



Mejora de la Exactitud Altitudinal de los MDS Generados con VANT Incorporando PAF en Altura

Improvement of vertical accuracy of MDS from UAV incorporating ground control points on buildings

Guillermina Soledad Santecchia

Universidad nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, (UNS), Bahía Blanca,
Argentina.

guillermina.santecchia@uns.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0002-1263-1104>

Karina Raquel Neuman

Universidad Nacional del Sur (UNS) Departamento de Ingeniería, Bahía Blanca,
Argentina.

kneuman@uns.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0003-2356-8953>

Juan Manuel Span

Universidad Nacional del Sur (UNS) Departamento de Ingeniería, Bahía Blanca,
Argentina.

jmspan@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8367-4446>

DOI <https://doi.org/10.48204/reict.v3n1.3947>

Recibido: 8/3/2023 Aceptado: 18/4/2023

RESUMEN

En la planificación de una ciudad es de gran importancia llevar un control del crecimiento y densificación de la mancha urbana, así como de los usos vigentes y los adoptados por la población. Para lograr una planificación eficiente, es importante contar con un Modelo Digital de Superficies (MDS) que se ajuste de la mejor manera posible a la realidad. En Argentina, el registro público de datos relativos a una propiedad inmueble, conocido como catastro, constituye la información geográfica de referencia fundamental para un

gran número de aplicaciones y sistemas de gestión de información geográfica. En la actualidad se registra la parcela en planta, es decir en 2D. Las diferentes técnicas que las nuevas tecnologías proveen, hacen pensar que es posible en un futuro próximo contar con un Catastro 3D. Por ello, en este trabajo se analiza cómo mejorar la exactitud en el valor de la altura de MDS generados a partir de imágenes tomadas con vehículos aéreos no tripulados (VANT), utilizando puntos de apoyo fotogramétrico (PAF) en terreno y sobre las edificaciones. Las discrepancias en altura encontradas sobre puntos de control en los MDS generados con diferentes números de PAF sobre edificaciones, son inferiores, tanto a nivel terreno como a nivel edificaciones.

Palabras clave: Modelo Digital de Superficie, VANT, exactitud, altura.

ABSTRACT

In the urban planning it is of great importance to keep track of growth and densification of the urban sprawl, as well as the current uses and which adopted by the population. To achieve efficient planning, it is important to have a Digital Surface Model (MDS) that fits to reality in the best possible way. In Argentina, the public registry of data relating to a real estate, known as cadaster, it is the fundamental geographic reference information for a large number of geographic information management applications and systems. At present the plot is registered in plan, that is, in 2D. The different techniques that new technologies provide suggest that it is possible in the near future to have a 3D Cadastre. Therefore, this paper analyzes how to improve the accuracy in the value of vertical component of MDS generated from images taken with unmanned aerial vehicle (UAV), using ground control points (GCP) in the field and on buildings. Differences found in MDS generated with different amounts of GCP on buildings are lower both at ground level and at building level.

Key words: Digital Surface Model, UAV, accuracy, vertical component.

INTRODUCCIÓN

Los Modelos Digitales de Superficies (MDS) son estructuras numéricas de datos, que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). En la planificación de una ciudad, es de gran importancia llevar un control del crecimiento y densificación de la mancha urbana, así como de los usos vigentes y los adoptados por la población. Para que ésta sea eficiente, es esencial que el estado municipal y provincial conozca su territorio y la dimensión real de los recursos que en él posee. Contar con un MDS que se ajuste de la mejor manera posible a la realidad, es un desafío que se presenta tanto en las grandes ciudades como en aquellas con altas perspectivas de crecimiento.

El registro público donde se hacen constar datos relativos a una propiedad inmueble, conocido como catastro, constituye la información geográfica de referencia fundamental para un gran número de aplicaciones y sistemas de gestión de información geográfica temática, como la gestión de impuestos, control y gestión de la ocupación del suelo, del patrimonio inmobiliario, del planeamiento, etc. (Serenó Álvarez, 2009). La gestión territorial cuenta con herramientas indispensables, los productos cartográficos; tal como lo menciona Ariza-López (2002), la calidad de los mismos depende de la exactitud posicional de los objetos a representar.

En Argentina, las parcelas ingresadas al catastro están definidas en 2D, puesto que según la Ley Nacional de Catastro N° 26209, el concepto de parcela 3D no existe oficialmente (van Oosterom et al., 2018). La mayoría de los objetos 3D se representan en planos 2D indicando un número que corresponde al piso, y una sección transversal con identificación de alturas relativas al suelo en el caso de edificios.

En el catastro 3D, además de las medidas planimétricas del objeto territorial, se registran las tres coordenadas de un número suficiente de puntos que permitan ubicarlo

espacialmente como bloque en el marco de referencia y a la fecha de medición. Erba et al. (2015) consideran que para inmuebles urbanos la tolerancia espacial para la georreferenciación puede estar en el orden de los 10 cm e indican que la altura elipsoidal es la más adecuada para registrar parcelas 3D. Pero no es la adecuada si se desea conocer el desplazamiento de las aguas, en ese caso sugieren utilizar junto a la elipsoidal, la altura ortométrica.

Existen Modelos Digitales de Elevación (MDE) de libre acceso que muestran con buena aproximación el comportamiento de la topografía en áreas extensas, y brindan herramientas para la ejecución de estudios que no requieren precisión centimétrica en el valor de la altura referida al nivel medio del mar (Racoviteanu et al., 2007; Siart et al., 2009; Burgos, 2012; Grosse et al., 2012; Kinsey-Henderson y Wilkinson, 2013). En áreas urbanas estos MDE no aportan una resolución adecuada, ni información confiable para ser utilizada de base para estudios que necesiten mayor nivel de detalle. En los casos puntuales donde el objeto de interés son los elementos que se encuentran en la superficie, será necesario generar MDS. Una forma de confeccionarlos es utilizando la fotogrametría, que es la técnica que tiene como objetivos extraer información fiable a partir de imágenes, realizar mediciones de precisión, determinar coordenadas y realizar levantamientos topográficos (Hernández López, 2006; Lerma García, 2002; Wolf, 2014). La evolución de la fotogrametría digital producida por la aparición de los VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados) ha permitido adquirir datos topográficos con una resolución espacial y temporal difícil de obtener a través de otros medios. Todo esto, además, acompañado de una mejora en los softwares para procesamiento de imágenes, el tratamiento digital de los resultados, su integración a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y una reducción en los tiempos de trabajo, tanto de campo como de gabinete (Jaramillo Baltra y Padró García, 2020; Ruiz Sabina et al., 2015).

Martell Hernández y Sánchez Salceiro (2018) demostraron la pertinencia y viabilidad del empleo de la tecnología VANT para la creación de los mapas catastrales a escala 1: 500. Magalhães y Moura (2021) resaltan el potencial de los VANT para la realización de catastros expeditivos en zonas de expansión urbana, zonas de reciente ocupación, asentamientos informales, entre otros; demostrando que el mantenimiento de una distancia homogénea de la aeronave con relación al suelo, presenta mejores resultados en cuanto a la morfología del MDS y, en consecuencia, condiciona la calidad de los productos derivados, tales como el ortomosaico y los modelos digitales de terreno (MDT). Mayet Valdes et al. (2016) destacan que el desarrollo de la informática ha permitido representar los distintos objetos en sus tres dimensiones permitiendo, en aquellos casos donde resulta importante la altura, tomar mejores decisiones y realizar un análisis urbanístico teniendo en cuenta la dinámica de la ciudad. Martín-Vares et al. (2010) realizan un análisis de los países de Europa que ofrecen datos de edificios 3D y las necesidades, por parte de distintos usuarios, con respecto a la geometría 3D de los edificios. Además, remarcan que las necesidades de los distintos interesados en estos datos, acompañado de los avances técnicos, podrían exigir futuros modelos 3D de fácil mantenimiento. Fernández-Lozano et al. (2017) exponen los beneficios y dificultades que presenta el estudio de elementos del patrimonio arqueológico, destacando la obtención rápida y precisa de modelos 3D mediante fotogrametría con drones, constituyendo una herramienta eficaz para la toma de datos. Ceballos Izquierdo y Capó (2018) afirman que un problema común es poder medir y manejar la coordenada z, pero que la aparición de los VANT ha facilitado esta tarea.

Pensar en un futuro próximo contar con un catastro 3D es más factible si se cuentan con metodologías que perfeccionen la exactitud posicional de los productos que se logran con las nuevas tecnologías. Por ello, en el presente trabajo se analiza cómo mejorar la

exactitud en el valor de la altura de MDS, generados a partir de imágenes tomadas con VANT utilizando, además de los puntos de apoyo fotogramétrico en terreno, puntos sobre las edificaciones. Entendiendo como exactitud a la proximidad de los valores recogidos de las coordenadas, en este caso la altura, a los valores verdaderos o aceptados como tales (Ariza-López et al., 2018).

ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

Existen en el mercado distintos tipos de VANT, también llamados UAV (del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*), RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), UAS (*Unmanned Autonomous Systems*) y popularmente conocidos como DRONES, término militar (Arriola Valverde et al., 2018); los hay de ala fija, híbridos y multirrotores, cada uno con sus propias características, y específicos para realizar determinados trabajos.

Novara y Jacamo (2020) indican que la técnica Estructura desde el Movimiento (EdM-*Structure from Motion* - SfM) utilizada a partir de imágenes tomadas con VANT, es un enfoque económico, eficaz y flexible para capturar las complejas variaciones de alturas en la medición de estructuras edilicias, teniendo un gran potencial para la cartografía de altura de la infraestructura tanto en espacios urbanos como rurales, en su trabajo analiza la precisión de los MDS variando la altura de vuelo. Múltiples estudios comparan el MDS obtenido a partir de imágenes capturadas con VANT con los generados a partir de scanner láser, de relevamientos GNSS (*Global Navigation Satellite System*) y/o técnicas clásicas de topografía, en algunos casos analizando variación de la altura de vuelo, incluyendo o no PAF (Puntos de Apoyo Fotogramétrico); coincidiendo en que se logran buenos resultados en la producción de información 3D, pero que las mayores discrepancias se encuentran en los lugares con cambios repentinos de la topografía (Mancini et al., 2013; Harwin y Lucieer, 2012; Gašparović et al., 2017; Cisneros et al., 2019). Rivera Yela (2017) evalúa la calidad y precisión del levantamiento de fotografía aérea verificando si

cumple con las especificaciones técnicas tanto en su precisión horizontal como vertical. En todos los trabajos la exactitud de los puntos obtenidos es evaluada a nivel del terreno. Ivelja et al. (2020) introducen en el proceso de reconstrucción de las imágenes generadas con VANT, diferentes cantidades de puntos control y relevamientos terrestres con scanner láser. Esta metodología mejora en un 49 % la precisión vertical de los MDS, llegando a valores medios de 5.6 cm de discrepancias en altura, usando 12 PAF en un área de 0.05 km² para la obtención de datos para estudios submarinos o batimétricos. Ajibola, et al. (2019) utilizan algoritmos de fusión y filtrado para mejorar la precisión vertical de MDE producidos por VANT, logrando errores estándar de 2,24 cm.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en el campus de la Universidad Nacional del Sur, ubicado en el cuadrante NE de la ciudad de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, República Argentina (Figura 1). En el sector elegido, que abarca aproximadamente 6 has., se encuentran edificaciones de diferentes alturas (3.43 m a 12.14 m) sobre terreno con una amplitud máxima entre cotas de 13 m y distintas pendientes topográficas, destacándose la pendiente general de SE-NO hacia el Arroyo Napostá Grande.

METODOLOGÍA

Instrumental topográfico, geodésico y fotogramétrico

El VANT utilizado para obtener las imágenes es un *Parrot Anafi*, multirroto. La aeronave posee una cámara de 21 megapíxel con un HFOV (*Horizontal field of view* – campo de visión horizontal) de 84°, un sensor CMOS y un sistema de posicionamiento satelital que capta las constelaciones GPS (*Global Positioning System*) y GLONASS (*Global Navigation Satellite System* de origen ruso).

Para georreferenciar los PAF sobre el terreno se utilizó un receptor GPS/GNSS South Galaxy G1 Plus de 220 canales que permite obtener gran precisión en las coordenadas

planialtimétricas. Este es un equipo de doble frecuencia (L1/L2) que recibe información de las constelaciones GPS, GLONASS, BEIDOU y GALILEO; compuesto por una antena móvil con radio interna G1 plus, una controladora South X11 provista del programa *fieldgenius*, un bastón y un chip de telefonía celular.

Las coordenadas de los PAF en altura se obtuvieron de manera combinada utilizando instrumental GNSS y una Estación Total (ET) KOLIDA KTS 472R cuya precisión en el levantamiento sin utilizar prisma es de 3 mm + 2 ppm.

Puntos de apoyo fotogramétrico y para control altimétrico

Definida el área de estudio a través de *Google Earth*, se analizó la ubicación de los PAF de forma que queden distribuidos de manera uniforme en el bloque, eligiendo elementos existentes en el terreno fácilmente identificables en las imágenes.

Para cumplir con los objetivos del trabajo, a los PAF a nivel terreno se agregaron en la reconstrucción del modelo, PAF sobre las edificaciones. Se utilizaron, además, puntos de control de coordenadas planialtimétricas conocidas a nivel terreno (PCT) y sobre las edificaciones (PCE), con el propósito de contar con alturas de referencia (considerado valor verdadero) para luego poder comparar los valores de alturas obtenidas en los MDS sobre dichos puntos.

PAF a nivel terreno

Las coordenadas planialtimétricas de los 6 PAF a nivel terreno (Figura 2) se obtuvieron punto a punto por el método de medición RTK (Real Time Kinematic) en su variante NTRIP (Networked Transport of RTCM vía Internet Protocol). Se configuró el receptor para relevar con un error máximo de 30 mm. El punto de referencia fue el VBCA de la red RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) (Piñón et al., 2018), por lo que las coordenadas finales están referidas al Marco de Referencia Nacional Posiciones Geodésicas Argentinas 2007 (POSGAR 07). Para contar con alturas reducidas al nivel

medio del mar, a las alturas elipsoidales obtenidas del relevamiento se les aplicó el modelo geoidal GeoideAr-16 del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2009).

PAF sobre edificaciones

Para dotar de coordenadas planialtimétricas a los 6 PAF ubicados en la parte superior de las edificaciones, de difícil acceso (Figura 3), se optó por un método indirecto de medición colocando una ET con base en un único punto sobre el terreno; de esta manera, se evita cometer errores en los cambios de estación del instrumento. Se realizó una resección (Ghilani & Wolf, 2012), para determinar las coordenadas de la estación del instrumento mediante mediciones a puntos cuyas coordenadas son conocidas. En este caso se utilizaron 3 puntos de coordenadas conocidas, obteniendo una desviación total de 1 mm.

PCT y PCE

Para obtener las coordenadas de los PCT se realizó un relevamiento punto a punto por el método de medición RTK, procediendo de la misma manera que el inciso 3.2.1. Se relevaron un total de 10 puntos y fueron designados desde la letra A a la J. Mientras que, para las coordenadas de los PCE, se optó por un relevamiento clásico con ET, explicado en el inciso 3.2.2. Se relevaron un total de 9 puntos, designados desde la letra K a la S (Figura 3).

Una vez identificados y georreferenciados todos los PAF se procedió a realizar un vuelo autónomo, planificado a través de la aplicación Pix4D capture, estableciendo los siguientes parámetros: altura de vuelo de 70 m, velocidad crucero de 8 m/s, traslape longitudinal y transversal del 80 %. Como resultado se capturaron 172 imágenes (formato JPG) con 2.72 cm/pix de resolución espacial. En los levantamientos con VANT es importante prestar atención al Ground Sample Distance (GSD), lo cual corresponde a la distancia en el terreno que equivale al tamaño lateral del píxel. Si se aumenta la altura de

vuelo, aumentará el GSD y se obtendrá como resultado menor resolución espacial o de detalle en el producto final. Sin embargo, no se recomiendan vuelos a alturas por debajo de los 40 m, ya que provocan una reducción en la localización de puntos homólogos (Mendoza Priesseng, 2018).

Procesamiento de imágenes

En este trabajo se utilizaron datos ópticos RGB que fueron procesados con el software *Agisoft Metashape*, comenzando con la orientación de las fotografías. Para ello se eligió una precisión alta y se obtuvo un RMSE (*Root Mean Square Error*) de proyección de 0.24 m. Se delimitó el área de estudio, conservando los puntos dentro del mismo y dejando una zona de seguridad, para reducir la cantidad de puntos a procesar. Luego, considerando los 6 PAF sobre el terreno se confeccionó un MDS (denominado MDS 0) obteniendo una resolución de 4.94 cm/pix, con la ortofoto correspondiente (Figura 4) con una resolución de 2.47 cm/pix, en el sistema de coordenadas POSGAR 2007, proyección Gauss Kruger Argentina, Faja 4 (EPSG *European Petroleum Survey Group*, 5346).

Posteriormente, se generaron otros 3 MDS, que surgen de considerar además de los 6 PAF en el terreno, 1, 3 y 6 PAF en altura (denominados MDS 1, MDS 3 y MDS 6, respectivamente). Para el MDS 1 se utilizó el PAF 8, para el MDS 3, los PAF 7, 8 y 9, y para el MDS 6, los PAF 7 al 12. A partir de éstos, se realizó el control altimétrico de los puntos a nivel terreno y a nivel edificación utilizando las herramientas que brinda el software QGis 3.14. Para ello se extrajeron las alturas sobre el MDS de los puntos de control para luego compararlas con los puntos tomados de referencia, es decir los PCT y PCE, cuyas coordenadas surgieron de los relevamientos con GNSS y con ET. El procedimiento considerado para el desarrollo del proyecto se puede observar en la Figura

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la exactitud altimétrica sobre el terreno

Las diferencias de altura encontrada en los puntos PCT considerando los cuatro MDS generados pueden apreciarse en la Tabla 1. Como se indicó en la Figura 5 todos los MDS consideran los PAF sobre el terreno, y cada uno de ellos se designó de acuerdo al número de PAF sobre edificaciones utilizados. Se puede observar que los valores no superan los 10 cm en ninguno de los casos.

Del análisis del gráfico de dispersión para el MDS 0, se observa una baja correlación (0.37) entre las discrepancias y la altura de cada PCT, indicada en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm) (Figura 6). En el mismo se indican las cotas de los PAF sobre el terreno, para demostrar que han sido ubicados con una distribución uniforme en cuanto a su altimetría.

Por lo que se puede decir que los resultados a nivel terreno natural son los esperados al utilizar sólo PAF sobre el terreno, siguiendo la metodología usada habitualmente. Para comprobar que la incorporación de PAF en altura no afecta de manera negativa la exactitud en los PCT, a partir de los valores de la tabla 1 se confeccionó un diagrama de caja-bigotes (Figura 7).

Se puede observar que salvo el MDS 6, los demás modelos presentan similar rango de dispersión en los datos. En el MDS 0 se registró una diferencia de altura máxima de -8.9 cm y una media de -3.6 cm. El MDS 1 tiene un comportamiento similar (con una diferencia de altura máxima de -9.2 cm y una media de -3.4 cm) pero el recorrido intercuartílico es inferior. El MDS 3 y el MDS 6 presentan el mismo valor medio, -1.2 cm, el MDS 3 tiene una diferencia de altura máxima de -6.6 cm y el MDS 6, de -5.9 cm. Aumentando el número de PAF sobre las edificaciones se mejora la exactitud de los valores correspondientes a la altura de los puntos sobre el terreno, con 6 PAF en altura se obtuvieron los mejores resultados.

Análisis de la exactitud altimétrica sobre las edificaciones

Las diferencias de altura sobre los puntos PCE pueden apreciarse en la Tabla 2.

En el siguiente gráfico (Figura 8) se puede observar que el MDS 0 tiene una gran dispersión entre los valores y el mayor rango intercuartílico, con una media de -23.1 cm y una diferencia de altura máxima de -32.1 cm. Los MDS 1, MDS 3 y MDS 6 poseen similar rango intercuartílico, aunque el MDS 3 cuenta con mayor dispersión en los datos. El MDS 1 es el único que presenta en los PCE, casi en su totalidad diferencias positivas, es decir, el modelo se genera a una altura superior a la esperada.

RMSE de las diferencias halladas en los PCT y los PCE

Teniendo en cuenta los valores de tabla 1 y tabla 2 (diferencias de altura encontradas en cada MDS con los datos altimétricos de los PCT y PCE), se calculó el RMSE y el Estándar Nacional para la Exactitud de Datos Espaciales (NSSDA - National Standard for Spatial Data Accuracy, Estados Unidos), cuyo objetivo es proporcionar una metodología estadística para evaluar la exactitud posicional de las características que se encuentran dentro de un conjunto de datos geográficos (FGDC, 1998). Si bien la guía establece que se requieren 20 puntos de control como mínimo para áreas inferiores a los 500 Km², y que éstos deben ser elegidos al azar, como el sector de estudio abarca el 1% de esa área, se procedió al cálculo del estándar contando con 10 y 9 puntos sobre el terreno y sobre las edificaciones, respectivamente.

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{\sum(H_i - H_0)^2}{n}} \quad (1)$$

siendo H_i el valor de la altura ortométrica obtenida en los MDS, H_0 el valor de altura de referencia en el terreno o sobre el edificio y n , la cantidad de observaciones.

$$NSSDA = 1.9600 * RMSEH \quad (\text{nivel de confianza del 95 \%}) \quad (2)$$

Los NSSDA indican que la exactitud en la determinación de la altura ortométrica sobre el terreno se incrementa a medida que se agregan PAF sobre las edificaciones. Para el

caso del MDS 6, mejoró un 35 % alcanzando una exactitud vertical de 6.3 cm con un nivel de confianza del 95 %; mientras que la exactitud en la determinación de altura ortométrica sobre las edificaciones se incrementó en un 80.75%, logrando un NSSDA de 9.2 tanto en el MDS 3 como en el MDS 6, aunque los mejores resultados según este estándar se logran con un sólo PAF en altura (8.5).

Relación de la precisión altimétrica de los PCE y la ubicación planialtimétrica de los PAF en altura

Las imágenes que se muestran a continuación (Figura 9 a, b, c, d) permitieron analizar en cada MDS generado, la relación existente entre la ubicación planimétrica de los PAF sobre las edificaciones y las discrepancias encontradas en la altura de los PCE.

Se indica con barras verticales el porcentaje de error calculado en cada PCE. Adjunto a la imagen se presenta un gráfico de dispersión de las diferencias de altura encontradas en función de la cota de los mismos, para analizar si su distribución altimétrica influye en los resultados.

Las imágenes precedentes demuestran, comparando los resultados del MDS 0 (Figura 9 a) con los de los demás modelos, que la utilización de PAF sobre edificaciones mejora considerablemente los resultados en la exactitud de la altura obtenida en puntos elevados. Analizando los coeficientes de correlación entre las cotas de referencia de puntos sobre los edificios y las diferencias en altura encontradas, se observa que el MDS 0 cuenta con un valor de -0.75, lo cual indica una correlación alta, es decir que la diferencia entre la cota obtenida en el MDS y la de control se incrementa a medida que aumenta la altura del edificio (Figura 9a).

Aunque estadísticamente el MDS 1 arroja valores similares al MDS 3 y MDS 6, con RMSE inferiores a + 5 cm (según tabla 3), se puede apreciar en el gráfico de la Figura 9b que en el MDS 1 persiste una alta correlación (+0.76) entre la cota de los PCE y las

diferencias de altura. Cabe recordar que al utilizar 1 PAF, las diferencias en altura son positivas, es decir, que se genera un MDS con cotas superiores a las consideradas como verdaderas. El PAF en altura se encuentra en el centro del área, aunque no existe una tendencia clara, podría decirse que los puntos ubicados hacia el Sur del PAF presentan mayores discrepancias que los ubicados al Norte. En este sector se hallan los puntos con mayor cota, superando en más de 5 m a la cota del PAF utilizado. En otras palabras, se ha registrado mayor diferencia en los PCE ubicados en el área que posee cota superior a la del PAF en altura utilizado, lo que indica que un único PAF central sobre las edificaciones no es suficiente para obtener resultados confiables en el MDS, si solamente es considerada su posición planimétrica.

En los MDS 3 y MDS 6, los coeficientes de correlación son mínimos, -0.03 y 0.001, respectivamente (Figuras 9c y 9d). Tanto en el MDS 3 como en el MDS 6, en los PCE ubicados en la parte central del relevamiento (N, L, K y P), las diferencias en altura son inferiores a los 5 cm. En el MDS 3, los PCE O, R y M, evidencian valores mayores a 5 cm, encontrándose éstos ubicados en los bordes y fuera del área de los PAF en edificaciones. Sin embargo, los puntos S y Q, también tienen esta característica y presentan valores inferiores a los -2.5 cm. Con el MDS 6, se mejora la exactitud del punto O, de -9.1 a -7.6 cm, aunque se empeora la del punto Q considerablemente, de -1.3 a -6.4 cm, por lo que no existe dependencia en la posición planimétrica de los PAF y las discrepancias de los PCE. Se destaca que el PCE con mayor discrepancia es el O, único punto cuya cota sobrepasa a la de los PAF sobre edificaciones, en coincidencia con lo que ocurre con los valores calculados en el MDS 1.

Los MDS y MDE generados con 3 y 6 PAF distribuidos en el área de estudio presentan menores discrepancias en altura, aunque con 6 PAF se disminuye también la dispersión en los valores. Considerando ésto, y el esfuerzo que implica dotar de coordenadas a

puntos en altura, se recomienda el uso de 3 PAF en altura, cuando se desee obtener MDS con mayor exactitud tanto en la cota del terreno como en la de las edificaciones. Con la salvedad de que los PAF en altura deben ser tales que su altura supere la altura máxima de la zona de estudio, puesto que se observa que disminuye la exactitud de los puntos situados fuera del intervalo de alturas de los PAF.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada hasta el momento para la reconstrucción del modelo digital, es decir considerando sólo un número determinado de puntos de apoyo fotogramétrico sobre el terreno, es válida cuando se desea representar la superficie topográfica (terreno natural o consolidado a nivel suelo) por medio de Modelos Digitales de Elevación. Si se tiene en cuenta el Modelo Digital de Superficie, las discrepancias se incrementan a medida que aumenta la altura del edificio.

Utilizar puntos de apoyo fotogramétrico sobre edificaciones mejora los resultados en la obtención de las cotas, no sólo sobre las edificaciones sino también a nivel terreno; la exactitud en la altura de puntos a nivel terreno se incrementa al aumentar el número de puntos de apoyo fotogramétrico sobre edificaciones.

Cuando se requiera realizar un análisis territorial de una ciudad, avanzar en la confección de un Catastro 3D o mejorar el existente, y para ello se utilicen Modelos Digitales de Superficie generados a partir de tecnología VANT, la implementación de la metodología analizada en este trabajo mejora en más de un 80% los resultados obtenidos respecto a la exactitud de las alturas sobre edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado en el marco del PGI “Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) aplicadas al estudio del Ordenamiento del Suelo (Tercera etapa), desarrollado en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ajibola, I., Mansor, S., Pradhan, B. & Mohd. Shafri, H. (2019) Fusion of UAV-based DEMs for vertical component accuracy improvement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 147, 106795. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.023>
- Ariza-López FJ (2002). *Calidad en la producción cartográfica*. RA-MA, Madrid.
- Ariza-López F.J., García-Balboa, J.L., Rodríguez-Avi, J. & Robledo J., (2018). Guía general para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales. Proyecto: Pro-puesta de adopción de metodologías y procedimientos empleados para la evaluación de la calidad de la información geográfica para los Estados Miembros del IPGH (Proyec-tos Panamericanos de Asistencia Técnica –2018 "Agenda del IPGH 2010-2020"). Montevideo.
- Arriola Valverde, S., Ferencz Appel, A. & Rimolo-Donadio, R. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga TEC*, 9-12. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/3475.
- Burgos, V. (2012). Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C / X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino. 1er Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos. https://www.researchgate.net/publication/274893462_Evaluacion_de_ASTER_GDEM_y_SRTM-CX_para_modelacion_hidraulica_de_la_rotura_de_presa_El_Carrizal_Mendoza
- Ceballos Izquierdo, Y & Capó, L. (2018). El futuro del Catastro Urbano: 3D y más allá. *Planificación Física Cuba*, (26), 38-44. https://www.researchgate.net/publication/331586913_El_futuro_del_Catastro_Urbano_3D_y_mas_alla
- Cisneros, S., García, E., Montoya, K. & Sinde, I. (2019). Estudio de las configuraciones de puntos de control terrestre para fotogrametría con drone. *Geoespacial*, 16(1). 43-57. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1278>
- Erba, D., Noguera, G., & Mangiaterra, A. (2015). Catastro 3D: sistemas de referencia altimétrica para parcelas y objetos territoriales. *Cartográfica*, (91). 59-73. <https://link.gale.com/apps/doc/A540678847/IFME?u=anon~24cab311&sid=googleScholar&xid=cfadbc3d>
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa, Oviedo.
- Fernández-Lozano, J. & Gutiérrez-Alonso, G. (2017). Modelización 3D con tecnología VANT para la reproducción y preservación del registro arqueológico del Proyecto de Geoparque Las Loras (Palencia-Burgos). *Actas de las V Jornadas de Jóvenes Investigadores del Valle del Duero*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6049805>
- FGDC. (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. <https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/chapter3>

- M., Seletković A., Berta A. & Balenović I. (2017). The valuation of Photo-grammetry-Based DSM from Low-Cost UAV by LiDAR-Based DSM. *SEEFOR* 8 (2). 117-125. <https://doi.org/10.15177/seefor.17-16>
- Ghilani, C., & Wolf, P. R. (2012). *Elementary surveying: an introduction to geomatics*. 13a Ed. Prentice hall.
- Grosse, P., Van Wyk de Vries, B., Euillades, P., Kervyn, M. & Petrinovic, I. (2012). Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology*, 136 (1), 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.001>.
- Hernández López, D. (2006). *Introducción a la fotogrametría digital*. ETSI Agrónomos. Universidad de Castilla, La Mancha.
- Ivelja, T., Bechor, B., Hasan, O., Miko, S., Sivan, D. & Brook, A. (2020). Improving vertical accuracy of UAV digital surface models by introducing terrestrial laser scans on a point-cloud level. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 457-463. <https://dnb.info/1215844646/34>
- Jaramillo Baltra, R. & Padró García, J. (2020). Generación de cartografía a partir de imágenes captadas con dron de ala fija, asociada a proyectos hidráulicos fluviales. *GeoFocus* 26, 93–117. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.680>
- Kinsey-Henderson, A. & Wilkinson, S. (2013). Evaluating Shuttle radar and interpolated DEM's for slope gradient and soil erosion estimation in low relief terrain. *Environmental Modelling & Software*, 40, 128–139. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2773797.2773889>.
- Lerma García, J. L. (2002). *Fotogrametría Moderna: Analítica y digital*. Valencia, España. Universitat Politècnica de Valencia.
- Magalhães, D., & Moura, A. (2021). Análise da Morfologia de Modelos Digitais de Superfície Gerados por VANT. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73(3), 707–722. <https://doi.org/10.14393/rbcv73n3-51600>
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S. & Gabbianelli, G. (2013). Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sens.*, 5, 6880-6898; <https://doi.org/10.3390/rs5126880>
- Martell Hernández, E. y Sánchez Salceiro, L. (2018). Procedimiento fotogramétrico aplicando los VANT al catastro. *X Congreso Internacional de Geomática 2018*. <https://1library.co/document/yr0vk5jy-procedimiento-fotogrametrico-aplicando-los-vant-al-catastro-photogrammetric-procedure-applying-the-vant-to-the-cadastre.html>
- Martín-Vares, A. V., García, J. M. O., & Groeger, G. (2010). El Catastro que nos viene... El Catastro de edificios en 3D en los países europeos y la definición de las especificaciones de los edificios para la infraestructura de datos europea. *CT Catastro*, 70, 27-43. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3402157>
- Mayet Valdes, A., Samuel Kelly, F., & García Morales, Y. (2016). Ciudad Catastral 3D. *IX Congreso Internacional Geomática 2016*.

<https://1library.co/document/y4wl8w45-catastral-palabras-dimensión-software-sistema-información-geográfica-catastro.html>

- Mendoza Priesseng, C. (2018). *Fotogrametría, Prácticas básicas y problemas*. Bogotá, Colombia. Alfaomega.
- Novara, M. & Jacamo, E. (2020). Vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la generación de modelos digitales de superficies de alta resolución. Aportes metodológicos sobre las distintas alturas de vuelo. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 12 (17) Sección I: 1-18. <https://revistageosig.wixsite.com/geosig/geosig-17-2020>
- Piñón, D., Gómez, D., Smalley, R., Cimbaro, S., Lauría, E. & Bevis, M. (2018). The History, State, and Future of the Argentine Continuous Satellite Monitoring Network and Its Contributions to Geodesy in Latin America. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 475–482. <https://doi.org/10.1785/0220170162>
- Racoviteanu, A.; Manley, W.; Arnaud, Y. & Williams, M. (2007). Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 59 (1-4), 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.036>.
- Rivera Yela, J. P. (2017). EJE 05-02 Evaluación de Método de Corrección Geométrica de Fotografía Aérea escala 1:1.000 capturada por vehículos aéreos no tripulados estableciendo una red Geodésica de cuarto orden. *Memorias y Boletines de la Universidad Del Azuay*, 1(16), 195–208. <https://doi.org/10.33324/memorias.v1iXVI.64>
- Ruiz Sabina, J. Á., Gallego Valle, D., Peña Ruiz, C., Molero García, J. M., & Gómez Laguna, A. (2015). Fotogrametría aérea por dron en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en los castillos medievales del campo de Montiel. *Virtual Archaeology Review*, 6(13), 5-19. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/9393>.
- Sereno Álvarez, A. (2009). La información geográfica en España: especial referencia a la cartografía catastral. *Catastro* 67, 31-54. <https://www.catastro.meh.es/documentos/publicaciones/ct/ct67/3.pdf>.
- Siart, C., Bubenzer, O. & Eitel, B. (2009). Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*, 112 (1-2), 106–121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.010>.
- Van Oosterom, P., Erba, D., Aien, A., Grant, D., Kalantari, M., Karki, S., ... & Smith, A. (2018). *Best Practices 3D Cadastres: Extended Version*. FIG Publication, International Federation of Surveyors, Copenhagen, Denmark, March. https://www.fig.net/resources/publications/figpub/FIG_3DCad/figpub_3DCad.asp
- Wolf P. R., D. B. (2014). *Elements of Photogrammetry with applications in GIS (4a ed.)*. EEUU: McGraw-Hill Education.