vs. GPS RTK is ± 0.019 m.

Gupta and Shukla (2018) report an error of 0.44 between DEM generated with UAV and with TS, which indicates a 65 % difference to the error found in this study. Komarek et al. (2016) obtained an RMSE = 0.29 m when comparing DEM obtained from UAV and GPS RTK, showing a difference of 47 % with respect to the

Curvas de nivel

Las Figuras 6 y 7 representan las curvas de nivel generadas a 0.1 m con los MDE obtenidos con cada método topográfico. Las curvas obtenidas a partir de los levantamientos con ET y GPS RTK son coincidentes, y diferentes a las obtenidas con VANT, lo que coincide con lo reportado en la Figura 5. Sería pertinente realizar más pruebas con VANT, pero con dispositivos de vuelo más estables que el utilizado para lograr una mejor descripción de los puntos en la superficie del terreno, así como programas con métodos de tratamiento de imágenes que impacten en un MDE que represente mejor la realidad.

Análisis estadístico

Los MDE se compararon con base en la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), como los analizados por Komarek, Kumhalova, y Kroulik (2016), y Polat y Uysal (2017). Lo anterior para cuantificar la magnitud de la desviación de los valores obtenidos en el MDE con el VANT en su variable Z (elevación), asumiendo que las variables X y Y son coincidentes de acuerdo con los MDE obtenidos a partir de la ET y el GPS RTK.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (z_j - Z_j)^2}{n}} \quad 1)$$

Donde z_j es la elevación obtenida con el VANT (m), Z_j es la elevación obtenida con ET o GPS RTK (m), $j = 1, \dots, n$ es el número de cada celda (adimensional) y n es el número de celdas en los raster de los tres MDE.

El cálculo de la Ecuación 1 se realizó con algebra de mapas de los tres raster de los MDE (ArcMap [ESRI, 2016]), obteniendo el numerador de la función para cada celda del raster calculado. Para aplicar la suma y obtener el número de celdas del raster en la herramienta de análisis espacial zonal, los datos se exportaron a una tabla para sumar los valores de las diferencias de altura al cuadrado y obtener el número de celdas analizadas (Cuadro 4).

Table 4. Comparison of surveying methods in relation to the square root of the mean square error (RMSE).

Cuadro 4. Comparación de los métodos topográficos en relación con la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Comparative methods/ Métodos comparados	Number of cells in the raster/ Número de celdas en los raster	$\sum_{j=1}^n (z_j - Z_j)^2$	RMSE
TS vs. UAV / ET vs. VANT	3 083 342	70 293	0.151
GPS RTK vs. UAV / GPS RTK vs. VANT	3 083 342	64 573	0.145
TS vs. GPS RTK / ET vs. GPS RTK	3 083 342	1 101	0.019

TS = total station; UAV = unmanned aerial vehicle.

ET = estación total; VANT = vehículo aéreo no tripulado.

error found in this study. Polat and Uysal (2017) showed an RMSE = 0.171 when generating DEM with UAV and GPS RTK, which agrees with the results obtained in this study, since there is a difference of only 11.7 %.

The MDE obtained from each topographic survey technique does not present significant differences ($P \leq 0.05$) in the variables X, Y and Z, which indicates that it is indistinct to use one or another method to generate the MDE with the exposed methodology. When using the equipment analyzed in this study (TS, GPS RTK and photogrammetry), the average error estimated in the variable X is ± 0.041 m, and in Y is ± 0.043 m. However, in the Z variable the difference is ± 0.098 m when compared with X, and with Y it increases by 127 %, so this difference defines the use that will be given to the DEM.

The RMSE statistic of TS vs. UAV is ± 0.151 m, of GPS RTK vs. UAV is 0.145 m and of TS vs. GPS RTK is 0.019 m, which indicates that the traditional methods TS and GPS RTK maintain reliability with respect to the photogrammetric method analyzed.

Conclusions

The different surveying methods (ST, GPS RTK and photogrammetry) used to generate a DEM do not differ statistically. According to the conditions described in the study, the user can make a reasoned decision depending on the equipment available and on the application of generating the topography. Furthermore, it was determined that the three methods are reliable, since the traditional methods (TS and GPS RTK) show minor errors compared to photogrammetry using UAV; however, the methods complement each other because it is indispensable to take control points in the field for the georeferencing of DEMs. X and Y coordinates have a lower error, compared to the Z axis in UAVs. For further studies, it is proposed to carry out the survey at different flight heights, and to analyze the error due to the increase in pixel size and surface coverage conditions.

End of English version

References / Referencias

- Agisoft. (2019). *Agisoft PhotoScan version 1.4.5*. Retrieved from <https://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Bendea, H., Boccardo, P., Dequal, S., Giulio-Tonolo, F., Marenchino, D., & Piras, M. (2008). Low cost UAV for post-disaster assessment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(8), 1373-1380. Retrieved from http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/8_pdf/14_Th5-20/37.pdf

En el Cuadro 4 se observa que la RMSE al comparar ET vs. VANT es de ± 0.151 m, GPS RTK vs. VANT es de ± 0.145 m, y ET vs. GPS RTK es de ± 0.019 m.

Gupta y Shukla (2018) reportan un error de 0.44 m entre el MDE generado con VANT y con ET, lo que indica una diferencia de 65 % al error encontrado en este estudio. Komarek et al. (2016) obtuvieron una RMSE = 0.29 m al comparar el MDE obtenido a partir de VANT y de GPS RTK, observándose una diferencia de 47 % con respecto al error alcanzado en este trabajo. Polat y Uysal (2017) presentan una RMSE = 0.171 al generar el MDE con VANT y con GPS RTK, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo, al haber una diferencia de tan solo 11.7 %.

El MDE obtenido a partir de cada técnica de levantamiento topográfico no presenta diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las variables X, Y y Z, lo que indica que es indistinto utilizar uno u otro método para generar los MDE con la metodología expuesta. Al emplear los equipos estudiados en este trabajo (ET, GPS RTK y fotogrametría), el error promedio estimado en la variable X es de ± 0.041 m, y en Y es de ± 0.043 m. No obstante, en la variable Z la diferencia es de ± 0.098 m al compararla con X, y con Y se incrementa 127 %, por lo que dicha diferencia define el uso que se le dará al MDE.

El estadístico RMSE de ET vs. VANT es de ± 0.151 m, de GPS RTK vs. VANT es de 0.145 m y el de ET vs. GPS RTK es de 0.019 m, lo que indica que los métodos tradicionales ET y GPS RTK mantienen confiabilidad con respecto al método fotogramétrico analizado.

Conclusiones

Los diferentes métodos de levantamiento topográfico (ET, GPS RTK y fotogrametría) empleados para la generación de un MDE no difieren estadísticamente. De acuerdo con las condiciones que se describen en el estudio, el usuario puede tomar una decisión razonada en función del equipo que dispone y en la aplicación para generar la topografía. Además, se determinó que las tres técnicas son confiables, ya que los métodos tradicionales (ET y GPS RTK) presentan errores menores comparados con la fotogrametría con VANT; sin embargo, los métodos se complementan debido a que es indispensable la toma de puntos de control en terreno para la georreferenciación de los MDE. Las coordenadas X y Y presentan un menor error, comparado con el eje Z en los VANT. Para estudios posteriores, se propone realizar el levantamiento a diferentes alturas de vuelo, y analizar el error debido al incremento en el tamaño de pixel y a las condiciones de cobertura de la superficie.

Fin de la versión en español

- 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. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
- Escalante-Torrado, J. O., Cáceres-Jiménez, J. J., & Porras-Díaz, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119-140. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop*. Retrieved from <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>
- Gupta, S. K., & Shukla, D. P. (2018). Application of drone for landslide mapping, dimension estimation and its 3D reconstruction. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(6), 903-914. doi: 10.1007/s12524-017-0727-1
- Komarek, J., Kumhalova, J., & Kroulik, M. (2016). Surface modelling based on unmanned aerial vehicle photogrammetry and its accuracy assessment. *Engineering for Rural Development*, 25, 888-892. Retrieved from <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2016/Papers/N168.pdf>
- Leduc, M. B., & Knudby, A. J. (2018). Mapping wild leek through the forest canopy using a UAV. *Remote Sensing*, 10(70), 1-15. doi: 10.3390/rs10010070
- Liu, Q., Liu, W., Zou, L., Wang, J., & Liu, Y. (2012). A new approach to fast mosaic UAV images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 271-276. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-271-2011
- Long, N., Millescamp, B., Pouget, F., Dumon, A., Lachaussee, N., & Bertin, X. (2016). Accuracy assessment of coastal topography derived from UAV images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 1127-1134. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1127-2016
- Mena-Frau, C., Molina-Pino, L., Ormazábal-Rojas, Y., & Morales-Hernández, Y. (2011). Generalización de modelo digital de elevación condicionada por puntos críticos de terreno. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 17(3), 439-457. doi: 10.1590/s1982-21702011000300007
- Mesas-Carrascosa, F. J., Torres-Sánchez, J., Clavero-Rumbao, I., García-Ferrer, A., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by uav to support site-specific crop management. *Remote Sensing*, 7(10), 12793-12814. doi: 10.3390/rs71012793
- Ojeda-Bustamante, W., Flores-Velázquez, J., & Ontiveros-Capurata, R. E. (2016). *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Retrieved from https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/uso-y-manejo-de-drones.pdf
- Permata, A., Juniansyah, A., Nurcahyati, E., Dimas-Afrizal, M., Shafry-Untoro, M. A., Arifatha, N., Yudha-Adiwijaya, R. R., Sapta-Widartono, B., & Hery-Purwanto, T. (2016). Aerial photographs of landslide on clapar, madukara district of banjarnegara as a spatial geodatabase. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 47(1), 1-8. doi: 10.1088/1755-1315/47/1/012006
- Polat, N., & Uysal, M. (2017). DTM generation with UAV based photogrammetric point cloud. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4), 77-79. doi: 10.5194/isprsarchives-XLII-4-W6-77-2017
- Toschi, I., Rodríguez-González, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S., & Fuller, A. (2015). Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 245-253. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-245-2015
- Vázquez-Paulino, J. C., & Backhoff-Pohls, M. A. (2017). *Procesamiento geo-informático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte*. México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Wang, Q., Wu, L., Chen, S., Shu, D., Xu, Z., Li, F., & Wang, R. (2014). Accuracy evaluation of 3D geometry from low-altitude UAV collections a case at Zijin Mine. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(4), 297-300. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-4-297-2014
- Zhou, Q., & Chen, Y. (2011). Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 6, 38-45. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.005